

**БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В.Г. ШУХОВА**



На правах рукописи

МИХАЙЛОВА ОЛЬГА АНАТОЛЬЕВНА

**ТЁПЛЫЙ АСФАЛЬТОБЕТОН
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДОБАВКИ
НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОСКОВ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Ядыкина В.В.**

Белгород - 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	13
1.1 Проблемы, обусловленные высокой температурой приготовления асфальтобетонных смесей. Теплые асфальтобетоны как способ их минимизации.....	13
1.2 Основные способы приготовления теплых асфальтобетонных смесей, их преимущества и недостатки	19
1.2.1 Технологии вспенивания битума.....	19
1.2.2 Температуропонижающие поверхностно-активные добавки	21
1.2.3 Органические температуропонижающие добавки	23
1.3 Эффективность добавок для теплых асфальтобетонных смесей.....	27
1.3.1. Влияние температуропонижающих добавок на физико-химические показатели битумного вяжущего.....	27
1.3.2 Влияние добавок на свойства асфальтобетонной смеси.....	31
1.4 Обоснование выбора состава комплексной температуропонижающей добавки на основе синтетических восков.....	38
1.5 Выводы.....	42
2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	44
2.1 Характеристика применяемых материалов	44
2.1.1 Характеристика органических вяжущих	44
2.1.2 Органическая добавка Вискодор ПВ-2 и составляющие ее компоненты.....	45
2.1.3 Органические импортные добавки.....	46
2.1.4 Характеристика минеральных материалов.....	48

2.2 Методы исследования.....	54
2.2.1 Методы исследования свойств модифицированного органическими добавками битумного вяжущего	54
2.2.2 Методы исследования асфальтобетонных смесей.....	59
2.3 Выводы.....	64
3 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОСКОВ ВИСКОДОР ПВ-2 НА СВОЙСТВА БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО	65
3.1 Теоретическое обоснование механизма действия компонентов полифункциональной добавки Вискодор ПВ-2	65
3.2 Подбор состава модификатора Вискодор ПВ-2.....	73
3.3 Изменение химического состава и структуры битумного вяжущего, модифицированного исследуемыми добавками	77
3.4 Влияние исследуемых органических добавок на физико-химические свойства битумного вяжущего БНД 100/130 и БНД 70/100	80
3.5 Влияние исследуемых добавок на реологические свойства вяжущего... ..	104
3.6 Влияние добавок на основе синтетических восков на изменение динамики термоокислительной деструкции вяжущего	109
3.7 Выводы.....	130
4. ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ВИСКОДОР ПВ-2 НА ФИЗИХО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА АСФАЛЬТОБЕТОНА	133
4.1.1 Асфальтобетон типа Б на основе вяжущего, модифицированного Вискодор ПВ-2	133
4.1.2. Асфальтобетон типа А16Вн на основе вяжущего, модифицированного Вискодор ПВ-2	140
4.1.3 Влияние исследуемых восковых добавок на физико-механические свойства литых асфальтобетонных смесей	144

4.2 Влияние добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 на эксплуатационные свойства асфальтобетонных смесей	149
4.3 Влияние добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 на старение асфальтобетонной смеси	153
4.4 Выводы	161
5 АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДОБАВКИ ВИСКОДОР ПВ-2 В СОСТАВЕ АСФАЛЬТОБЕТОНА	163
5.1 Разработка регламентирующей документации и практическое внедрение результатов исследования.....	163
5.2 Экономическая эффективность использования добавки Вискодор ПВ-2 в составе асфальтобетонных смесей.....	169
5.2 Экологическая эффективность применения разработанной многофункциональной добавки	177
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	180
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	183
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	214
Приложение А. Стандарт организации на полифункциональную добавку Вискодор ПВ-2.....	215
Приложение Б. Регламент производства полифункциональной добавки Вискодор ПВ-2.....	216
Приложение В. Акт апробации результатов работы	217
Приложение Г. Акт апробации результатов работы	218
Приложение Д. Результаты испытаний асфальтобетонной смеси.....	219
Приложение Е. Протокол испытаний ОГКПУ «УпрДорТранс».....	220

Приложение Ж. Результаты испытаний асфальтобетона через год после укладки	221
Приложение К. Протокол испытаний асфальтобетона через год эксплуатации ОГКПУ «УпрДорТранс»	223
Приложение Л. Протокол испытаний ГКУ Калужской области «Калугадорзаказчик»	224
Приложение М. Отзыв об испытаниях добавки от ТОО «CITIC Construction Co LTD» (Казахстан)	225
Приложение Н. Акт о внедрении результатов работы в ООО «CAPITAL ROAD CONSTRUCTION» (Узбекистан)	226

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Возрастающие требования к качеству и долговечности дорожного покрытия, важность решения задач, связанных с проблемами экологии и экономии энергоресурсов, диктуют необходимость разработки материалов, позволяющих снизить температуры приготовления и укладки асфальтобетонных смесей без потери качества асфальтобетона.

Одним из способов снижения температур приготовления и укладки асфальтобетонных смесей и получения асфальтобетона с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными показателями является применение органических добавок – синтетических и природных восков и парафинов. Воски снижают температуру приготовления асфальтобетонных смесей и улучшают деформационную стойкость асфальтобетона, но они способны снижать низкотемпературную устойчивость и трещиностойкость асфальтобетона. Также, до недавнего времени в России органические добавки были представлены исключительно импортными продуктами. В условиях необходимости импортозамещения, актуальным представляется использование новых отечественных добавок, обладающих преимуществами по сравнению с известными зарубежными аналогами.

Перспективным решением обозначенной проблемы является разработка комплексной полифункциональной добавки на основе синтетических восков, модифицированных пластификатором и поверхностно-активными веществами для усиления температуропонижающего эффекта, улучшения низкотемпературных свойств и адгезии вяжущего к каменным материалам.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках программы развития «Приоритет-2030».

Степень разработанности. Добавки на основе восков широко используются для получения теплых асфальтобетонных смесей зарубежной индустрией строительства дорог. Однако способность восков ухудшать низкотемпературные характеристики, а также недостаток исследований, посвященных применению

подобных добавок в составе отечественных марок асфальтобетонов, препятствует внедрению этих технологий в России. Недостаточно исследований, посвященных получению и применению комплексных модификаторов на основе синтетических восков, включающих компоненты, позволяющие нивелировать недостатки известных аналогов. Остаются открытыми вопросы о влиянии этих добавок на свойства битумного вяжущего, на качественные характеристики и долговечность асфальтобетона.

Цель работы. Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего производство теплых асфальтобетонных смесей с улучшенными характеристиками, посредством модифицирования битума полифункциональной добавкой, содержащей синтетические воски, катионные ПАВ и пластификатор на растительной основе.

Для достижения поставленной цели реализованы следующие задачи:

- обоснование и подбор рационального состава полифункциональной добавки для получения теплых асфальтобетонных смесей с улучшенными характеристиками и повышенным сроком службы асфальтобетона;
- исследование влияния разработанной добавки на физико-химические характеристики и реологию битумного вяжущего;
- разработка составов асфальтобетонов разных типов, содержащих битум, модифицированный полифункциональной добавкой;
- оценка влияния температуропонижающего эффекта полифункциональной добавки на технологические режимы приготовления и укладки асфальтобетонной смеси и физико-механические и эксплуатационные характеристики асфальтобетона;
- обоснование технико-экономической эффективности применения исследуемой добавки в составе асфальтобетонной смеси; разработка нормативной базы для внедрения результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна работы. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение по модифицированию битума полифункциональной добавкой на основе синтетических восков и его применению в рецептурах теплых

асфальтобетонных смесей для производства асфальтобетона с улучшенными характеристиками и повышенной долговечностью дорожного покрытия. Благодаря рациональному соотношению восков, пластификатора растительного происхождения и ПАВ, добавка изменяет структуру и свойства битумного вяжущего, что позволяет: снизить температуру приготовления и укладки уплотнения асфальтобетонных смесей без потери качества асфальтобетона; повысить устойчивость к пластическим деформациям, прочность и долговечность, а также улучшить устойчивость асфальтобетона к воздействию низких температур. В отличие от импортных аналогов, разработанная добавка не снижает трещиностойкость асфальтобетона.

Обоснован механизм влияния компонентов полифункциональной добавки на структуру и характеристики модифицированного битумного вяжущего. При введении добавки в битумное вяжущее, содержащиеся в ней воски понижают вязкость битумного вяжущего при высоких технологических температурах и повышают ее при температурах эксплуатации. Воски создают однородную связнодисперсную структуру, обеспечивающую расширение температурного интервала пластичности вяжущего, повышение когезионных свойств. Пластификатор на основе растительных масел обеспечивает сохранение пластичности вяжущего при низких температурах. ПАВ на основе амидов и имидазолинов улучшают адгезионные свойства битумного вяжущего и замедляют интенсивность его старения благодаря хемосорбционному взаимодействию с поверхностью минерального заполнителя.

Выявлены взаимосвязи между составом полифункциональной добавки и физико-химическими свойствами модифицированного битумного вяжущего, а также между концентрацией добавки в составе асфальтобетонной смеси и физико-механическими и эксплуатационными показателями теплого асфальтобетона. Это позволило подобрать рациональные рецептурно-технологические параметры получения добавки, разработать составы асфальтобетона с улучшенными характеристиками.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические сведения о механизме воздействия добавок, представляющих собой многокомпонентные системы на основе восков, модифицированных пластификаторами и ПАВ, на структуру и свойства битумного вяжущего и асфальтобетона, позволившие обосновать снижение температуры приготовления и уплотнения асфальтобетонной смеси, замедление интенсивности старения, повышение физико-механических и эксплуатационных характеристик асфальтобетона.

Предложен состав и технология производства многокомпонентной органической добавки в качестве модификатора асфальтобетонной смеси.

Подобраны составы асфальтобетонных смесей типа **Б** (в соответствии с ГОСТ 9128-2013) и типа **А16Вн теплая** (ГОСТ Р 58406.2-2020) с пониженными на 25°C температурами приготовления и уплотнения с улучшенными показателями: типа **Б** с пределом прочности (R0; R20 и R50): 8,2 МПа, 4,5 МПа и 1,6 МПа соответственно; водостойкостью при длительном водонасыщении – 0,86; трещиностойкостью 3,8 МПа; типа **А16Вн теплая** с разрушающей нагрузкой и деформацией по Маршаллу – 15040 Н и 2,2 мм соответственно; водостойкостью – 0,94; глубиной колеи 2,3 мм после 20 тысяч проходов нагруженного колеса, увеличенным расчетным сроком службы покрытия в 2,2 раза.

Разработан состав литого асфальтобетона типа **ЛА16Вн(ПТ)** (ГОСТ 54401-2020) с пониженной на 30°C температурой приготовления и укладки и повышенной устойчивостью к пластическим деформациям, обладающий следующими физико-механическими показателями: содержанием воздушных пустот 0,54%, глубиной вдавливания штампа – 2,45 мм и увеличением глубины вдавливания штампа через 30 минут – 0,35 мм.

Методология и методы исследования. В качестве основополагающей методологической базы использовались результаты трудов учёных в области дорожно-строительного материаловедения. Качественные показатели битумных вяжущих определялись в соответствии с ГОСТ 11508, ГОСТ 12801 и ГОСТ 33133. Структура модифицированного вяжущего исследовалась при помощи микроскопа

поляризационного ПЛМ-2 с цифровой камерой МС-8.3С. Моделирование старения битумного вяжущего проводилось по ГОСТ 18180, 33140; 70243, Р 58400.5. Механизмы термоокислительного старения и адгезии вяжущего изучались методом ИК-спектроскопии. Свойства асфальтобетона типа Б определялись по ГОСТ 12801; асфальтобетона типа А16Вн – по ГОСТ Р 58406.2; литого асфальтобетона – по ГОСТ 54400. Оценка устойчивости асфальтобетона типа А16Вн к образованию колеи выполнялась методом прокатывания нагруженного колеса по ГОСТ Р 58406.3.

Положения, выносимые на защиту:

– технологическое решение по модифицированию битума полифункциональной добавкой на основе синтетических восков и его применению в рецептурах теплых асфальтобетонных смесей для производства асфальтобетона с улучшенными характеристиками и повышения долговечности дорожного покрытия;

– механизм влияния компонентов полифункциональной добавки на структуру и характеристики модифицированного битумного вяжущего;

– взаимосвязь между составом полифункциональной добавки и ее концентрацией с физико-химическими свойствами модифицированного битума, а также физико-механическими и эксплуатационными показателями теплого асфальтобетона;

– состав и технология получения полифункциональной добавки на основе синтетических восков, модифицированных катионными ПАВ и пластификатором на растительной основе;

– составы и результаты исследований физико-механических характеристик и долговечности теплого асфальтобетона с применением полифункциональной добавки на основе синтетических восков;

– результаты апробации.

Достоверность полученных результатов. Обеспечена применением материалов, соответствующих актуальной нормативной документации, поверенных измерительных приборов и аттестованного оборудования, а также сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Оценка свойств модифицированных битумных вяжущих, а также асфальтобетонов производилась на основе стандартизированных методов, одобренных в Российской Федерации и за рубежом. Результаты не противоречат общепринятой теории и работам других исследователей.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационного исследования представлялись на конференциях: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова в 2022 и 2023 году; XV Международный молодежный форум (Белгород – 2023); VI Международная научно-практическая конференция «Сибирские дороги – 2024» (Иркутск); Семинар по обмену опытом «Проблемы и перспективы региональной автомобильной отрасли» в рамках конференции молодых учёных БГТУ им. В.Г. Шухова совместно с ДонНАСА, (Белгород – 2024); Центрально-Азиатская международная конференция «Дороги будущего» (Астана – 2024), XI Республиканская конференция «Научно-технические достижения студентов, аспирантов, молодых ученых строительно-архитектурной отрасли» (Макеевка – 2025).

Внедрение результатов исследований. Для обеспечения нормативной базы внедрения результатов исследований разработаны документы: стандарт организации СТО «Полифункциональная добавка для битума и асфальтобетона Вискодор ПВ-2. Технические условия»; Технологический регламент производства полифункциональной добавки для битума и асфальтобетона Вискодор ПВ-2.

Апробация технологии получения асфальтобетона с использованием добавки Вискодор ПВ-2 проведена в ООО «Автодорстрой-Подрядчик» при изготовлении асфальтобетонной смеси А16Вн и укладке на участке а/д в мкр. «Шишино-84» ул. 70 лет Победы км 0+30 по км 0+230; в ООО «ДСУ-Инж-Строй» при производстве ЩМА-16 на АБЗ-1 п. Мстихино; в ТОО «СITIC Construction Co LTD» (Казахстан) при производстве асфальтобетонных смесей для реконструкции автомобильной дороги на участке а/д Центр Юг Астана-Караганда-Балхаш-Алматы км 1666-1713; в ООО «CAPITAL ROAD CONSTRUCTION» (Узбекистан) при производстве ПЩМА-20.

Результаты работы применяются в учебном процессе в рамках образовательных программ для подготовки бакалавров по направлению 08.03.01 – «Строительство», магистров по направлению 08.04.01 – «Строительство», а также специалистов по направлению 08.05.02 – «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей».

Публикации. Ключевые положения диссертации представлены в 12 публикациях, в том числе 4 – в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад. Проведено теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение целесообразности использования многокомпонентной добавки на основе синтетических восков в составе теплых и литых АБС. Выполнен комплекс основных исследований с анализом полученных данных. Проведена апробация результатов работы.

Объём и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и приложений. Содержит 228 страниц машинописного текста, включающего 49 рисунков и фотографий, 57 таблиц, библиографический список из 210 наименований, 11 приложений.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1 Проблемы, обусловленные высокой температурой приготовления асфальтобетонных смесей. Теплые асфальтобетоны как способ их минимизации

Наиболее востребованным материалом для дорожного строительства является асфальтобетон. Широкое применение асфальтобетона для строительства дорог объясняется такими преимуществами, как: умеренная стоимость, высокие прочностные свойства, продолжительный срок службы, простота укладки, быстрый набор прочности, устойчивость к низким температурам, возможность проведения ямочного ремонта без блокировки движения [1 – 4].

Асфальтобетонная смесь состоит из минеральной части и битумного вяжущего и традиционно приготавливается при высоких температурах, от 150 до 170°C. Такую смесь обозначают термином «горячая асфальтобетонная смесь» (ГАС). Высокие температуры необходимы для высушивания минеральных заполнителей, которые составляют примерно 95% массы смеси, и снижения вязкости битумного связующего, для обеспечения необходимой подвижности и удобоукладываемости смеси [5 – 10]. Для повышения устойчивости к нагрузкам при приготовлении асфальтобетонных смесей зачастую применяют полимерно-битумные вяжущие, а в целях экономии используют переработанный асфальтобетон. В этих случаях, как показывают многочисленные исследования [11 – 15], значительно увеличивается вязкость и снижается подвижность асфальтобетонной смеси, что снижает ее удобоукладываемость и требует ещё более высоких температур нагрева.

Высокая температура при производстве горячих асфальтобетонных смесей приводит к ряду экологических, экономических и технологических проблем. Приготовление и укладка горячего асфальтобетона является одним из самых энергоёмких процессов в дорожном строительстве, так как при этом потребляется большое количество энергии и топлива [16, 17]. Поэтому в целях снижения затрат

и экономии энергоресурсов перспективным решением является применение технологий, позволяющих снизить температуру приготовления асфальтобетонных смесей. Наиболее энергоемким является производство такой разновидности горячих асфальтобетонных смесей, как литые асфальтобетоны (температура приготовления может достигать 210-240°C) [18, 19]. В этом случае применение эффективных температуропонижающих технологий является особенно актуальной задачей [20].

Высокая температура приготовления асфальтобетона приводит также к негативному влиянию на экологию окружающей среды. Так, при производстве асфальтобетонных смесей выделяются высокомолекулярные углеводороды, оксиды серы, азота и углерода, ароматические углеводороды, бензапирен, смолистые вещества, формальдегиды, сажа и другие вредные выбросы [21, 22]

Высокая температура приготовления асфальтобетонной смеси может вызывать термоокислительное старение битумного вяжущего в процессе длительного нагрева. В этом случае битум претерпевает значительные изменения структуры и группового состава: повышается количество смолисто-асфальтеновых и уменьшается количество масляных компонентов, что ведет к снижению пластичности вяжущего и уменьшению срока службы дорожного покрытия [23]

Укладку традиционного горячего асфальтобетона допустимо производить при температуре смеси 120 °C и выше. Несоблюдение режима укладки приводит к температурной сегрегации асфальтобетонной смеси и, как следствие, к образованию дефектов дорожного покрытия [24]. Необходимость высоких температур укладки горячих асфальтобетонов также вызывает ряд технологических проблем. Так, укладка традиционных горячих асфальтобетонных смесей при низких температурах окружающей среды может привести к недостаточной степени уплотнения покрытия из-за быстрого остывания уложенного слоя, а также наблюдается низкая степень сцепления между слоями. Согласно СП 78.13330.2012 укладка таких асфальтобетонных смесей допустима весной и летом при температуре не ниже 5°C, а осенью – не ниже 10°C. В связи с этим продолжительность сезона дорожных работ в некоторых регионах России

может составлять менее 3-4 месяцев [25]. Высокая скорость охлаждения асфальтобетонной смеси может вызывать температурные напряжения в слое асфальтобетона, что приведет к трещинообразованию [26]. В связи с этим для укладки асфальтобетона в зимнее время могут использоваться холодные асфальтобетонные смеси с применением так называемых жидких битумов, содержащих в своем составе разжижители, которые после укладки таких смесей испаряются, а смесь набирает прочность. Но недостаток такой технологии – в низких прочностных качествах покрытия и в существенном количестве вредных испарений в окружающую среду [27].

Важно учесть и скорость остывания горячих асфальтобетонных смесей во время транспортировки. Наблюдения, проведенные с помощью тепловизора [28], доказывают наличие температурной сегрегации в асфальтобетонной смеси во время транспортировки, в результате которой верхние слои остывают значительно быстрее, в результате чего образуется так называемая «корка». Температурная сегрегация повышается с увеличением дальности транспортировки и снижением температуры окружающей среды, что будет приводить к неравномерности уплотнения дорожного покрытия. Это ограничивает возможности укладки асфальтобетонного покрытия в отдаленных районах, поскольку асфальтобетонные производства в своем большинстве находятся в региональных центрах. Так, для горячих асфальтобетонных смесей при скорости самосвала в 60 км/ч дальность транспортировки составляет не более 160 км [29].

В настоящее время в индустрии дорожного строительства с целью решения изложенных выше экологических, экономических и технических проблем все более широко внедряются технологии теплых асфальтобетонов (ТАБ) [30 – 35].

Понятие «теплые асфальтобетонные смеси» охватывает множество технологий, позволяющих производить, транспортировать, укладывать и уплотнять асфальтобетон при температурах более низких, чем предусмотрено для традиционных горячих асфальтобетонных смесей [30]. Снижение температур приготовления теплых асфальтобетонных смесей (ТАС) по сравнению с

традиционными горячими асфальтобетонными смесями может составлять 20 – 40 С° [31-33].

В позиционном документе Европейской ассоциации асфальтобетонных покрытий ЕАРА об использовании теплых асфальтобетонных смесей [34], указывается, что первые теплые асфальтобетонные смеси были применены в конце 1990-х годов. Однако, технология приготовления теплых асфальтобетонов была хорошо знакома еще с 60-х годов прошлого века. Более того, с 1984 по 1998 год в Российской Федерации действовал ГОСТ 9128-84 на асфальтобетонные смеси, в которой упоминались теплые асфальтобетонные смеси, «приготавливаемые с использованием как вязких, так и жидких битумов, и применяемые непосредственно после приготовления с температурой не ниже 70°С» [35]. Но теплый асфальтобетон в его прежнем понимании приготавливали на битумах пониженной вязкости (с пенетрацией не ниже 130 ед.). Такой асфальтобетон после уплотнения и охлаждения смеси не набирал достаточной прочности, его дальнейшее формирование с доуплотнением транспортными средствами, происходило в течение нескольких недель. Такой асфальтобетон не был устойчив к воздействию пластических деформаций. Указанные недостатки послужили причиной того, что впоследствии от таких смесей отказались [32].

Новый виток развития технологии ТАБ получили в связи с развитием понимания в мировом сообществе о необходимости заботы об экологической безопасности. Так, в декабре 1997 года был принят Киотский протокол, который обязывает ратифицировавшие его страны минимизировать выбросы парниковых газов [36]. Применение технологий ТАБ позволяет снижать количество испарений и способствует выполнению задач, поставленных Киотским протоколом.

Первые испытания укладки дорожного покрытия с применением ТАБ были проведены в Германии и Норвегии в период с 1995 по 1999 год. Первое внедрение теплого асфальтобетона в США и Канаде было проведено в 2004 и 2005 годах соответственно [37]. В России первые опыты по укладке тёплого асфальтобетона по технологии вспененного битума произвели 2012 г. на трассе Р-120 «Орёл — Брянск — Смоленск — граница с Белоруссией». А в мае 2012 года АО

«Татавтодор» была применена температуропонижающая добавка Evoterm J1 при производстве теплой асфальтобетонной смеси для ремонта автодороги «Южный подход к г. Арску» [38]. В настоящее время, в России, как и во всем мире, применение теплых асфальтобетонов увеличивается. Указом президента РФ от 19.04.2017 г. №176 была утверждена Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года. В рамках Стратегии обращено внимание на внедрение инновационных экологических технологий, которой в том числе является и технология ТАБ [39].

Применение теплых асфальтобетонных смесей позволяет при уменьшении температур приготовления и укладки сохранять прочностные и эксплуатационные характеристики дорожного покрытия на уровне горячих асфальтобетонов [5, 40]. Кроме того, теплые асфальтобетонные смеси, в сравнении с горячими смесями, обладают целым рядом преимуществ таких как:

- экономия энергоресурсов;
- снижение выбросов загрязняющих веществ;
- улучшение условий труда рабочих при производстве и при укладке;
- менее интенсивное старение битумного вяжущего;
- возможность укладки смеси при пониженных температурах;
- увеличение дальности транспортировки асфальтобетонной смеси;
- улучшение удобоукладываемости смеси и возможность производства асфальтобетонной смеси с более высоким содержанием переработанного асфальтобетона [6, 41, 42].

Неоспоримым преимуществом применения ТАБ является экономия энергоресурсов. В исследовании [43] было определено, что при снижении температуры приготовления асфальтобетонной смеси со 180 до 140°C расход дизельного топлива уменьшился на 1,5 литра на тонну. А опыт производства теплых асфальтобетонов на предприятии «АБЗ-1» доказывает, что снижение технологической температуры приготовления асфальтобетонной смеси на 20 – 30 °С позволяет экономить 22% газа, используемого в качестве топлива [44, 45].

Значительным преимуществом, связанным с производством ТАБ, является и сокращение выбросов парниковых газов, что доказывают многочисленные исследования [7, 37, 44, 46 – 48]. Так, исследования Транспортной Ассоциации Канады показывают, что при производстве ТАБ выбросы парниковых газов сокращаются пропорционально экономии энергии, которая составляет от 25% до 50% [34]. Согласно данным исследования [46], выделение паров уменьшается примерно наполовину при снижении температуры приготовления смеси на каждые 10 °С. Экологичность технологии ТАБ подтверждает и исследование, проведенное специалистами ФБУ «Центр лабораторного анализа и технических измерений по Сибирскому федеральному округу» [7]. Согласно полученным данным, при производстве теплой асфальтобетонной смеси выбросы загрязняющих веществ значительно сократились: диоксида серы – на 68%, оксида азота – на 30% и сажи – на 58%. Опыт применения теплых асфальтобетонных смесей компанией «АБЗ-1» [44] при строительстве автомагистралей в Москве, Санкт-Петербурге, Орловской, Новосибирской, Калужской и Иркутской областях показал, что при использовании ТАБ по сравнению с традиционным асфальтобетоном, концентрация выброса парниковых газов снижается на 50-80%. Экспериментальные исследования [47] вредных выбросов, получаемых при производстве асфальтобетонных смесей с использованием асфальтогранулята выявили, что применение температуропонижающих добавок позволяет минимизировать повышение количества вредных выбросов, вызываемых введением асфальтогранулята. Технологии ТАБ обеспечивают также и более комфортные условия труда, поскольку рабочие испытывают более низкие температуры, выделяется меньше вредных для здоровья испарений [36].

Способности ТАБ обеспечивать большие расстояния перевозки и более продолжительный сезон укладки облегчается за счет пониженной скорости охлаждения материала из-за низкого температурного градиента между температурой смеси и температурой окружающей среды, а также из-за большей подвижности смеси при более низких температурах. Остывание теплой асфальтобетонной смеси происходит медленнее, что позволяет увеличить

расстояние транспортировки и производить укладку в холодное время года при температуре до -5°C и ниже, расширяя сезон дорожных работ [49, 50]. При исследовании [26] темпов охлаждения уложенных слоев горячей и теплой асфальтобетонной смеси было выявлено, что температурные напряжения, возникающие в слое теплого асфальтобетона, в 1,8 раз ниже напряжений, возникающих в горячем асфальтобетоне, что позволит повысить трещиностойкость дорожного покрытия. Кроме того, более низкие температуры приготовления ТАБ позволяют снизить температурное старение битума, что доказывают многочисленные исследования [51 – 53]. Это позволит повысить долговечность дорожного покрытия.

Существует три основных метода производства ТАБ:

- технологии вспенивания битума;
- использование поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые улучшают удобоукладываемость за счет снижения трения между вяжущим веществом и заполнителем;
- применение органических добавок, содержащих воски и (или) парафины, которые действуют за счет изменения вязкости битумного вяжущего [54].

Помимо этих основных методов производства теплых асфальтобетонных смесей, возможно также применение комбинированных технологий, сочетающих в себе различные методы [55].

1.2 Основные способы приготовления теплых асфальтобетонных смесей, их преимущества и недостатки

1.2.1 Технологии вспенивания битума

Принцип вспенивания основан на временном превращении состояния вяжущего вещества из жидкости в пену. В объеме битума возникают микроскопические пузырьки, наполненные паром, в результате чего происходит снижение эффективной вязкости битума, что, в свою очередь, улучшает процесс перемешивания при более низких температурах [46].

Получение теплых асфальтобетонов вспениванием битума разделяют на два метода:

- прямое вспенивание при помощи механического впрыскивания воды;
- введение минеральных добавок [33].

Прямой метод вспенивания заключается во впрыске в горячий битум через сопло небольшого количества воды. Так, по методу, описанному в изобретении [56], получение вспененного битума осуществляют способом распыления воды при помощи пневмо-водно-воздушных форсунок в камере асфальтобетонной мешалки в битум до момента соприкосновения с минеральным наполнителем.

При методе непрямого вспенивания в качестве источника воды используют минеральные материалы. Обычно применяются цеолитсодержащие добавки. Цеолиты представляют собой полигидраты алюмосиликатов, содержащие около 20 процентов кристаллизационной воды, которая выделяется при нагреве до температуры выше 100 °С [54].

Популярность технологии вспенивания обусловлена экономической выгодой и простотой применения. Можно отметить, что 80% теплых смесей в США, являющимися лидером по применению ТАБ, производится при помощи механического вспенивания [57]. Преимуществом методов вспенивания является то, что в данной технологии не требуется изменение существующей рецептуры смеси. К тому же «вспенивающие» технологии по праву считаются наиболее экономически эффективными, так как в качестве добавки к битуму выступает вода, которая является доступной и недорогой.

Недостатками данной технологии являются:

- высокие первоначальные затраты на переоборудование АБЗ;
- необходимость сложного технологического контроля производства, ограничение нижнего значения температурного режима работ из-за вероятности конденсации водяного пара и риска попадания остаточной влаги в уложенный асфальтобетон, что может привести к разрушению дорожного покрытия [58].

1.2.2 Температуропонижающие поверхностно-активные добавки

В России распространенным способом снижения температур приготовления и укладки асфальтобетонных смесей является введение химических добавок – поверхностно-активных веществ (ПАВ). По принципу действия такие добавки можно разделить на разжижающие, повышающие подвижность асфальтобетонной смеси за счет снижения вязкости связующего, и на не влияющие значительно на вязкость, работа которых базируется на увеличении скорости ориентации молекул ПАВ и вяжущего при меньшей скорости сдвига [59].

Большая часть таких добавок для теплых асфальтобетонных смесей представляют собой катионные ПАВ аминного типа: алкилдиамины, являющиеся продуктами реакции алкиламинов с акрилонитрилом, ациламидами и алкилимидазолины, образующиеся при взаимодействии полиэтиленполиаминов и карбоновых кислот [60]. Хорошо известными на отечественном рынке химических добавок для производства теплых асфальтобетонных смесей являются: Адгезол 3-ТД (ООО «Базис»), Азол 1007 (Котласский хим. завод), Сесабаз RT 945, Сесабаз RT Bio (Arkema), ДАД-ТА и ДАД-ТА2 (ООО «Селена»), Дорос-Т (ООО «Дорос»), Амдор ТС-1 (ООО «Уралхимпласт-Амдор»), Evotherm J1 (MeadWestvaco INC), Rediset LQ (AkzoNobel) [59]. Эффективность этих добавок довольно широко изучена [61 - 67]. Так, в работе [61] было отмечено, что введение добавок Азол 1007 и Адгезол-3ТД в концентрации 1,2% и Evotherm J1 в концентрации 0,4% позволяет снизить температуру приготовления на 30% (до 120-130°C), в отличие от нормативного значения 155-170°C. В исследованиях [62 – 64, 68] было выявлено, что введение добавок ДАД-ТА и ДАД-ТА2 позволяет снизить температуру приготовления и укладки асфальтобетонной смеси на 35-40°C, без ухудшения эксплуатационных показателей. Данные работ [65, 66, 69] позволяют утверждать, что добавки Сесабаз RT 945, Evotherm J1 и Warmmix L снижают вязкость битума и повышают уплотняемость асфальтобетонных смесей. Исследование [70] показывает, что щебеночно-мастичные смеси на ПБВ с использованием добавок Rediset и Evotherm улучшает уплотняемость смеси. На уплотнение при помощи

гиратора смесей с указанными добавками требовалась затратить энергии меньше на 35 и 22% соответственно в сравнении со смесью без добавок.

Применение ПАВ в качестве температуропонижающих добавок обладает рядом преимуществ по сравнению с другими технологиями ТАБ. Так, добавки ПАВ одновременно с эффектом снижения температур приготовления и укладки выступают как промоутер адгезии вяжущего к минеральному заполнителю, что подтверждено данными испытаний [60, 71-73].

Использование химических добавок не требует переоборудования АБЗ. Температуропонижающие ПАВ вводятся посредством уже имеющихся дозаторов для ввода обычных адгезионных добавок [74]. Концентрация введения ПАВ обычно невысокая – от 0,2 до 0,5% от массы битума, что позволяет снизить температуру приготовления смеси до 125-135°C, а температуру укладки – до 90-110°C [75].

Немаловажным является и способность катионных ПАВ, применяемых для теплых асфальтобетонов, способствовать замедлению старения битумного вяжущего, что доказано исследованиями [51, 53, 59,] Обусловлено это тем, что аминные ПАВ адсорбируются на лиофобных участках поверхности асфальтенов и блокируют коагуляционные процессы, стабилизируя состав вяжущего [60].

Между тем, применение ПАВ в качестве температуропонижающих добавок имеет и свои недостатки. Снижение вязкости битума приводит к некоторому снижению прочности асфальтобетона и его устойчивости к колееобразованию, что при превышении дозировки добавки может привести к негативному влиянию на качество дорожного покрытия. Так, в работе [61], было отмечено, что применение в качестве температуропонижающих добавок Азол 1007, Адгезол-3ТД и Evotherm J1 привело к падению сдвигоустойчивости, а также к снижению пределов прочности при сжатии при 50°C асфальтобетонных образцов, что может ухудшить эксплуатационную надежность в летний период. При сравнительной оценке характеристик горячего асфальтобетона и аналогичного по составу теплого асфальтобетона с применением добавки Rediset, была обнаружена более низкая колееустойчивость последнего [76].

1.2.3 Органические температуропонижающие добавки

Перспективным направлением получения теплых асфальтобетонных смесей является применение органических добавок – природных и синтетических восков [77, 78]. За рубежом технология введения органических добавок получила широкое применение для получения теплых асфальтобетонных смесей, о чем свидетельствует большое количество литературных источников, посвященных изучению данного вопроса [79 - 83]. В качестве температуропонижающих добавок по этой технологии выступают воски (парафины, синтетические и природные воски, амиды жирных кислот) с температурой плавления 80 – 145°C, способные изменять реологические свойства битумного вяжущего.

Термин «воск» в нефтяной промышленности обычно относится к парафинам с температурой плавления выше 25°C, содержащимся в нефтепродуктах. Такие нефтяные воски состоят из алканов с низкой молекулярной массой. Они способны формировать в битуме кристаллы, что ведет к охрупчиванию битума, снижению его трещиностойкости и усталостной устойчивости [84].

Воски, применяемые в качестве модификаторов битумного вяжущего, существенно отличаются как по своему химическому происхождению, так и по основным свойствам от нефтяных парафинов, содержащихся в битуме и способных негативно влиять на качество асфальтобетонной смеси [75].

Цель применения таких добавок – понизить вязкость при высоких технологических температурах и улучшить механические характеристики вяжущего в области умеренных эксплуатационных температур. Принцип работы органических температуропонижающих добавок основан на снижении вязкости модифицированного ими битумного вяжущего при температурах выше температуры плавления этих восков. При охлаждении асфальтобетонной смеси воски кристаллизуются, образуя в вяжущем дополнительную структурную сетку или выполняя роль тонкодисперсного наполнителя [85]. В результате этого вязкость битума при температуре эксплуатации дорожного покрытия значительно повышается. Таким образом, при подборе органической добавки важно учитывать,

что температура плавления воска не должна быть ниже температуры эксплуатации смеси.

В настоящее время в теплых асфальтобетонах применяют следующие виды органических добавок для уменьшения вязкости: воски Фишера-Тропша, функциональные окисленные полиэтиленовые воски, амиды жирных кислот и воск Монтана [86, 87].

Воск Фишера-Тропша представляет собой продукт синтеза углеводородов и других алифатических соединений из газов. Хотя воск плавится при температуре около 100°C в чистом виде, при смешении с битумом его температура плавления понижается до 80-85°C, что позволяет использовать его при температуре 100°C. Температура, при которой воск плавится, находится в прямой зависимости от длины углеродной цепи (C45 или более). Количество добавляемого воска обычно составляет 2 – 4% от общей массы. Снижение температуры, по некоторым данным, достигаемое добавлением этих восков, составляет 20 – 30°C. [88].

Одними из восков Фишера-Тропша являются Sasobit и Viscobit. Добавка Sasobit представляет собой высокомолекулярный воск, с длиной цепи 40-115 атомов углерода. Температура плавления от 114 до 120 °C [89]. Производится фирмой «SasolWax» (Южная Африка). При температуре выше 120 °C эта добавка полностью растворяется в битуме, а при понижении температуры образует в вяжущем кристаллообразную сетчатую структуру.

Viscobit производится фирмой Innospec Leuna GmbH, (Германия). Это низковязкий полиэтиленовый воск Фишера-Тропша с высокой термостабильностью и температурой каплепадения 108-114°C. [90].

Изучению восков Фишера-Тропша в качестве добавок для теплого асфальтобетона посвящено большое количество исследований как зарубежных [82, 91 – 95], так и отечественных ученых [96 – 100]. Так, G. Zhao [91] исследовал образцы горячего (без добавки) и теплого (с добавкой Sasobit) асфальтобетона при температуре приготовления соответственно 175°C и 145°C. Исследователь обнаружил, что разница в содержании пустот в горячей и теплой асфальтобетонных смесях незначительна, и, таким образом, добавка Sasobit может

снизить температуру уплотнения смеси примерно на 30°C. Индийские исследователи [94, 95] выявили, что использование Sasobit снижает температуру производства асфальтобетонной смеси на 40°C, что позволяет сократить расход топлива на 25%. Работа польских ученых [93] и экспериментальные данные [101], полученные Рудненским индустриальным университетом (Казахстан) показывают, что использование добавки Sasobit не только улучшает подвижность асфальтобетонной смеси, но также повышает температуру размягчения битумного вяжущего и снижает его пенетрацию при 25°C, что обеспечивает устойчивость к пластическим деформациям.

К функциональным окисленным полиэтиленовым воскам относится модификатор Honeywell Titan 7686, производимый фирмой «Honeywell» (США). Это окисленный полиэтиленовый воск с молекулярной массой 5000 – 15000 и температурой плавления 115 – 140 °C [18]. По данным исследований [98, 99, 102], использование указанной добавки в качестве модификатора увеличивает адгезию битумного вяжущего к каменному материалу и структурирует битум, что позволит улучшить устойчивость дорожного покрытия к колееобразованию.

Амидные воски представляют собой синтетические амиды жирных кислот. Эти воски плавятся при температуре 140 - 145°C и затвердевают при 130-135°C. По мере того, как амиды жирных кислот охлаждаются, они образуют кристаллическую решетку в битуме, тем самым повышая стабильность асфальтобетона и сопротивление деформации. Представителями амидных восков являются добавки Licomont BS-100 (производится фирмой «Clariant» (Швейцария) и Palmowax (производится фирмой «Emmerich», Германия). Они являются амидными восками, получаемыми в результате химической реакции алифатических аминов с жирными кислотами. Температура плавления около 140°C. Рекомендуемая дозировка – 0,2 – 4,5% [103].

Согласно опыту исследований [104], введение в состав вязких нефтяных дорожных битумов 2,0-3,0% добавки «Licomont BS-100» обеспечивает снижение их вязкости при высоких технологических температурах (120-180 °C) и ее существенный рост при снижении температуры ниже (110-120 °C), по сравнению с

исходным битумом. Исследование [102] выявило, что введение добавки Palmowax, хотя и незначительно изменяет вязкость при температурах 160 и 110°C, но при этом улучшает уплотняемость асфальтобетонной смеси, что позволяет использовать её как добавку для теплого асфальтобетона.

Воск Монтана – это лигнитовый воск. В химическом отношении воск Монтана состоит в основном из сложных эфиров жирных кислот. Поскольку температура плавления этого воска в чистом виде составляет приблизительно 75°C, его часто смешивают с материалами, имеющими более высокую температуру плавления, такими, как амидные воски [86]. Представителем данного вида является Asphaltan – воск, получаемый путем экстракции бензолом из бурого угля с высоким содержанием озокерита. Температура плавления 110-140°C. Производится фирмой «RomontaGmbH» (Германия).

Помимо органических добавок, состоящих исключительно из восков, перспективным является применение комплексных добавок, сочетающих в себе температуропонижающие добавки разного типа действия. Так в работе [82] было обнаружено положительное влияние на уплотняемость и прочностные свойства асфальтобетонной смеси совместного использования цеолита и воска Sasobit. Хорошую эффективность показывает и комплексная добавка Rediset WMX на основе синтетического воска и катионного ПАВ, производимая компанией «AkzoNobel» (Нидерланды) [105]. Данная добавка с температурой плавления около 104°C, кроме температуропонижающего эффекта, также повышает адгезию битумного вяжущего к минеральному заполнителю и снижает водонасыщение асфальтобетона. Работа [102] показала, что эта добавка также, как и Palmowax, незначительно влияет на реологические свойства битумного вяжущего, но улучшает уплотняемость асфальтобетонной смеси.

Органические добавки на основе восков имеют свои преимущества и недостатки в сравнении с другими добавками и технологиями ТАБ.

Так, в качестве преимуществ можно назвать:

- повышение устойчивости к воздействию высоких температур и нагрузок, что снижает колеяемость дорожного покрытия;

- улучшение адгезии;
- замедление процесса старения битумного вяжущего [106].

Но органические добавки могут снижать трещиностойкость при низких температурах, что отмечается в результатах некоторых исследований [82, 83]. Поэтому следует тщательно подходить к выбору модифицирующей органической добавки и её концентрации в асфальтобетонной смеси.

До недавнего времени на российском рынке восковые добавки были представлены исключительно дорогостоящей импортной продукцией. В современных условиях возникла острая необходимость в импортзамещении в данной сфере. С этой целью научно-производственной компанией «Селена» совместно с кафедрой автомобильных и железных дорог им. А. М. Гридчина Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова был разработан вариант такой добавки – модификатор «Вискодор ПВ-2» [107 – 113], который может стать доступной и экономичной заменой импортным восковым добавкам.

1.3 Эффективность добавок для теплых асфальтобетонных смесей

1.3.1 Влияние температуропонижающих добавок на физико-химические показатели битумного вяжущего

Для оценки эффективности применяемых температуропонижающих добавок для асфальтобетона, необходимо учесть их влияние на структуру и качественные характеристики битумного вяжущего как основного структурообразующего компонента асфальтобетона.

К показателям, характеризующим поведение вяжущего в условиях эксплуатации асфальтобетона, относятся температура размягчения, температура хрупкости, глубина проникания иглы, растяжимость битума. Показателем, отражающим технологические характеристики, является динамическая вязкость.

Важным является оценка адгезионных свойств битумного вяжущего, модифицированного добавками, к минеральному заполнителю. Недостаточное

сцепление между компонентами асфальтобетонных смесей приводит к отслаиванию битума от поверхности минерального заполнителя под воздействием воды, и, вследствие этого, к преждевременному разрушению дорожного покрытия.

В работе [24] было оценено влияние на свойства битумного вяжущего таких добавок, как Sekabase RT 945, Rediset WMX, Evotherm J1, Адгезол 3-ТД. По результатам исследований сделаны выводы, что исследуемые добавки, кроме Rediset WMX, увеличивают глубину проникания иглы при 25°C и 0°C, делая битум менее вязким. Добавка Адгезол 3-ТД незначительно увеличила температуру хрупкости. Все остальные испытанные авторами добавки понижают температуру хрупкости, делая битум более стойким к воздействию низких температур.

Результаты исследования влияния поверхностно-активных катионных добавок Evotherm, ДАД-ГА и амфолитной добавки ДАД-ГА2 в концентрациях от 0,4 до 1,0 % на свойства битумного вяжущего [72] показали, что применение указанных добавок ведет к увеличению глубины проникания иглы и растяжимости. Динамика изменения этих показателей коррелирует с повышением концентрации ПАВ. При этом, данные добавки практически не влияют на температуру размягчения. Также авторами было отмечено что указанные добавки повышают адгезию битумного вяжущего к минеральному заполнителю. При изучении влияния добавки ДАД-ГА на показатели битума, подвергнувшегося прогреву в тонком слое [51], выявлено снижение интенсивности процессов старения модифицированного вяжущего, в сравнении с исходным битумом, что позволит увеличить сроки службы дорожного покрытия.

Авторы работ [65, 114] исследовали влияние катионных поверхностно-активных добавок Sekabase RT 945, Evotherm J1 и Warmmix L на изменение динамической вязкости битума БНД 60/90 при введении их в различных дозировках. Из полученных результатов сделан вывод, что с увеличением концентрации добавок в битуме его динамическая вязкость снижается. При этом снижение динамической вязкости при введении добавок наблюдается во всем диапазоне исследуемых температур от 50 до 160°C. Менее всего уменьшала вязкость добавка Sekabase RT 945. Показатель пенетрации при использовании

указанных добавок снижается, а температура размягчения повышается, что может объясняться наличием в добавках полимерных составляющих. Отмечено [65], что добавки Sekabase RT 945 и Evotherm J1 повышают адгезионные свойства вяжущего.

Таким образом, можно констатировать, что общим при введении катионных ПАВ является снижение динамической вязкости битума, повышение адгезионных свойств и ингибирующее действие на процессы термоокислительного старения вяжущего. При этом влияние на показатели глубины проникания иглы, температуру размягчения и температуру хрупкости различно и зависит от состава ПАВ.

При проведении сравнительной оценки влияния органических энергосберегающих добавок Licomont BS 100, Sasobit, Sarawax на свойства битума БНД 90/130 [104], было выявлено, что их применение приводит к структурированию исходного битума, что выражается в снижении пенетрации и дуктильности при 25°C и увеличении температуры размягчения вяжущего. Наибольшее увеличение температуры размягчения наблюдается у битумного вяжущего при использовании амидного воска Licomont BS 100, что объясняется высокой температурой плавления этой добавки (~ 140°C). Несмотря на снижение пенетрации, исследуемые добавки не увеличивали температуру хрупкости, что можно отнести к их преимуществам. Авторами было отмечено, что исследуемые добавки оказывают ингибирующее воздействие на процессы старения вяжущего. Наблюдаемое увеличение адгезионных свойств вяжущего, модифицированного добавками Licomont BS-100 и Sasobit, было незначительным, в то время как добавка Sarawax в концентрации 3% увеличивала показатель сцепления со стеклом по методу ДСТУ Б.В.2.7-81 на 58,4%.

По результатам исследования динамической вязкости, определенной при помощи ротационного вискозиметра, авторами [104] был сделан вывод, что при эксплуатационных температурах вяжущие с органическими добавками являются более структурированными. В области технологических температур для всех

модифицированных вяжущих наблюдалось падение вязкости ниже значений, характерных для исходного битума.

Авторы работы [115], исходя из результатов проведенных испытаний, утверждают, что при модифицировании вяжущего амидными восками, такими как Licomont BS-100, большое влияние на физико-химические свойства вяжущего оказывают время и продолжительность приготовления вяжущего. Чем больше температура и продолжительность перемешивания, тем меньше пенетрация и растяжимость модифицированного вяжущего.

Исследованиями модифицированных восками битумов методом ультрафиолетовой спектроскопии [116] установлено химическое взаимодействие между молекулами воска и компонентами битума с образованием пространственных структур, в результате чего наблюдается повышение температуры размягчения, снижение пенетрации и увеличение вязкости битума при температурах ниже температуры плавления воска.

В работе [117] проведена оценка пенетрации при 25 и при 0°C, температуры размягчения и растяжимости нефтяного дорожного битума БНД 60/90, модифицированного добавкой Honeywell Titan 7686 в концентрациях 1, 1,5 и 2% от массы битума. Результаты исследования выявили зависимости уменьшения глубины проникания иглы, снижения растяжимости и повышения температуры размягчения при увеличении концентрации добавки, что свидетельствует о повышении структурированности вяжущего при введении данного воска. При оценке адгезии битума, модифицированного 1 и 3% Honeywell Titan 7686, по ГОСТ 12801-98 было выявлено, что данная добавка значительно повышает адгезию вяжущего, а испытание показателей вяжущего после прогрева согласно ГОСТ 18180 позволяет утверждать, что она ингибирует процессы термоокислительного старения [98].

Работы зарубежных исследователей [92, 118 - 121], показывают, что восковая температуропонижающая добавка Sasobit, при введении в количестве 2 – 3% уменьшает вязкость при температурах приготовления битума, увеличивает вязкость при температурах эксплуатации дорожного покрытия, снижает

пенетрацию битума при 25°C, значительно увеличивает температуру размягчения битума и тем самым расширяет интервал его пластичности, повышает устойчивость вяжущего к старению, улучшает его адгезионные свойства.

1.3.2 Влияние добавок на свойства асфальтобетонной смеси

Основным параметром, характеризующим технологичность теплого асфальтобетона, является способность достигать необходимой плотности в процессе уплотнения. Исследованию процессов уплотнения асфальтобетонных смесей посвящены работы И. В. Королева [122, 123], где он предложил методику оценки уплотняемости асфальтобетонной смеси методом уплотнения образцов под действием гидравлического пресса, а в качестве критерия использовать оптимальный коэффициент пористости, вычисляемый как отношение фактической средней плотности образца асфальтобетона к его максимальной теоретической плотности. Автором была установлена зависимость уплотняемости асфальтобетонной смеси от температуры [122], а также отмечено улучшение уплотняемости при введении поверхностно-активных добавок [123]. Позднее, закономерности и методы оценки уплотнения асфальтобетонных смесей, модифицированных температуропонижающими добавками, исследовались В. Б. Пермяковым [124, 125], В. Д. Белицким [126] и другими учеными.

На данный момент существуют различные методы уплотнения асфальтобетонных смесей при исследовании в лабораторных условиях. Часто для моделирования процесса уплотнения асфальтобетонных смесей применяют методику уплотнения образцов с применением прибора вращательного (гиратационного) уплотнения, которое достигается за счет усилия сдвига при вращательной и вертикальной результирующей силы. В работах [59, 62, 127] уплотняемость асфальтобетонных смесей исследовалась на гираторе CRT-GYR фирмы Соорег. Прибор фиксирует количество вращений (оборотов), необходимых для достижения заданной плотности асфальтобетона. Данные, полученные в результате проведенных испытаний [59] уплотнения асфальтобетонных смесей с применением поверхностно-активных температуропонижающих добавок Адгезол

3-ТД, ДАД-ТА, ДАД-ТА2, Азол 1007, Дорос-Т, Амдор ТС-1, Cecabase RT 945, Evotherm, Rediset LQ, показали, что все эти добавки значительно улучшают уплотняемость асфальтобетона, что выражается в снижении количества оборотов вращательного уплотнителя по сравнению со смесью без температуропонижающих добавок при одинаковой температуре уплотнения. О температуропонижающем эффекте авторы [59] судили по сравнительной оценке числа оборотов гиратора для достижения заданной плотности горячей асфальтобетонной смеси без добавок и теплых асфальтобетонных смесей с добавками, уплотняемых при температуре на 40°C ниже. Было выявлено, что смеси с добавками ДАД-ТА, Cecabase RT 945, Evotherm, Rediset LQ имели практически такую же, и даже несколько лучшую уплотняемость при температуре 110°C, что и исходная горячая асфальтобетонная смесь без добавок при температуре 150°C, это позволит избежать недоуплотнения при укладке асфальтобетонной смеси при пониженной температуре укладки. Некоторые из исследуемых добавок показали меньшую уплотняемость смеси по сравнению с уплотняемостью исходной горячей смеси при 150°C, следовательно, качество укладки дорожного покрытия в условиях понижения температур в таких случаях будет несколько падать. В работах [62, 128, 129] контрольная асфальтобетонная смесь без добавки уплотнялась при температуре 155-160°C, в то время как смесь с исследуемыми добавками Evotherm и ДАД-ТА уплотнялась при 120°C. Число оборотов гиратора для смеси с добавкой оказалось значительно меньше, несмотря на снижение температуры уплотнения, что свидетельствует о лучшей уплотняемости теплой асфальтобетонной смеси даже при меньшей температуре укладки. Уплотняемость смеси является наиболее важным оценочным параметром, так как главная проблема, которая возникает во время укладки асфальтобетонных смесей – это недоуплотнение из-за слишком ускоренного остывания смеси.

В работе [70] для оценки уплотняемости асфальтобетонных смесей автор использовал значения средней плотности, полученной после уплотнения при температуре 100°C на гираторе-компакторе после 100 оборотов. Исследование показало, что использование добавки Rediset WMX (1,5% от массы ПБВ в смеси)

увеличило среднюю плотность асфальтобетона на 1,3%, добавки Evoterm J1 (0,5% от ПБВ) – на 1,0 %, в то же время использование добавок Warmmix L (0,5% от ПБВ) снизило плотность на 1,0 %. Использование Sasobit при расходе 2,0% от массы ПБВ снизило плотность на 1,3%, что свидетельствует о том, что при данной температуре последние две добавки будут неэффективны и потребуется более высокая температура укладки.

Автор работы [91] исследовал образцы горячего асфальтобетона без добавки и теплого асфальтобетона с восковой добавкой Sasobit при температурах уплотнения 165°C для горячей смеси и 135°C для теплой. Исследователь обнаружил, что разница в объемной плотности образцов невелика, и таким образом добавление воска Sasobit позволяло снизить температуру укладки на 30°C.

Авторами работы [65] проведено сопоставление эффекта от использования энергоэффективных добавок зарубежного и российского производства по уплотняемости щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси с измененными параметрами уплотнения образцов: нагрузку на образец снизили с 16 до 10 тонн, а время уплотнения с 3 до 1,5 минут, температура формования составляла 80°C. Установлено, что при введении исследуемых температуропонижающих добавок в количестве 1-2% от массы вяжущего наблюдался выраженный технологический эффект улучшения уплотняемости.

Авторами работы [66] для оценки эффективности применения температуропонижающих добавок в асфальтобетонных смесях была разработана методика оценки уплотняемости. Для выявления влияния введенных добавок на уплотняемость были приняты следующие параметры: нагрузка на образец – 4 тонны, время уплотнения – 1,5 минуты. Исследуемые добавки (Warmmix L и Sekabase RT 945) вводились в смесь в концентрациях 0,5; 1,0; 2,0 и 3,0% от массы битумного вяжущего. Коэффициент уплотняемости определяли, как отношение средней плотности битумного вяжущего с добавкой при данной температуре уплотнения к средней плотности битума без добавок при температуре уплотнения 140°C.

Были выявлены оптимальные концентрации исследуемых добавок, позволяющие достичь коэффициента уплотняемости больше 1 (т.е. улучшающих уплотняемость) при температурах 60 – 140 °С.

По этой же методике, но при снижении нагрузки до 3 тонн, а времени уплотнения до 1 минуты при температурах уплотнения 50°С и 140°С в работе [102] были проведены испытания смесей с полимерными добавками, в том числе восковыми добавками Honeywell Titan 7686, Rediset WMX, Palmowax. Из полученных результатов видно, что все три восковых добавки улучшают уплотняемость асфальтобетонной смеси.

Для оценки технологичности использования температуропонижающей добавки необходимо тщательное всестороннее исследование и таких качественных показателей асфальтобетонной смеси, как предел прочности при сжатии, водонасыщение, стойкость к воздействию влаги (водостойкость), стойкость к накоплению пластических деформаций, так как по опыту исследований некоторые энергосберегающие добавки могут негативно влиять на эти показатели.

Так, при анализе результатов, полученных в работах [61, 63, 64, 67, 69] установлено, что при введении добавок на основе поверхностно-активных веществ, прочность при сжатии несколько снижается. При исследовании [67] добавок Азол-1007 и Evotherm авторы выявили, что показатели предела прочности при сжатии образцов с Evotherm снизились довольно значительно. При 20°С изменения составили 29%, при 50°С – 55%, что, в свою очередь, отразилось и на сцеплении при сдвиге ЩМА. Это может вызвать проблемы при эксплуатации дороги в летний период в условиях повышенных температур. Согласно результатам исследования показатель предела прочности для второй добавки – Азол 1007 также снизился, но менее значительно. В то же время, при использовании восковых добавок, таких как Sasobit, Honeywell Titan 7686, Rediset WMX, Palmowax в работах [64, 69], было выявлено, что показатель предела прочности остается без изменений, как, например, для Sasobit в исследовании [64] или даже несколько увеличивается, как при использовании Honeywell Titan 7686, Rediset WMX, Palmowax в работе [69].

Показатель водонасыщения асфальтобетона формируется на основе его способности к заполнению пор и трещин жидкостью и характеризует его пористость или недостаточное уплотнение. Анализируя результаты, полученные в исследованиях [24,59, 61, 64, 69, 70, 72, 129], можно обратить внимание, на то, что эффект влияния добавки на показатель водонасыщения зависит как от природы добавки, так и от концентрации её введения в асфальтобетон. Так, добавки на основе поверхностно-активных веществ, такие как ДАД-ТА [59], ДАД-ТА2 [72], Evoterm J1[61, 67] и др. при введении в определенных концентрациях, снижают показатель водонасыщения, при других концентрациях могут давать обратный эффект, и показатель водонасыщения несколько увеличивается [24, 64, 72, 129]. В случаях применения добавок на основе восков, таких как Palmowax [102] и Sasobit [129], отмечалось некоторое увеличение водонасыщения. Следует заметить, что во всех приведенных работах водонасыщение не превышало требования ГОСТ 9128-2013. Применение модифицированного полиэтиленового воска Honeywell Titan 7686 и комплексной добавки Rediset WMX в концентрации 1,5% давало снижение водонасыщения при уплотнении при 50°С почти вдвое [69].

При определении водостойкости (устойчивости к воздействию влаги) в соответствии с ГОСТ Р 58401.18 – 2019 сравнивают образцы уплотненного асфальтобетона после водонасыщения, подвергнутые циклу «замораживания-оттаивания» с такими же образцами до водонасыщения по пределу прочности при сжатии. Коэффициент водостойкости вычисляют как отношение среднеарифметических пределов прочности образцов после водонасыщения и «замораживания-оттаивания» и образцов до водонасыщения. По результатам исследований [59, 61, 67, 70, 72] все испытываемые температуропонижающие добавки (Sekabase RT 945, Rediset WMX, Evotherm, ДАД-ТА, Азол 1007, Адгезол 3-ТД,) увеличивали коэффициент водостойкости по сравнению с исходной горячей асфальтобетонной смесью. Соответственно, применение таких теплых асфальтобетонов позволит получить дорожное покрытие более устойчивое к влиянию климатических колебаний.

Одной из наиболее актуальных проблем для дорожной отрасли является колееобразование на асфальтобетонных покрытиях. Колееобразование определяется как накопление незначительных по величине необратимых микродеформаций от многократного воздействия колесной нагрузки на покрытие из асфальтобетона [130]. Наибольшее распространение при лабораторной оценке сопротивляемости асфальтобетона к образованию колеи получили лабораторные методы, построенные на принципе прокатывающегося колеса [131]. Поскольку механизм действия большинства температуропонижающих добавок заключается в уменьшении вязкости вяжущего, то при использовании их в асфальтобетонах возникает опасность накопления пластических деформаций, повышения склонности дорожного покрытия к колееобразованию. Органические добавки в данном аспекте имеют преимущество, так как они уменьшают вязкость вяжущего при температурах приготовления и увеличивают вязкость при температурах эксплуатации дорожного полотна. В работах [76, 132], посвященных изучению влияния энергосберегающих добавок (Rediset WM, Sasobit), было выявлено, что глубина образования колеи у исходного горячего асфальтобетона выше, чем у теплого асфальтобетона с применением исследуемых добавок. Использование органических добавок не только не снижают, но и повышают стойкость асфальтобетона к пластическим деформациям. В исследовании [100] были протестированы свойства теплых асфальтобетонных смесей, приготовленных по следующим технологиям: вспенивания путем добавления воды; введения органической добавки Viscobit; введения химической добавки Амдор ТС-1.

По результатам испытаний было выявлено, что теплые асфальтобетонные смеси с применением органической добавки проявляли более высокую устойчивость к колееобразованию, чем смеси, полученные по технологиям вспенивания или применения химической добавки.

При оценке качества литых асфальтобетонных смесей, не требующих специального уплотнения, важными характеристиками являются высокая удобоукладываемость, низкое содержание воздушных пустот и небольшая глубина вдавливания штампа, как показатель устойчивости к статическим нагрузкам.

Поскольку литые асфальтобетонные смеси отличаются высоким содержанием вяжущего, для получения требуемых прочностных качеств на практике применяют высоковязкие марки дорожного битума или полимерномодифицированные вяжущие. Результаты испытаний литых асфальтобетонных смесей с применением ПБВ, опубликованные в работах [133 – 135], показывают, что присутствие полимера в составе значительно улучшает прочностные показатели и снижает глубину вдавливания штампа. Но при этом снижается удобоукладываемость смеси, что потребует увеличения количества вяжущего или температуры приготовления асфальтобетонной смеси.

Эффективным способом снижения стоимости литого асфальтобетона является применение асфальтового гранулята [136]. Но введение асфальтогранулята также снижает подвижность литой асфальтобетонной смеси.

Для улучшения удобоукладываемости смеси и для снижения температур приготовления и укладки литого асфальтобетона применяют добавки-дефлегматоры, которые повышают подвижность смеси, не снижая прочностных свойств [11]. В качестве таких добавок хорошо зарекомендовали себя импортные добавки на основе синтетических восков, такие как Sasobit, Licomont BS-100 и др. Так, исследования, проведенные на АБС-4 «Капотня» [17], показали, что введение добавки Sasobit в состав литой асфальтобетонной смеси позволяет снизить температуру её приготовления, уменьшить количество вяжущего, необходимое для обеспечения требуемой подвижности смеси и улучшить прочностные характеристики асфальтобетона.

В работах [10, 42], при совместном использовании в составе литой асфальтобетонной смеси асфальтового гранулята и воска Sasobit обнаружено улучшение показателей глубины вдавливания штампа и удобоукладываемости. Также применение добавки Sasobit позволило получить литые асфальтобетонные смеси с меньшим количеством вяжущего в составе, без ухудшения эксплуатационных показателей.

1.4 Обоснование выбора состава комплексной температуропонижающей добавки на основе синтетических восков

Основываясь на данных научно технической литературы [64, 76, 100, 130 – 132], можно утверждать, что модификаторы на основе синтетических восков при использовании в качестве добавок для теплых асфальтобетонов, снижают температуру приготовления и уплотнения смеси и снижают восприимчивость асфальтобетона к воздействиям температуры и нагрузок от транспортных средств. Введение их в состав литых асфальтобетонов одновременно улучшает такие эксплуатационные показатели смесей, как удобоукладываемость смеси и глубина вдавливания штампа [11, 96]. Применение их в качестве модификаторов асфальтобетонов является перспективным, так как позволяет существенно повысить эксплуатационные качества теплых и литых асфальтобетонов.

Но недостатки, которыми обладают добавки на основе синтетических восков, сдерживают распространение внедрения указанных добавок в технологии теплых асфальтобетонов в дорожной индустрии России, в условиях значительного колебания температур в течение смены времен года. Восковые модификаторы могут увеличивать вероятность усталости и низкотемпературного растрескивания при пониженных температурах [82, 83, 86, 107]. Также опыт некоторых исследований показывает недостаточную эффективность снижения температур укладки асфальтобетонных смесей при использовании органических добавок [104]. Кроме того, до недавнего времени на российском рынке органические добавки были представлены исключительно импортными дорогостоящими восками, поэтому актуальной является задача разработки отечественного модификатора на основе синтетических восков, обладающего преимуществами, но с минимизацией недостатков, присущих органическим добавкам. Таким образом, эффективная композиция для модификации битума должна обладать способностью:

- понижать вязкость вяжущего при температурах приготовления, тем самым повышая подвижность асфальтобетонных смесей;
- улучшать уплотняемость смеси при температурах укладки, (ниже, чем температура укладки горячих смесей);

- структурировать вяжущее при температурах эксплуатации, повышая прочностные качества и устойчивость к пластическим деформациям;
- не ухудшать низкотемпературные свойства битумного вяжущего.

По данным исследований [120], более высокой эффективности улучшения свойств битумного вяжущего и, соответственно, асфальтобетонной смеси можно добиться совместным использованием добавок на основе синтетических восков и пластификаторов. Также перспективной альтернативой может стать применение комплексных добавок, включающих в себя воски, пластификаторы и поверхностно-активные вещества. Так, хорошую эффективность показывает комплексная добавка Rediset WMX на основе синтетического воска и катионного ПАВ, которая, кроме температуропонижающего эффекта, также повышает адгезию битумного вяжущего к минеральному заполнителю и снижает водонасыщение асфальтобетона [105]. Работа [102] показала, что комплексная добавка незначительно влияет на реологические свойства битумного вяжущего, но улучшает уплотняемость асфальтобетонной смеси.

В патенте [137] разработана битумная композиция, свойства которой улучшены совместным использованием оптимально подобранной смеси восков. Авторы утверждают, что данная восковая смесь улучшает технологические свойства битума и асфальтобетонной смеси, и не оказывает значительного влияния на низкотемпературные свойства вяжущего. Таким образом, перспективным является подбор оптимального соотношения разных типов восков. Так, наибольшую температуру плавления имеют амидные воски, представляющие продукт реакции алифатических диаминов и предельных жирных кислот. Битумы на основе амидных восков повышают жесткость дорожного покрытия при высоких рабочих температурах за счет высокой температуры плавления воска – 140-147 °С [86, 104, 115, 138]. Вторичный полиэтиленовый воск с температурой плавления 110-115 °С, позволяет снизить стоимость восковой смеси [139].

Для повышения температуропонижающего эффекта перспективным может быть и применение пластификаторов. Так, в работах [140 – 142] описан опыт получения теплых асфальтобетонных смесей совместным использованием

полимерного модификатора в качестве структурирующей добавки и битума, вязкость которого была понижена дизельным топливом. Дизельное топливо выступает в роли разжижителя, который впоследствии испаряясь, способствует набору прочности асфальтобетона. Недостатком применения данного вида пластификатора можно назвать загрязнение окружающей среды вредными веществами.

При подборе пластифицирующих компонентов добавки для теплого асфальтобетона важно, чтобы они эффективно снижали вязкость при технологических температурах приготовления асфальтобетонной смеси и ее укладки, но при этом незначительно влияли на вязкость при температурах эксплуатации битума. Также пластификатор не должен значительно снижать температуру вспышки битумного вяжущего, так как это может повлиять на безопасность работы на АБЗ. Особое внимание стоит также обратить на летучесть пластификатора, так как большое количество летучих компонентов в битуме будет определять высокую скорость их испарения при прогреве, что является показателем склонности битумного вяжущего к старению. Также предпочтительным качеством модификатора представляется его экологичность: минимизация вредного влияния на окружающую среду и возможность использования возобновляемого сырья. В качестве такого сырья могут выступать пластификаторы растительного происхождения. Ученые США и Китая [143 – 145] предлагают использование растительных масел в качестве регенератора состаренного асфальтобетона. Исследования [145] показывают, что введение пластификаторов на основе растительных масел в битумное вяжущее позволяет снизить вязкость битума при низких температурах и значительно повысить его трещиностойкость, эффективнее нефтяных пластификаторов. В исследовании [146] применение пластификаторов на основе компонентов растительных масел и лесохимических продуктов позволили снизить температуру уплотнения асфальтобетонной смеси более значительно, чем масло-мягчитель нефтяного происхождения. В работе [147] изучено влияние пластификаторов различной природы на свойства битумного вяжущего, такие, как динамическая вязкость при

температурах 30°C и 60°C, изменение температуры вспышки битумного вяжущего и потеря массы после прогрева. В качестве пластификаторов изучен ряд ароматических углеводородов разветвленного строения, продукты переработки моторного масла, тяжелый нефтяной экстракт, экстракт остаточной селективной очистки нефтяных масел, масло талловое, жирные кислоты таллового масла, а также метиловые эфиры жирных кислот подсолнечного масла. Наименьшее влияние на увеличение массы при прогреве оказали экстракт селективной очистки нефтяных масел и метиловый эфир подсолнечного масла марки А. Также именно эти пластифицирующие компоненты менее всего снижали температуру вспышки битума в открытом тигле. При этом метиловый эфир подсолнечного масла более чем экстракт селективной очистки снижал динамическую вязкость вяжущего при 60°C, и при этом значительно меньше снижал вязкость при 30°C. Таким образом метиловый эфир подсолнечного масла марки А показал себя как наиболее эффективный пластификатор для модификации битумного вяжущего. На основании вышеизложенных критериев, в качестве пластифицирующего компонента для температуропонижающей добавки был выбран пластифицирующий препарат Унипласт-3 на основе модифицированных растительных масел.

Как показывают исследования [104, 148], органические добавки повышают адгезионные свойства битумного вяжущего к минеральному заполнителю, но степень сцепления в случае применения органических добавок недостаточно высокая. В качестве промолтера адгезии, согласно испытаниям [65, 72, 114, 149] хорошие результаты показывают катионные ПАВ на основе аминов, амидов и имидазолинов, которые одновременно являются и температуропонижающими, что будет усиливать энергосберегающий эффект.

Исходя из теоретического обоснования компонентов для комплексной температуропонижающей добавки со структурирующим эффектом, сформулирована **рабочая гипотеза исследований**, которая заключается в реализации положения о возможности получения теплых асфальтобетонных смесей с улучшенными эксплуатационными характеристиками, за счет применения рационально подобранного состава комплексной добавки, включающей в себя

синтетические воски, поверхностно-активные вещества и пластифицирующие компоненты. В качестве компонентов добавки предложено использовать смесь вторичного полиэтиленового и амидных восков, пластификатор Унипласт-3 на основе модифицированных растительных масел, добавку ДАД-ТА в качестве промотора адгезии, представляющую собой катионное ПАВ на основе аминов, амидов и имидазолинов. Предполагается, что введение комплексной добавки позволит изменить реологическое поведение, улучшить адгезионные и низкотемпературные свойства вяжущего, что позволит снизить температуру приготовления и уплотнения асфальтобетонных смесей, увеличить их устойчивость к колееобразованию, замедлить интенсивность старения, а также улучшить показатели удобоукладываемости и глубины вдавливания штампа для литых асфальтобетонных смесей, приготовленных и уложенных при более низких температурах.

1.5 Выводы

1. Введение органических добавок в асфальтобетонные смеси является перспективным направлением получения теплых асфальтобетонных смесей, так как имеет ряд преимуществ. Они позволяют увеличить интервал пластичности вяжущего, снизить температуру приготовления и уплотнения асфальтобетонных смесей и улучшить прочностные характеристики асфальтобетона. Также применение восков повышает устойчивость дорожного покрытия к колееобразованию.

2. Недостатки использования восков заключаются в том, что их введение в асфальтобетонные смеси дает меньший, по сравнению с ПАВ, температуропонижающий эффект при укладке в результате увеличения вязкости при пониженных температурах, а также ухудшение низкотемпературных свойств.

3. Вероятно, что перспективным для решения проблемы устранения недостатков и сохранения преимуществ использования восков в асфальтобетонах могут стать новые комплексные добавки на основе синтетических восков, модифицированных ПАВ и пластификаторами, для усиления

температуропонижающего эффекта, улучшения низкотемпературных и адгезионных свойств.

4 До недавнего времени на российском рынке восковые добавки были представлены исключительно импортной продукцией. В современных условиях возникла острая необходимость в импортзамещении в данной сфере.

5. Выявление зависимостей изменения параметров качественных показателей битумного вяжущего и асфальтобетонных смесей от концентрации введения добавок на основе синтетических восков позволит подбирать оптимальные составы для производства качественных теплых асфальтобетонных смесей, обеспечивающих требуемую прочность и долговечность дорожных покрытий, а применение в качестве модификатора отечественного препарата позволит избежать необходимости приобретения импортных дорогостоящих модификаторов.

2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Характеристика применяемых материалов

2.1.1 Характеристика органических вяжущих

В качестве вяжущего в работе использованы битумы нефтяные дорожные вязкие производимые АО «Газпромнефть – Московский НПЗ» марок БНД 100/130 и БНД 70/100 по ГОСТ 33133-2014. Характеристики использованных в работе битумов представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Физико-химические характеристики исходных битумов БНД 70/100 и БНД 100/130

Показатель	Нормативные требования по ГОСТ 33133-2014		Фактические данные		Метод испытания
	Для БНД 70/100	для БНД 100/130	Для БНД 70/100	для БНД 100/130	
Глубина проникания иглы при 25°C, 0,1 мм	71-100	101-130	81	113	ГОСТ 33136
Глубина проникания иглы при 0°C, 0,1 мм	Не менее 21	Не менее 30	28	35	ГОСТ 33136
Растяжимость, при 25°C, см	Не менее 62	Не менее 70	130	Более 150	ГОСТ 33138
Растяжимость, при 0°C, см	Не менее 3,7	Не менее 4	3,7	4,5	ГОСТ 33138
Температура размягчения по кольцу и шару, °C	Не менее 47	Не менее 45	50	45	ГОСТ 33142
Температура хрупкости по Фраасу, °C	Не выше - 18	не выше -20	- 22	- 20,5	ГОСТ 33143

2.1.2 Органическая добавка Вискодор ПВ-2 и составляющие ее компоненты

Для приготовления добавки Вискодор ПВ-2 использовались следующие компоненты, производимые российской компанией ООО «Селена»: восковая смесь на основе амидного и полиэтиленового воска, адгезионная добавка для теплого асфальтобетона ДАД-ТА – ПАВ на основе амидов и имидазолинов, пластификатор Унипласт-3 на основе растительного сырья.

Физико-химические свойства восковой смеси, состоящей из вторичного полиэтиленового и амидного восков, представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Физико-химические свойства восковой смеси

Наименование показателя	Показатель	Метод испытаний
Внешний вид	Белый порошок	Визуально
Температура каплепадения, °С	140	ГОСТ 6793
Температура застывания, °С	129	ГОСТ 20287
Плотность, г/см ³	0,96	ГОСТ 15139

В качестве промолтера адгезии в составе была выбрана добавка ДАД-ТА, представляющая собой смесь поверхностно активных веществ на основе имидазолинов и амидоаминов, и способная одновременно повышать адгезионные свойства и снижать температуру приготовления асфальтобетонной смеси [51, 62], что позволяет дополнительно повысить энергосберегающий эффект комплексной добавки Вискодор ПВ-2. Характеристики адгезионной добавки на основе катионных поверхностно-активных веществ ДАД-ТА представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Характеристики адгезионной добавки ДАД-ТА

Наименование показателя	Показатель	Метод испытаний
Внешний вид	Темно-коричневая маслянистая жидкость	Визуально
Массовая доля воды и летучих веществ, % масс	0,2	ГОСТ 11812
Динамическая вязкость при 25°С, мПа*с	870	ГОСТ 1929
Сцепление битума, модифицированного 0,3% добавки, баллов	5	ГОСТ 58406.2

Препарат Унипласт-3 выбран в качестве компонента, как высокоэффективный пластификатор на основе растительного сырья. Он позволяет снижать вязкость битумного вяжущего в 1,5 – 2,0 раза эффективнее, чем традиционные пластификаторы на основе продуктов нефтепереработки [109]. Физико-химические свойства пластификатора Унипласт-3 представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Физико-химические свойства пластификатора Унипласт-3

Наименование показателя	Показатель	Метод испытаний
Внешний вид	Темно-коричневая маслянистая жидкость	Визуально
Динамическая вязкость при 25°C, мПа*с	870	ГОСТ 1929
Температура вспышки в закрытом тигле, °C	230	ГОСТ 9287

Физико-химические свойства приготовленной из вышеперечисленных компонентов комплексной добавки Вискодор ПВ-2 представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Физико-химические свойства препарата Вискодор ПВ-2

Наименование показателя	Показатель	Метод испытаний
Внешний вид	Микрогранулы бледно-желтоватого цвета	Визуально
Температура каплепадения, °C	137	ГОСТ 6793
Температура застывания, °C	128	ГОСТ 20287
Плотность, г/см ³	0,94	ГОСТ 15139

2.1.3 Органические импортные добавки

Для сравнительной оценки эффективности новой комплексной добавки Вискодор ПВ-2 в работе были использованы широко известные органические добавки на основе синтетических восков: Sasobit (пр-во «SasolWax» (Германия) и Licomont BS-100 (пр-во «Clariant» (Швейцария) [86].

Модификатор Sasobit является полиэтиленовым функционализированным воском, полученным методом газификации природного газа по технологии синтеза Фишера-Тропша. Это длинноцепочечный алифатический углеводород, длина молекулы которого варьируется в диапазоне 40 – 115 атомов углерода. Рекомендуемая производителями концентрация введения в битумное вяжущее – 2,0-3,0 % [83, 86, 88, 95]. Физико-химические свойства воска Sasobit представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Физико-химические свойства Sasobit

Наименование показателя	Показатель	Метод испытаний
Внешний вид	Округлые гранулы белого цвета	Визуально
Температура каплепадения, °С	110	ГОСТ 6793
Температура застывания, °С	105	ГОСТ 20287
Плотность, г/см ³	0,95	ГОСТ 15139

Амидный воск Licomont BS-100 является продуктом реакции алифатических диаминов с длинноцепочечными предельными жирными кислотами. В соответствии с литературными данными [86, 115], применение 2,0-3,0% указанной добавки в составе битумных вяжущих позволяет значительно увеличить интервал пластичности и таким образом улучшить устойчивость к колееобразованию. Физико-химические свойства воска Licomont BS-100 представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Физико-химические свойства Licomont BS-100

Наименование показателя	Показатель	Метод испытаний
Внешний вид	Порошок белого цвета	Визуально
Температура каплепадения, °С	141	ГОСТ 6793
Температура застывания, °С	135	ГОСТ 20287
Плотность, г/см ³	0,90	ГОСТ 15139

Воски Sasobit и Licomont BS-100 были выбраны для сравнения, как наиболее близкие комплексной добавке Вискодор ПВ-2 по составу и принципу действия, а также получившие наиболее широкое распространение в России и странах

ближнего зарубежья [86, 96, 104, 115]. Многочисленные испытания как зарубежных [91, 120, 121], так и отечественных [115, 116] исследователей выявили, что синтетические воски, такие как Sasobit и Licomont BS-100, снижают вязкость вяжущего при температурах выше точек плавления этих восков, обеспечивая энергосберегающий эффект при приготовлении и укладке и повышают вязкость вяжущего при охлаждении, образуя в вяжущем коллоидную сетчатую структуру, в результате чего повышается жесткость вяжущего, приводящая, в свою очередь, к улучшению устойчивости асфальтобетона к пластическим деформациям [112].

2.1.4 Характеристика минеральных материалов

Для приготовления асфальтобетонных смесей типа Б марки III по ГОСТ 9128-2013 использовался щебень гранитный фракции 5 – 20 мм. производства ОАО «Павловск Неруд», песок из отсеков дробления кварцитопесчаника фракции 0 – 10 мм производства АО «Лебединский ГОК», минеральный порошок МП-2 производства ООО «Воронежский завод минеральных порошков» [113].

Для приготовления литых асфальтобетонных смесей марки ЛА16Вн по ГОСТ Р 54401-2020, а также асфальтобетонных смесей марки А16Вн, по ГОСТ Р 58406.2-2020 использовались щебень фракций 8-16 мм и 4-8 мм производства ОАО «Павловск Неруд», песок дробленый фракции 0-4 мм производства ОАО «Павловск Неруд» и минеральный порошок МП-2 ООО «Центр-Известняк».

В таблице 2.8 представлен зерновой состав применяемого щебня гранитного фракции 5 – 20 мм, производства ОАО «Павловск Неруд», соответствующего требованиям ГОСТ 8267-93.

Таблица 2.8 – Зерновой состав применяемого гранитного щебня фр. 5-20 мм

Содержание зерен мельче данного размера (мм), в % по массе										
40	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
100,0	88,7	46,2	30,4	7,5	3,9	3,2	2,7	2,0	1,2	0,7

В таблице 2.9 представлены физико-механические характеристики применяемого в исследовании гранитного щебня фр. 5-20 мм.

Таблица 2.9 – Физико-механические характеристики гранитного щебня фр. 5-20

Наименование показателя	Требования ГОСТ 8267-93	Значение показателя
Насыпная плотность, кг/м ³	Не нормируется	1470
Содержание зерен лещадной и игловатой формы, %	Не более 10	4,1
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	Не более 1,0	0,3
Морозостойкость	Не ниже F50	F300
Марка по дробимости	Не ниже 1200	1400
Марка по истираемости	И1 – И3	И1

Зерновые составы минеральных материалов (щебня фракций 8-16 мм и 4-8 мм производства ОАО «Павловск Неруд», примененных для приготовления литых асфальтобетонных смесей ЛА16Вн по ГОСТ 54401-2020 и асфальтобетонных смесей А16Вн по ГОСТ Р 58406.2-2020, представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Зерновой состав щебня гранитного фр. 4-8 и 8-16 мм

№ п/п	Наименование материала	Содержание зерен мельче данного размера (мм), в % по массе								
		22,4	16,0	11,2	8,0	4,0	2,0	0,5	0,125	0,063
1	Щебень фр. 8-16 мм	100,0	94,5	41,0	23,5	1,2	0	0	0	0
2	Щебень фр. 4-8 мм	100,0	100,0	100,0	97,5	24,5	3,2	0	0	0

Физико-механические свойства гранитных щебеночных материалов производства ОАО «Павловск-Неруд», примененных для приготовления литых асфальтобетонных смесей ЛА16Вн а также асфальтобетонных смесей марки А16Вн, по ГОСТ Р 58406.2-2020, приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Физико-механические свойства гранитного щебня

№ п/п	Наименование показателя	Требования ГОСТ Р 58406.2-2020	Фактические значения, для фракций	
			8 – 16 мм	4 – 8 мм
1	Дробимость	Не ниже М800	М1400	М1400
2	Средневзвешенное содержание зерен пластинчатой и игловатой формы, %	До 20 включ.	8,1	8,2
3	Содержание пылевидных и глинистых частиц, % от массы	Не более 1,0	0,3	0,5
4	Морозостойкость, марка	Не ниже F50	F300	F300
5	Сопротивление дроблению и износу, марка	От И1 до И3 включ.	И1	И1

В качестве мелкого заполнителя для приготовления асфальтобетонных смесей типа Б марки III использовался песок из отсевов дробления кварцитопесчаника фракции 0 – 10 мм производства АО «Лебединский ГОК», зерновой состав которого приведен в таблице 2.12.

Таблица 2.12– Зерновой состав песка из отсевов дробления фр. 0 – 10 мм

Содержание зерен мельче данного размера (мм), в % по массе										
40	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
100,0	100,0	100,0	95,2	66,1	48,7	36,6	29,3	23,5	17,4	7,6

Физико-механические свойства песка из отсевов дробления кварцитопесчаника фракции 0 – 10 мм производства АО «Лебединский ГОК» представлены в таблице 2.13

Таблица 2.13 – Физико-механические характеристики песка из отсева дробления кварцитопесчаника фр. 0 – 10 мм

Наименование показателя	Требования ГОСТ 31424-2010	Значение показателя
Насыпная плотность, кг/м ³	не норм.	1591
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	не более 10,0	7,6
Марка по дробимости	не ниже 1000	1000
Марка по истираемости	И-1	И-1

В качестве мелкого заполнителя для приготовления литой асфальтобетонной смеси ЛА16Вн по ГОСТ 54401-2020, а также асфальтобетонных смесей марки А16Вн, по ГОСТ Р 58406.2-2020 использовался песок из отсева дробления гранита фракции 0 – 4 мм производства ОАО «Павловск Неруд», зерновой состав которого приведен в таблице 2.14.

Таблица 2.14 – Зерновой состав песка фр. 0-4 из отсева дробления гранита

Содержание зерен мельче данного размера (мм), в % по массе								
22,4	16,0	11,2	8,0	4,0	2,0	0,5	0,125	0,063
100,0	100,0	100,0	100,0	97,7	71,1	30,1	9,2	4,7

Физико-механические свойства песка из отсева дробления гранита фракции 0 – 4 мм производства ОАО «Павловск Неруд» представлены в таблице 2.15

Таблица 2.15 – Физико-механические характеристики песка из отсева дробления гранита фр. 0 – 4 мм

Наименование показателя	Требования ГОСТ 32730-2014	Значение показателя
Насыпная плотность, кг/м ³	Не норм.	1340
Содержание зерен крупнее 4 мм, %	Не более 3	0,8
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	Не более 10,0	0,3
Содержание глины в комках, % по массе	Отсутствие	0
Марка по дробимости	Не ниже 1000	1400
Марка по истираемости	И-1	И-1

Зерновой состав минерального порошка МП-2 производства ООО «Воронежский завод минеральных порошков» (ООО «ВЗМП»), примененного для приготовления асфальтобетонной смеси типа Б марки III марки по ГОСТ 9128-2013, представлен в таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Зерновой состав минерального порошка МП-2 ООО «ВЗМП»

Содержание зерен мельче данного размера (мм), в % по массе										
40	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	96,7	96,7	94,1	81,2	71,1

Физико-механические показатели минерального порошка МП-2 производства ООО «Воронежский завод минеральных порошков» приведены в таблице 2.17.

Таблица 2.17 – Физико-механические показатели минерального порошка МП-2 производства ООО «ВЗМП»

Наименование показателя	Требования ГОСТ Р 52129-2003	Значения показателя
Частиц мельче 1,25 мм, %	Не менее 95	96,7
Частиц мельче 0,315 мм, %	80-95	94,1
Частиц мельче 0,071 мм, %	Не менее 60	71,1
Пористость, %	не более 35	28,7
Набухание образцов из смеси порошка с битумом, % по объему	не более 2,5	1,1
Водостойкость образцов из смеси порошка с битумом, %	не норм.	0,87
Битумоемкость, г	не норм.	57,6
Влажность, %	не более 1,0	0,3

Зерновой состав минерального порошка МП-2 ООО «Центр-Известняк», использованного для приготовления для приготовления литой асфальтобетонной смеси типа ЛА16Вн по ГОСТ 54401-2020, а также асфальтобетонных смесей типа А16Вн, по ГОСТ Р 58406.2-2020 представлен в таблице 2.18.

Таблица 2.18 – Зерновой состав минерального порошка МП-2 производства ООО «Центр-Известняк»

Содержание зерен мельче данного размера, (мм) в % по массе								
22,4	16,0	11,2	8,0	4,0	2,0	0,5	0,125	0,063
100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	92,2	84,9

Физико-механические показатели минерального порошка МП-2 производства ООО «Центр-Известняк», приведены в таблице 2.19.

Таблица 2.19 – Физико-механические показатели минерального порошка МП-2 производства ООО «Центр-Известняк»

Наименование показателя	Требования ГОСТ Р 32761-2014	Значения показателя
Частиц мельче 2 мм, %	Не менее 100	100
Частиц мельче 0,125 мм, %	Не менее 85	89,2
Частиц мельче 0,063 мм, %	Не менее 70	78,2
Пористость, %	Не более 35	32,0
Битумоемкость, г	Не более 65	51,4
Набухание образцов из смеси порошка с битумом, % по объему	не более 2,5	2,3
Водостойкость образцов из смеси порошка с битумом, %	не норм.	0,90
Влажность, %	не более 1,0	0,3

2.2 Методы исследования

2.2.1 Методы исследования свойств модифицированного органическими добавками битумного вяжущего

Для изучения влияния органических добавок на свойства битума БНД 100/130 и БНД 70/100, исследуемые битумы были модифицированы различным содержанием добавок Licomont BS-100, Sasobit и Вискодор ПВ-2, при этом концентрации подбирались исходя из опыта предыдущих исследований и рекомендаций производителя, а также исходя из необходимости получения наиболее полных данных по влиянию добавок на битумное вяжущее [110 – 112].

Приготовление составов осуществлялось следующим образом: в емкость с разогретым до 150 °С битумом вводили расчетное количество добавки и при постоянной температуре производили перемешивание при помощи лабораторной мешалки со скоростью 100 об/мин в течение 1 часа [112].

Для оценки эффективности влияния вводимых добавок на основе синтетических восков на битумное вяжущее, проводили следующие испытания:

1. Определение глубины проникания иглы (пенетрации) битумных вяжущих. Этот показатель косвенно характеризует вязкость битума. В работе пенетрация определялась при температурах 25°С и 0°С по методике согласно ГОСТ 33136 на пенетрометре автоматическом Линтел ПН-20. Сущность метода заключается в измерении глубины, на которую погружается игла пенетromетра в испытуемый образец битума при заданной нагрузке и температуре за определенный промежуток времени, и выражается в единицах, соответствующих десятым долям миллиметра (0,1 мм).

2. Определение температуры размягчения по кольцу и шару. Битумы являются вязкоупругими веществами без точно определенной температуры плавления. При повышении температуры они постепенно становятся более мягкими и менее вязкими [27]. Температура размягчения битумов – условный показатель, характеризующий переход битумного вяжущего из твердого в вязко-

текущее состояние. Температура размягчения в работе определялась на приборе «кольцо и шар», по методике согласно ГОСТ 33142.

3. Определение растяжимости (дуктильности). Под растяжимостью или дуктильностью понимают способность битумного вяжущего вытягиваться в тонкую нить под влиянием приложенной к нему силы при заданных условиях (скорости растяжения, температуре). В работе дуктильность определялась по методике согласно ГОСТ 33138. Сущность метода заключается в определении максимальной длины, на которую битум, залитый в специальную форму, раздвигаемую с постоянной скоростью 5 см/мин при заданной температуре может растянуться без разрыва. Испытания проводились на дуктилометре автоматическом Линтел ДБ-20-150, оснащённом датчиками усилия, предназначенными для определения максимального усилия при растяжении, а также для автоматической фиксации разрыва образца. Измерения осуществлялись при температурах 0°C и 25°C. Заданная температура испытания поддерживалась при помощи термокриостата Линтел ТКС-20. Для оценки когезионных свойств битума во время испытания дуктильности было также проведено измерение максимального усилия при растяжении.

4. Определение температуры хрупкости по Фраасу. Температура хрупкости характеризует морозоустойчивость битумного вяжущего. Это температура, при которой битумное вяжущее способно разрушаться под действием кратковременной нагрузки.

Температура хрупкости определялась методом Фрааса, по методике согласно ГОСТ 33143. В работе измерение температуры хрупкости проводили на аппарате автоматическом для определения температуры хрупкости нефтебитумов Линтел АТХ-20.

6. Определение качества сцепления битумного вяжущего с минеральным материалом. Адгезия является важным свойством битумного вяжущего. Она характеризует прочность прилипания вяжущего к минеральным компонентам асфальтобетонной смеси. Адгезия вяжущего к минеральному материалу

оценивалась тремя методами – по ГОСТ 12801-98 п. 28 и по ГОСТ 11508-74, а также весовым методом [110].

Сущность оценки адгезии по методам ГОСТ 12801-98 п. 28 и ГОСТ 11508-74 заключается в визуальной оценке качества сцепления по степени сохранности пленки битумного вяжущего на зернах щебня или песка после его кипячения в дистиллированной воде.

Сущность весового метода оценки адгезии заключается измерении потери массы битума в процессе кипячения. Количественную характеристику определяли по формуле 1.1:

$$Sn = \frac{(m_2 - m_0) * 100}{(m_1 - m_0)}; \quad (1.1)$$

где: m_0 – масса минерального материала, г;

m_1 – масса навески битумоминеральной смеси до кипячения, г;

m_2 – масса навески битумоминеральной смеси после кипячения, г;

Sn – сцепление битума с минеральным материалом, %.

В качестве минерального материала применялся щебень с фракцией 8 – 16 мм и песок из отсевов дробления фракции 0 – 4 мм гранита ОАО «Павловск Неруд», которые использовались в дальнейшем для приготовления образцов асфальтобетонных смесей.

7. Динамическую вязкость битумного вяжущего определяли при помощи ротационного вискозиметра. Заданные температуры испытаний (110, 120, 135 и 165°C) поддерживалась при помощи термоячейки. Температуры испытаний выбирались исходя из целей исследования.

8. Моделирование старения вяжущего в тонком слое проводилось несколькими способами: методом прогрева в тонком слое по ГОСТ 18180-72 посредством термостатирования битумного вяжущего в чашках Петри в сушильном шкафу при температуре 163°C в течение 5, 7 и 9 часов [110, 111], методом RTFOT по ГОСТ 33140-2014, методом УСК (упрощенного

кратковременного старения) по ГОСТ 70243-2022 [150], а также методом долгосрочного старения в печи PAV по ГОСТ Р 58400.5-2019.

Старение битумного вяжущего по ГОСТ 33140-2014 производится под воздействием температуры 163° и специально нагнетаемого воздушного потока. Этот метод моделирует процесс старения вяжущего, происходящий при технологических операциях приготовления, хранения и транспортировки асфальтобетонной смеси – так называемое «технологическое старение». Рабочая камера печи RTFOT со стеклянными колбами, загруженными испытуемыми образцами, представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Рабочая камера печи RTFOT

Долгосрочное старение по методу PAV моделирует поведение битумного вяжущего в течение срока эксплуатации асфальтобетонного покрытия. Старение вяжущего происходит под воздействием повышенных температур и давления. Внешний вид устройства показан на рисунке 2.2.

9. Определение изменения качественного состава битумного

Метод упрощенного кратковременного старения УСК по ГОСТ 70243-2022 является альтернативным методу старения в печи RTFOT. Этот метод более прост в технологическом исполнении. Согласно этому методу, битумное вяжущее тонким слоем наносится на специальные металлические пластины, а затем выдерживается в сушильном шкафу при температуре 150°С в течение 50 минут.



Рисунок 2.2 – Внешний вид печи PAV

вяжущего в результате модифицирования добавками и в процессе термоокислительного старения при длительном прогреве, а также при взаимодействии с минеральным материалом проводилось методом



Рисунок 2.3 – ИК-спектрометр Vertex 70

инфракрасной спектроскопии (ИК-спектроскопии) на приборе Vertex 70 (рисунок 2.3) в среднем ИК диапазоне $4000-400\text{ см}^{-1}$ [110, 111]. Сущность метода ИК-спектроскопии заключается в исследовании спектров поглощения и отражения электромагнитного излучения в инфракрасном диапазоне.

10. Структура модифицированного вяжущего исследовалась при помощи микроскопа поляризационного проходящего и отраженного света ПЛМ-2 с цифровой камерой МС-8.3С. Сущность метода заключается в визуальном исследовании при помощи микроскопа образцов битумного вяжущего, нанесенного тонким слоем на предметное стекло.

11. Определение сдвиговой устойчивости при заданных температурах для оценки температурного диапазона эксплуатации битумного вяжущего проводилось с использованием динамического сдвигового реометра (DSR), представленного на рисунке 2.4 по методике, согласно ГОСТ Р 58400.6 – 2019. Сущность метода заключается в



Рисунок 2.4 – Сдвиговой реометр DSR

оценке сопротивляемости битумного вяжущего приложенной сдвиговой нагрузке.

12. Оценку низкотемпературной устойчивости битумного вяжущего посредством определения показателей жесткости и ползучести при отрицательных температурах производили при помощи реометра, изгибающего балочку (BBR), по методу, описанному в ГОСТ Р 58400.8 – 2019. Сущность метода заключается в измерении прогиба балочки из битумного вяжущего при низких температурах. Внешний вид прибора представлена на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Реометр, изгибающий балочку (BBR)

2.2.2 Методы исследования асфальтобетонных смесей

В работе влияние исследуемых добавок оценивалось посредством приготовления и тестирования свойств асфальтобетонной смеси типа Б марки III по ГОСТ 9128-2013, теплой асфальтобетонной смеси А16Вн по ГОСТ Р 70396-2022 и ГОСТ Р 58406.2-2020, а также литой асфальтобетонной смеси ЛА16Вн по ГОСТ 54400-2020.

В процессе подбора состава, асфальтобетонные смеси готовилась в специальном лабораторном смесителе, оборудованном устройством обогрева. Минеральные материалы в количествах, заданных по составу, отвешивали в емкость, нагревали при перемешивании до заданной температуры приготовления

смеси, добавляли разогретый в отдельной емкости битум и вновь нагревали при перемешивании до заданной температуры приготовления смеси.

Температура приготовления асфальтобетонной смеси типа Б марки III по ГОСТ 9128-2013, теплой асфальтобетонной смеси А16Вн по ГОСТ Р 70396-2022 и ГОСТ Р 58406.2-2020 составляла 160°C для смеси с исходным битумом и до 135°C для теплых асфальтобетонных смесей с исследуемыми добавками. Перемешивание осуществляли до достижения полного покрытия минеральных зерен битумным вяжущим.

Испытания свойств асфальтобетонной смеси типа Б марки III по ГОСТ 9128-2013 производились в соответствии с ГОСТ 12801-98:

1. Изготовление образцов по ГОСТ 12801-98. Образцы цилиндрической формы приготавливались на машине для прессования образцов из асфальтобетонных смесей ПО-500. Производилось уплотнение исходной асфальтобетонной смеси без добавок при температуре 135°C, асфальтобетонных смесей с добавками – при температуре 110°C до достижения заданной плотности.

2. Определение средней плотности образцов. Сущность метода заключается в определении средней плотности изготовленных образцов с учетом имеющихся в них пор посредством гидростатического взвешивания.

3. Определение прочности при сжатии. Сущность метода заключается в определении нагрузки, необходимой для разрушения образца. Испытание производилось на электромеханическом прессе ДТС-100 при температурах 50 ± 2 , 20 ± 2 и 0 ± 2 °C.

4. Определение водонасыщения. Сущность метода заключается в определении количества воды, поглощаемой образцом при заданном режиме насыщения. Для насыщения образцы погружались в воду при температуре (20 ± 2) °C, затем сосуд с образцами устанавливался в вакуумную установку, выдерживался при давлении не более 2000 Па (15 мм рт. ст.) в течение 1 ч, а затем давление доводилось до атмосферного и образцы выдерживались ещё 30 минут.

5. Определение сдвигоустойчивости.

Сущность метода заключается в определении максимальных разрушающих нагрузок и соответствующих предельных деформаций стандартных образцов при одноосном сжатии и при сжатии специальным обжимным устройством по схеме Маршалла (рисунок 2.6).

6. Определение водостойкости и водостойкости при длительном насыщении. Сущность метода заключается в оценке снижения прочности при сжатии испытуемых образцов асфальтобетона после воздействия на них воды в условиях вакуума с выдержкой в течение 1 часа и с выдержкой в течение 15 суток соответственно.

При оценке влияния исследуемых добавок на свойства асфальтобетонной смеси А16Вн по ГОСТ Р 70396-2022 и ГОСТ Р 58406.2-2020 применялись следующие методы испытаний:

1. Подготовка и уплотнение образцов асфальтобетонной смеси согласно ГОСТ Р 58406.9 – 2019. Уплотнение образцов исходной горячей асфальтобетонной смеси на битуме без добавок производили при температуре 135°C, а образцов теплых асфальтобетонных смесей с исследуемыми добавками при 110°C. Уплотнение производили в сборной форме для уплотнения посредством 50 ударов уплотнительного молота.

2. Определение максимальной плотности по ГОСТ Р 58401.16. Сущность метода заключается в определении плотности измельченной пробы асфальтобетонной смеси после удаления воздушных пустот, достигающегося путем вакуумирования пробы и воздействия вибрации.



Рисунок 2.6 – Определение сдвигоустойчивости при сжатии обжимным устройством по схеме Маршалла

3. Определение объемной плотности согласно ГОСТ Р 58401.10. Сущность метода заключается в определении объемной плотности образца путем взвешивания его на воздухе и в воде.

4. Определение пустот в минеральном заполнителе (ПМЗ) по ГОСТ 58406.10. Сущность метода заключается в определении общего количества пустот между зернами минерального заполнителя в уплотненной асфальтобетонной смеси, выраженное в процентах от объема.

5. Определение пустот, наполненных битумным вяжущим (ПНБ) по ГОСТ 58406.10. Сущность метода заключается в определении общего количества пустот, заполненных вяжущим, выраженное в процентах от объема пустот в минеральном заполнителе.

6. Определение коэффициента водостойкости по ГОСТ Р 58401.18. Сущность метода заключается в определении отношения предела прочности при непрямом растяжении образцов после воздействия воды и цикла «замораживания и оттаивания» к пределу прочности образцов, выдержанных на воздухе при температуре $22\pm 3^{\circ}\text{C}$.

7. Определение разрушающей нагрузки и деформации при нагружении на боковые поверхности асфальтобетонных образцов проводили по методу Маршалла по ГОСТ 58406.8.

8. Определение средней глубины колеи по ГОСТ Р 58406.3. Сущность метода заключается в прокатывании нагруженного колеса по испытываемому образцу асфальтобетона при заданной температуре и определении глубины колеи после 10000 циклов нагрузки или до достижения предельного значения.

При оценке эффективности применения исследуемых добавок в составе литой асфальтобетонной смеси применялись следующие методы испытаний:

1. Приготовление литых асфальтобетонных смесей марки ЛА16Вн на основе исходного и модифицированного исследуемыми добавками битума осуществлялось в лабораторном смесителе для асфальтобетонных смесей ЛС-АБ-10. Температура приготовления литой асфальтобетонной смеси ЛА16Вн по ГОСТ 54400-2020 составляла 220°C .

2. Образцы для испытаний изготавливались по ГОСТ Р 54400-2020 п. 10 методом заливки литой асфальтобетонной смеси в металлические формы-кубы.

3. Определение максимальной плотности проводилось в соответствии с ГОСТ Р 58401.16.

4. Определение объемной плотности испытуемых образцов проводилось по методике, согласно ГОСТ Р 58401.8.

5. Определение глубины вдавливания штампа производилось по ГОСТ Р 54400-2020 п. 11.4. Сущность метода заключается в определении величины деформации образца вследствие воздействия постоянной нагрузки. Испытания проводились при помощи прибора для определения глубины вдавливания штампа ПЛА-2, представленного на рисунке 2.7.

6. Определение удобоукладываемости смеси определялось в соответствии с ГОСТ Р 54400-2020 п. 11.9 и оценивалось по величине показателя осадки конуса, при этом каждая смесь была испытана при температурах 185, 200 и 215 °С для определения температуропонижающего эффекта исследуемых добавок. Сущность метода заключается в оценке изменения высоты отформованной в специальном конусе литой асфальтобетонной смеси при заданной температуре после снятия формы в течение 1 минуты.



Рисунок 2.7 – Прибор для определения глубины вдавливания штампа

2.3 Выводы

1. Для приготовления комплексной температуропонижающей добавки Вискодор ПВ-2 в качестве составляющих компонентов использовали смесь полиэтиленового и амидного восков, пластификатор на основе растительных компонентов Унипласт-3, адгезионную добавку ДАД-ТА. Для исследования влияния комплексной добавки на основе синтетических восков Вискодор ПВ-2 приготавливались модифицированные вяжущие на основе битумов вязких дорожных БНД 70/100 и БНД 100/130, а также асфальтобетонные смеси типа Б по ГОСТ 9128, теплой асфальтобетонной смеси А16Вн по ГОСТ Р 70396 и ГОСТ Р 58406.2, а также литой асфальтобетонной смеси ЛА16Вн по ГОСТ 54400. Подбор состава и изготовление асфальтобетонных образцов проводились в соответствии с требованиями ГОСТ для испытываемых асфальтобетонных смесей с использованием щебня требуемых фракций, минерального порошка МП-2, органических вяжущих БНД 70/100 и БНД 100/130. Для оценки эффективности исследуемой добавки было проведено сравнение ее влияния с воздействием на битумное вяжущее и асфальтобетоны известных импортных восков Licomont BS-100 и Sasobit.

2. Исследование характеристик модифицированных вяжущих и образцов асфальтобетонных смесей осуществлялось при помощи оборудования научно-технической инфраструктуры кафедры «Автомобильные и железные дороги имени А. М. Гридчина», Центра высоких технологий БГТУ имени В. Г. Шухова, ЦКП МАДИ, а также лаборатории ООО «Селена».

3. Достоверность результатов исследований и выводов, представленных в работе, была обеспечена использованием материалов, соответствующих действующим стандартам, а также поверенных средств измерений и аттестованного оборудования. Испытания проводились на современных установках с достаточным числом повторений для гарантии воспроизводимости результатов. Оценка характеристик модифицированных битумных вяжущих, а также асфальтобетонных смесей производилась на основе стандартизированных методик, признанных в Российской Федерации и за рубежом.

3 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДОБАВКИ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОСКОВ ВИСКОДОР ПВ-2 НА СВОЙСТВА БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО

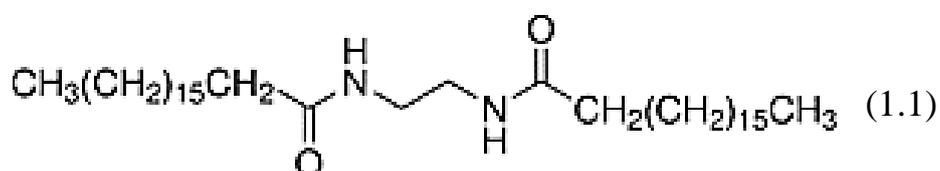
3.1 Теоретическое обоснование механизма действия компонентов полифункциональной добавки Вискодор ПВ-2

Согласно рабочей гипотезе, для решения технической проблемы получения теплых асфальтобетонной смеси с улучшенными эксплуатационными характеристиками, необходимо подобрать оптимальный состав полифункциональной добавки на основе синтетических восков, пластифицирующих компонентов и ПАВ. На основании этого сформирована основная концепция комплексной многофункциональной добавки Вискодор ПВ-2.

Для получения асфальтобетонной смеси с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками необходимо, чтобы комплексная добавка обеспечивала температуропонижающий эффект и одновременно обладала способностью расширять температурный интервал пластичности битумного вяжущего, повышала сцепление с минеральным материалом, замедляла интенсивность старения битумного вяжущего.

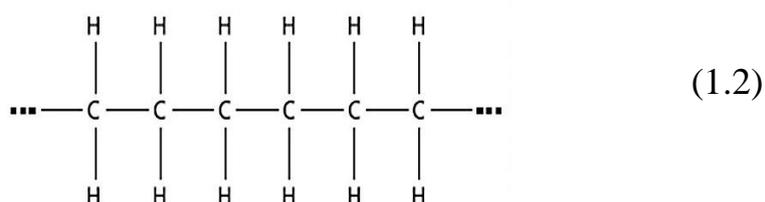
На основании вышеуказанных требований был подобран рациональный состав комплексной добавки Вискодор ПВ-2 на основе смеси синтетических восков, пластификатора и ПАВ.

В качестве основного компонента температуропонижающей добавки Вискодор ПВ-2 была использована смесь на основе амидного и вторичного полиэтиленового восков. Амидный воск представляет собой органическое соединение с формулой $(\text{CH}_2\text{NHC}(\text{O})\text{C}_{17}\text{H}_{35})_2$ (1.1).



Это продукт реакции диаминов и насыщенных жирных кислот, воскообразное белое твердое вещество. Амидный воск более значительно, чем другие виды восков повышает структурированность битумного вяжущего и устойчивость дорожного покрытия к пластическим деформациям за счет высокой температуры плавления этого воска - 140-147 °С [86], поэтому присутствие его в составе добавки будет способствовать эффективному повышению физико-механических и эксплуатационных свойств асфальтобетона.

Вторичный полиэтиленовый воск с температурой плавления 110-115 °С, входящий в состав добавки, позволяет снизить ее стоимость. Полиэтиленовый воск изготавливается из утилизируемого вторичного полиэтилена, и благодаря этому его использование одновременно решает несколько задач: утилизация небиоразлагаемых отходов, улучшение эксплуатационных свойств асфальтобетона, снижение стоимости затрачиваемых материалов. Формула полиэтиленового воска C_nH_{2n+2} , где $n=20-40$ (1.2).



Воски при температуре выше их плавления переходят в жидкое агрегатное состояние, снижая вязкость и повышая гомогенность битумного вяжущего, способствуя уменьшению температуры приготовления асфальтобетонной смеси. При снижении температуры воски переходят в твердое состояние, за счет чего повышается вязкость, температура размягчения и снижается пенетрация, что позволяет повысить устойчивость асфальтобетона к нагрузкам и пластическим деформациям [86, 96, 100]. Макромолекулы воска, растворяясь в битумном вяжущем, диспергируются по всему объему в мальтеновой фракции, образуя при застывании трехмерную сетчатую структуру, схематично представленную на рисунке 3.1. Это будет способствовать повышению температуры размягчения и жесткости вяжущего, что, в свою очередь, повысит прочностные свойства асфальтобетона и устойчивость его к пластическим деформациям.

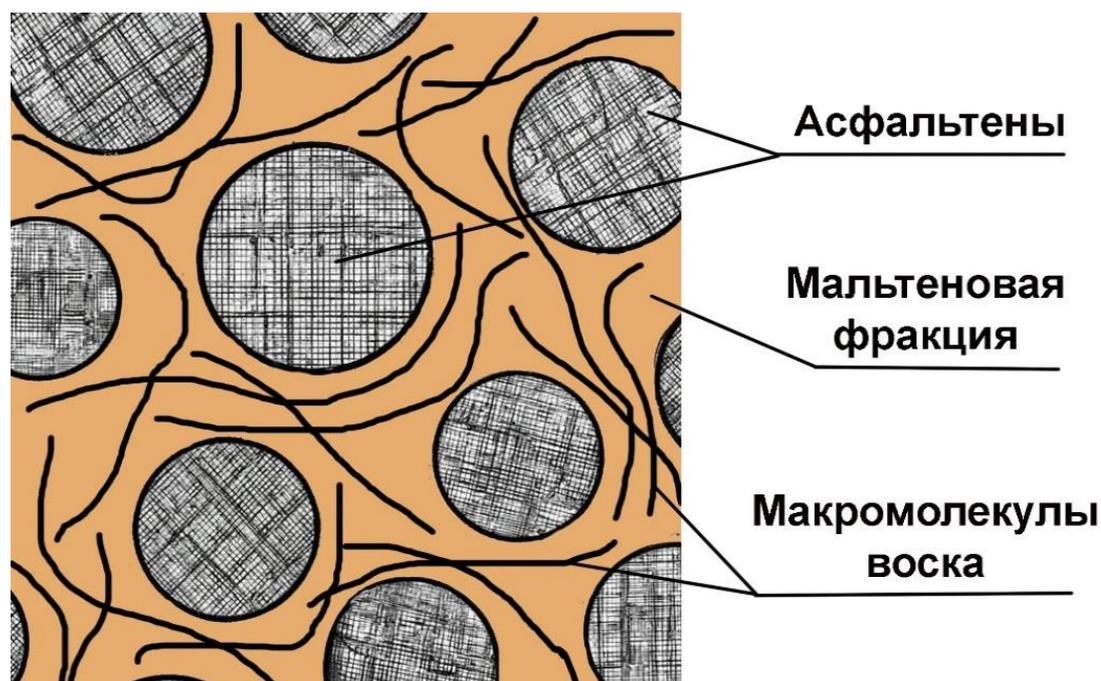


Рисунок 3.1 – Схема модификации воском структуры битумного вяжущего

Пластификатор Унипласт-3 на основе растительных масел содержит в своем составе триглицериды и жирные кислоты, которые проникают в микроструктуру битума и увеличивают расстояние между асфальтенами, снижая его вязкость, благодаря чему усиливается температуропонижающий эффект добавки. Эти компоненты также являются поверхностно активными веществами, повышающими сцепление вяжущего с минеральными составляющими асфальтобетонной смеси. Кроме того, пластификатор способствует лучшей диспергируемости воска и повышению однородности структуры битумного вяжущего, что в свою очередь повысит устойчивость асфальтобетона к растрескиванию и воздействию циклических нагрузок. Также, согласно данным исследования [109], пластификатор Унипласт-3 значительно улучшает низкотемпературные свойства битумного вяжущего, даже при использовании в низких концентрациях. Это позволит повысить устойчивость к пониженным температурам и трещиностойкость асфальтобетона.

Для улучшения адгезионных свойств битумного вяжущего и снижения интенсивности старения в состав модификатора введена адгезионная добавка ДАД-ТА, представляющая собой ПАВ на основе имидазолинов и амидоаминов,

эффективность которой доказана исследованиями [9, 51, 62]. Принцип работы адгезионной добавки заключается в том, что молекулы ПАВ, входящих в ее состав, концентрируются на поверхности раздела между битумом и минеральным наполнителем, ориентируясь положительно заряженными полярными группами к поверхности минеральной фазы, а неполярными группами к битуму, в результате чего образуются хемосорбционные связи, обеспечивающие повышение адгезионные свойства битумного вяжущего [60] (рисунок 3.2). Одновременно, молекулы ПАВ блокируют активные группы асфальтенов, не позволяя им взаимодействовать между собой, таким образом замедляя интенсивность старения битумного вяжущего. Кроме того, адсорбированные слои ПАВ будут способствовать повышению однородности и стабильности структуры.

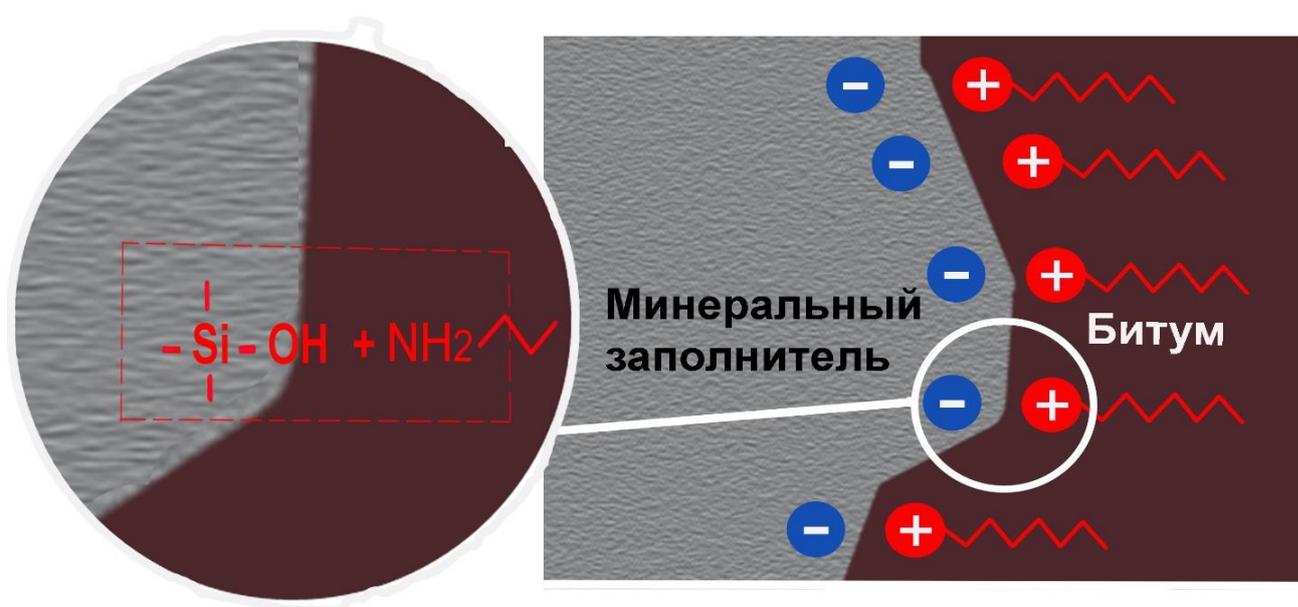


Рисунок 3.2 – Механизм хемосорбционного взаимодействия битумного вяжущего, содержащего ПАВ с поверхностью минерального наполнителя

Таким образом, функциональные компоненты органической добавки Вискодор ПВ-2 должны обеспечить температуропонижающий эффект при производстве асфальтобетонных смесей при одновременном повышении адгезионных свойств и снижении старения вяжущего, улучшение физико-механических и эксплуатационных характеристик асфальтобетона.

3.2 Дизайн диссертационного исследования

Для сопоставления теоретических обоснований с экспериментальными данными и систематизации исследования свойств битумных вяжущих и асфальтобетона с использованием температуропонижающей добавки на основе синтетических восков, был разработан дизайн исследования, представленный на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Дизайн диссертационного исследования

На первом этапе исследований было выполнено проектирование состава комплексной добавки на основе анализа результатов предшествующих исследований, с подбором наиболее эффективных исходных компонентов, входящих в состав модификатора. Далее было произведено математическое планирование эксперимента с целью подбора наиболее рациональных параметров технологического процесса и соотношения компонентов комплексной температуропонижающей добавки Вискодор ПВ-2.

На втором этапе была проведена оценка влияния разработанной добавки по сравнению с известными аналогами на свойства битумного вяжущего. Схема исследования свойств битумных вяжущих представлена в таблице 3.1. Для этого были приготовлены образцы битумного вяжущего, модифицированного введением различного количества исследуемой добавки Вискодор ПВ-2, а также известных восковых добавок Licomont BS-100 и Sasobit. Были проведены исследования физико-химических свойств приготовленных образцов битумного вяжущего таких, как глубина проникания иглы при 0 и 25°C, температура размягчения, температура хрупкости, растяжимость при 0 и 25°C, максимальное усилие при растяжении, температура вспышки, адгезионные свойства. На основании полученных физико-химических свойств были выбраны рациональные концентрации испытуемых восковых добавок для дальнейших исследований.

Далее была проведена оценка функциональных свойств битумного вяжущего, модифицированного подобранным рациональным количеством восковых добавок. Функциональные свойства отражают характеристики вяжущего, оказывающих непосредственное влияние на его поведение в условиях эксплуатации. К ним относятся: динамическая вязкость, низкотемпературная устойчивость, усталостная устойчивость. Также были исследованы изменения свойств модифицированного битумного вяжущего в результате процессов старения под воздействием высоких температур и кислорода воздуха. Для оценки взаимосвязи физико-химических свойств с изменениями химического состава, образцы битумного вяжущего исследовались методом ИК-спектromетрии.

Таблица 3.1. – Схема исследования свойств битумных вяжущих

Наименование показателя	Метод определения
Физико-химические свойства	
Глубина проникания иглы при 0 и 25°C	ГОСТ 33136
Температура размягчения	ГОСТ 33142
Температура хрупкости	ГОСТ 33143
Растяжимость при 0 и 25°C	ГОСТ 33138
Сцепление с минеральным материалом	ГОСТ 11508, ГОСТ 58406.2 (приложение Г)
Температура вспышки	ГОСТ 33141
Функциональные свойства	
Сдвиговая устойчивость	ГОСТ Р 58400.10
Низкотемпературная устойчивость	ГОСТ Р 58400.9
Усталостная устойчивость	ГОСТ Р 58400.7
Динамическая вязкость	ГОСТ 33137
Изменения свойств после технологического старения	
Старение вяжущего в тонком слое	ГОСТ Р 70243
Старение вяжущего по методу RTFOT	ГОСТ 33140
Старение вяжущего по методу PAV	ГОСТ Р 58400.5
Определение изменения потери массы вяжущего и физико-химических характеристик после старения	ГОСТ 18180 ГОСТ Р 70243 ГОСТ 33140 ГОСТ 33136, ГОСТ 33142, ГОСТ 33137 ГОСТ 11508

На третьем этапе были произведены исследования свойств теплых асфальтобетонных смесей, приготовленных с использованием рационально подобранной концентрации исследуемой добавки Вискодор ПВ-2 в сравнении с горячими асфальтобетонными смесями, приготовленными с исходным битумом без добавок и теплыми асфальтобетонными смесями, приготовленными с известной добавкой Licomont BS-100. Для этого были подобраны составы асфальтобетонных смесей типа Б в соответствии с ГОСТ 9128-2013, асфальтобетонной смеси А16Вн по ГОСТ 58406.2-1020 и ГОСТ Р 70396-2022, а также литой асфальтобетонной смеси ЛА16Вн по ГОСТ Р 54401-2020. При этом теплые асфальтобетонные смеси приготавливались и уплотнялись при более низких температурах, чем горячие асфальтобетонные смеси на основе исходного

битума без добавок. Далее физико-химические и эксплуатационные свойства полученных образцов асфальтобетонных смесей были определены в соответствии со схемой, представленной в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Схема исследования свойств асфальтобетонных смесей

Показатель	Метод определения
Подбор состава и испытание асфальтобетонной смеси тип Б марки III по ГОСТ 9128	
Изготовление образцов для тестирования	ГОСТ 12801
Физико-механические свойства	
Средняя плотность	ГОСТ 12801
Предел прочности при сжатии при температурах испытания 50, 20 и 0 °С	ГОСТ 12801
Сдвигоустойчивость по коэффициенту внутреннего трения и по сцеплению при сдвиге	ГОСТ 12801
Водонасыщение	ГОСТ 12801
Водостойкость	ГОСТ 12801
Водостойкость при длительном водонасыщении	ГОСТ 12801
Трещиностойкость	ГОСТ 12801
Испытание физико-механических свойств асфальтобетонной смеси после термостатирования при температурах приготовления	ГОСТ Р 58401.24 ГОСТ 12801
Подбор состава и испытание асфальтобетонной смеси А16Вн по ГОСТ 58406.2-2020 и ГОСТ Р 70396-2022	
Изготовление образцов для тестирования	ГОСТ Р 58406.9
Физико-механические свойства	
Максимальная плотность	ГОСТ Р 58401.16
Объемная плотность	ГОСТ Р 58401.10
Содержание воздушных пустот	ГОСТ Р 58401.8
Содержание пустот в минеральном заполнителе	ГОСТ Р 58406.10
Содержание пустот, наполненных битумным вяжущим	ГОСТ Р 58406.10
Разрушающая нагрузка по Маршаллу	ГОСТ Р 58406.8
Деформация по Маршаллу	ГОСТ Р 58406.8
Эксплуатационные свойства	
Средняя глубина колеи и угол наклона кривой колееобразования	ГОСТ Р 58406.3
Водостойкость	ГОСТ Р 58401.18

Показатель	Метод определения
Подбор состава и испытание литой асфальтобетонной смеси ЛА16Вн по ГОСТ Р 54401	
Изготовление тестовых образцов	ГОСТ Р 54400
Физико-механические свойства	
Максимальная плотность	ГОСТ Р 58401.16
Объемная плотность	ГОСТ Р 58401.10
Содержание воздушных пустот	ГОСТ Р 58401.8
Глубина вдавливания штампа	ГОСТ Р 54400
Удобоукладываемость смеси при различных температурах	ГОСТ Р 54400

3.2 Подбор состава модификатора Вискодор ПВ-2

Для определения состава комплексного модификатора исходили из необходимости модифицировать восковую смесь таким образом, чтобы добавка обеспечивала улучшение характеристик асфальтобетона: повышение устойчивости асфальтобетона к пластическим деформациями при повышенных температурах летнего периода и одновременно улучшала бы устойчивость асфальтобетона к низким температурам зимнего периода. Таким образом органическая комплексная добавка должна содержать в составе достаточное количество ПАВ и пластификатора, чтобы при ее введении в вяжущее максимально увеличивалась температура размягчения, но при этом температура хрупкости была бы минимальной. Исходя из данного условия для подбора состава добавки была построена математическая модель взаимосвязи входных параметров, включающих в себя содержание в составе комплексной органической добавки пластификатора и ПАВ. В качестве функций отклика были выбраны повышение температуры размягчения и снижение температуры хрупкости модифицированного добавкой битумного вяжущего в процентном отношении к показателям исходного битума.

Диапазоны варьирования каждого параметра подобраны исходя из целесообразности. Так, нижний предел содержания пластификатора Унипласт-3

обусловлен эффективностью разжижающего действия на битум, верхний предел ограничен способностью смеси воска и пластификатора сохранять устойчивую твердую товарную форму. Содержание восковой смеси ограничено нижним пределом, при котором восков в смеси достаточно для поддержания твердой товарной формы добавки, и верхним – значение которого ограничивается необходимостью введения пластификатора и ПАВ в минимальных концентрациях, при которых эти компоненты проявляют значимое влияние на показатели битумного вяжущего. Параметры математического планирования эксперимента и диапазон их варьирования представлены в таблице 3.3. содержание поверхностно-активной добавки ДАД-ГА ограничено нижним и верхним пределами эффективной концентрации, позволяющей улучшить адгезию битумного вяжущего, при условии введения от 1 до 3% модификатора в битум.

Таблица 3.3 – Входные параметры планирования эксперимента

№	Наименование параметра	Кодированный вид	Диапазон варьирования			Шаг варьирования
			-1	0	1	
1	Содержание восковой смеси, %	X1	75	77,5	80	2,5
2	Содержание пластификатора, %	X2	10	15	20	5

На основе выбранных параметров и функций отклика, была построена математическая модель, позволяющая определить рациональное соотношение компонентов комплексной добавки. На основе запланированных составов были приготовлены опытные образцы модификатора. Затем образцы были испытаны при введении в битумное вяжущее. Для каждого полученного таким образом образца модифицированного битума определили температуру размягчения по КиШ и температуру хрупкости, а также их изменение по отношению к показателям исходного битума. Матрица планирования эксперимента со значениями входных параметров и функций отклика представлена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Параметры				Значения функций отклика	
	Кодированный вид		Натуральный вид		Повышение температуры размягчения, %	Снижение температуры хрупкости, %
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂		
1	1	1	75	20	16,7	15,8
2	1	0	75	15	35	16,1
3	1	-1	75	10	34,7	12,2
4	0	1	77,5	20	28,5	17,2
5	0	0	77,5	15	35,6	17,5
6	0	-1	77,5	10	34,2	12,2
7	-1	1	80	20	20,8	14,3
8	-1	0	80	15	36,7	14,6
9	-1	-1	80	10	36	7,3

По полученным данным произведен расчет и составлены уравнения регрессии по каждой функции отклика:

Зависимость изменения температуры размягчения от компонентного состава добавки (3.1):

$$Y = -2654.84444444 + 68.66000000 * X_1 + 3.10333333 * X_2 - 0.44533333 * X_1^2 + 0.05600000 * X_1 * X_2 - 0.29133333 * X_2^2 \quad (3.1)$$

Зависимость изменения температуры хрупкости от компонентного состава добавки (3.2):

$$Y = -2058.71666667 + 54.25333333 * X_1 - 1.27000000 * X_2 - 0.36000000 * X_1^2 + 0.06800000 * X_1 * X_2 - 0.11600000 * X_2^2 \quad (3.2)$$

Графическое изображение зависимостей изменения температуры размягчения и температуры хрупкости вяжущего от компонентного состава добавки представлен на рисунке 3.4.

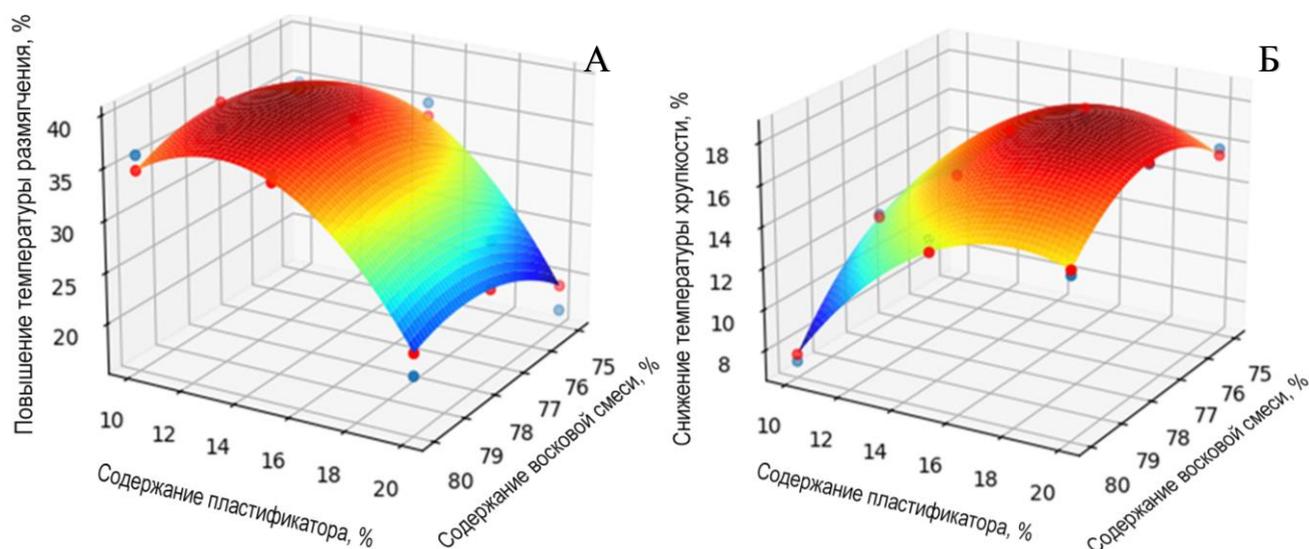


Рисунок 3.4 – Зависимости величин повышения температуры размягчения (А) и снижения температуры хрупкости (Б) от содержания восков и пластификатора

По результатам проведенной расчетно-экспериментальной работы установлено рациональное соотношение компонентов модификатора, представленное в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Состав комплексного модификатора Вискодор ПВ-2

Наименование компонента	Содержание, %, по массе
Смесь на основе полиэтиленового и амидного восков	77,5
Пластификатор	15
ПАВ на основе амидов и имидазолинов	7,5

На основании полученных результатов планирования эксперимента разработана технология производства модификатора Вискодор ПВ-2.

Технология производства добавки заключается в том, что на первом этапе восковую смесь нагревают до температуры на 10-20°C выше температуры ее плавления, затем, в расплав восков подаются пластифицирующий компонент и добавка ПАВ, и состав перемешивается до однородного состояния. На втором этапе полученная смесь охлаждается и поступает в гранулятор или измельчитель, где получают конечный продукт в виде порошка, чешуек или гранул. Графически блок-схема технологического процесса приготовления модификатора представлена рисунке 3.5.

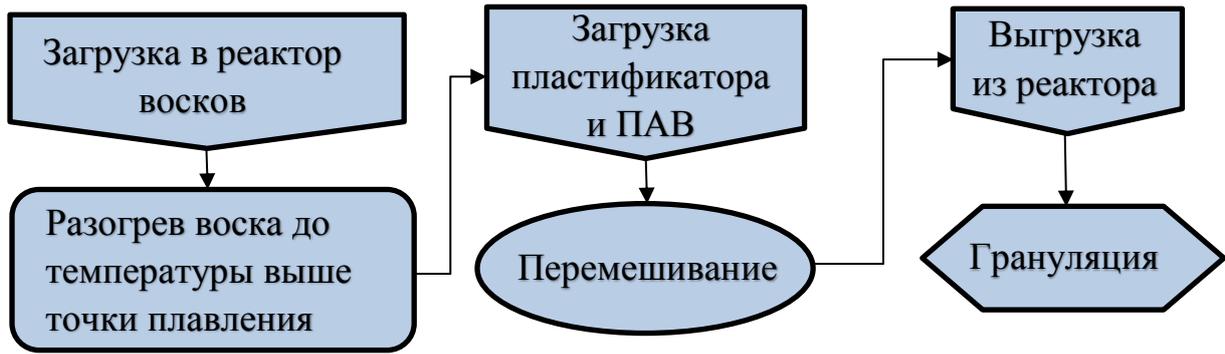


Рисунок 3.5– Блок-схема технологических процессов и режимов производства добавки Вискодор ПВ-2

3.3 Изменение химического состава и структуры битумного вяжущего, модифицированного исследуемыми добавками

Для оценки изменений химического состава битумного вяжущего в результате модификации исследуемыми добавками, был проведен сравнительный анализ исходного битума БНД и модельных образцов вяжущего, содержащих 10% каждой из добавок методом ИК-спектроскопии в диапазоне $4000-400\text{ см}^{-1}$ [110, 111]. Результаты представлены на рисунке 3.6. Для того, чтобы сопоставить интенсивности отдельных полос поглощения, спектры были приведены к единой интенсивности по полосам поглощения деформационных и валентных колебаний метиленовых (CH_2) и метильных (CH_3) групп.

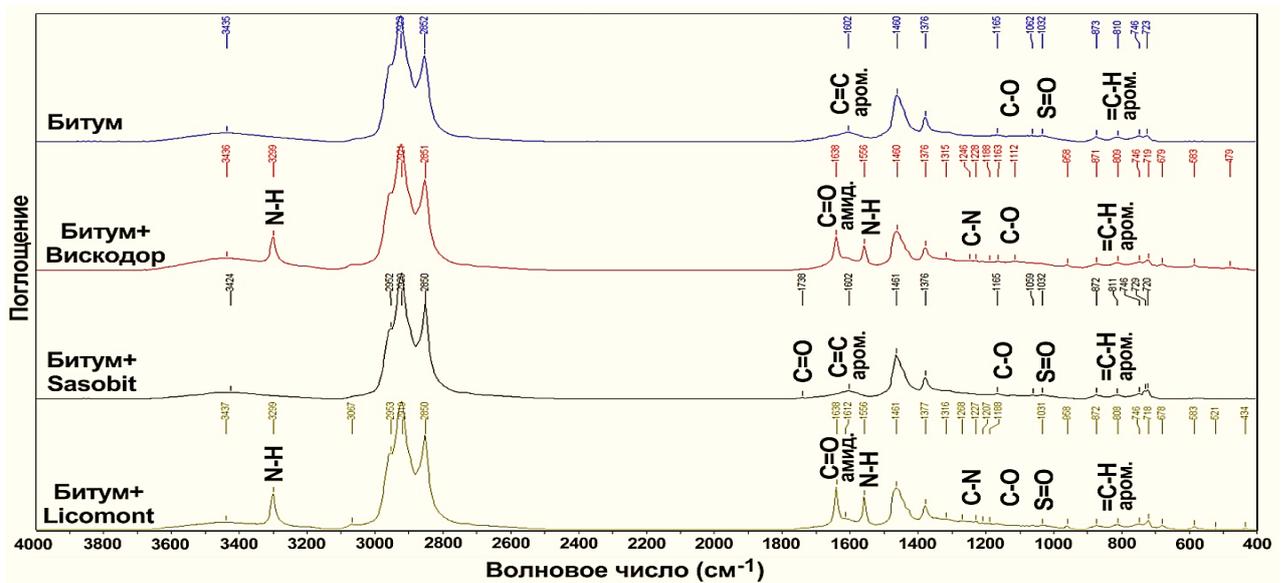


Рисунок 3.6 – ИК-спектры исходного и модифицированного исследуемыми добавками битума.

При анализе ИК-спектра исходного битума без добавок обнаружены полосы, отвечающие валентным (2952 , 2922 , 2851 см^{-1}) и деформационным (1460 , 1376 , 721 см^{-1}) колебаниям CH_2 и CH_3 групп, указывающие на характерное для битумов высокое количество в составе предельных углеводородов, парафинов и масел. Наличие пика 1604 см^{-1} и полос в области низких частот 746 , 807 и 873 см^{-1} свидетельствует о наличии ароматических структур [151, 152].

При сопоставлении ИК-спектров немодифицированного битума и битумных вяжущих с добавками Sasobit, Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 выявлено как изменение интенсивности полос поглощения, так и появление новых пиков. ИК-спектр вяжущего, модифицированного добавкой Sasobit, имеет наибольшее сходство со спектром исходного битума. Это можно объяснить тем, что Sasobit представляет собой функционализированный полиэтиленовый воск, содержащий предельные углеводороды, сходные с теми, что содержатся в исходном битуме. Это подтверждается работами, проведенными китайскими исследователями [152]. При модификации вяжущего введением Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100, на ИК- спектрах выявлены пики 3299 и 1566 см^{-1} , характерные для валентных и деформационных колебаний NH -групп соответственно. Полоса поглощения 1638 см^{-1} , свидетельствующая о наличии карбонильных групп в третичных амидах, а также пик 1248 см^{-1} , свойственный колебаниям C-N -групп [153, 154]. Это доказывает наличие в указанных добавках амидных соединений, таких как имидоамины, амиды, имидазолины. Согласно литературным данным [60, 155] эти соединения могут улучшать адгезионные свойства органического вяжущего к минеральному заполнителю, а также способны повышать устойчивость модифицированного битума к окислительному старению, что будет способствовать увеличению срока службы дорожного покрытия на его основе. Кроме того, амиды способны взаимодействовать с асфальтенами битума с образованием амид-асфальтеновой структуры, улучшающей когезионные свойства битума и повышающей его температуру размягчения и интервал пластичности [86, 155], что позволит повысить устойчивость дорожного материала к воздействию нагрузок и повышенных температур летнего сезона.

Для оценки влияния исследуемых добавок на структуру битумного вяжущего было проведено исследование исходного и модифицированного исследуемыми добавками битума при помощи поляризационного микроскопа. Полученные микрофотографии структур битумного вяжущего представлены на рисунке 3.7.

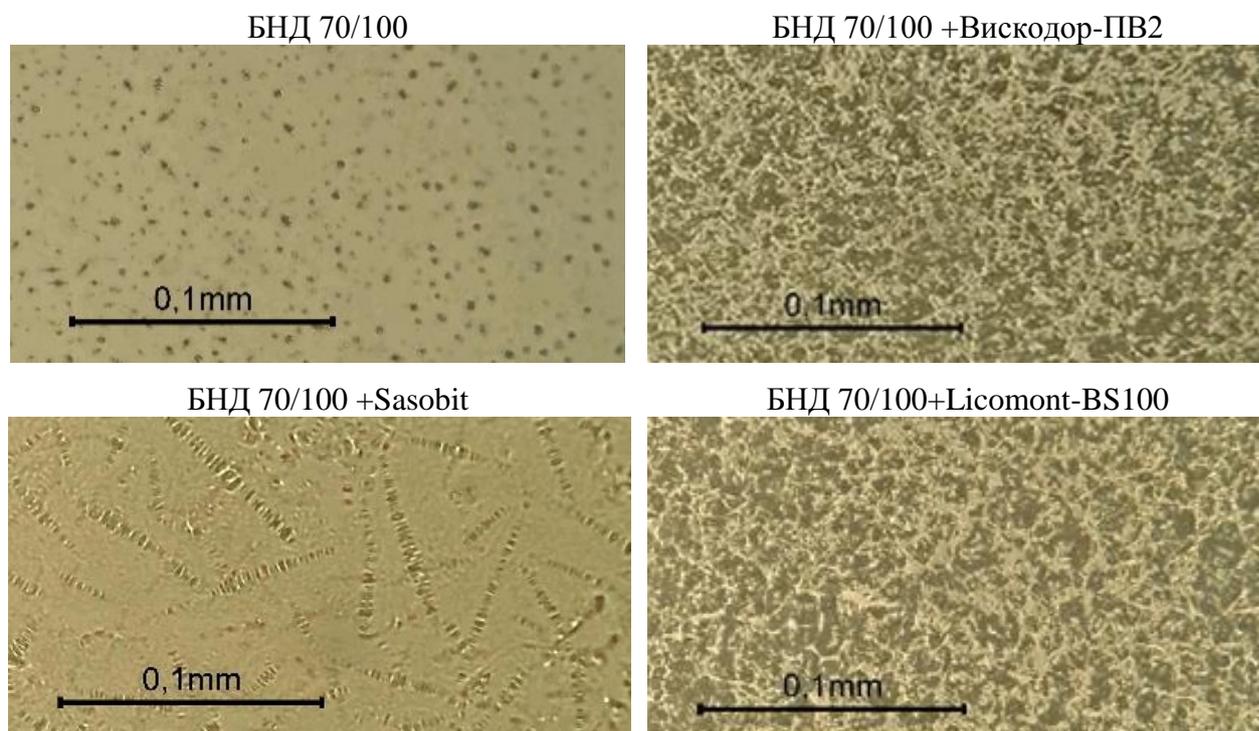


Рисунок 3.7 – Микрофотографии структуры исходного и модифицированного исследуемыми добавками битумного вяжущего

Анализ микрофотографий структуры образцов битумного вяжущего свидетельствует, что исследуемые восковые добавки создают в битумном вяжущем связнодисперсные структуры, отличающиеся между собой по своему строению.

Так, обнаружено, что добавка Sasobit на основе полиэтиленового воска образует в вяжущем кристаллические образования линейной формы. Модификаторы Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 создают в битуме более развитые структуры, близкие по строению друг к другу, что объясняется присутствием в этих добавках амидного воска и поверхностно-активных добавок. Наиболее тонкодисперсную и однородную структуру образует Вискодор ПВ-2, что объясняется наличием в составе добавки пластификатора, который ослабляет

взаимодействие между макромолекулами воска и способствует лучшему его распределению в битумном вяжущем.

Структурирование битумного вяжущего при введении добавок будет способствовать повышению его адгезионных характеристик и прочности асфальтобетона, увеличивать устойчивость к воздействию повышенных температур и нагрузок. Повышение однородности и дисперсности структуры вяжущего, модифицированного Вискодор ПВ-2, окажет положительное влияние на устойчивость асфальтобетона к растрескиванию и воздействию циклических нагрузок.

3.4 Влияние исследуемых органических добавок на физико-химические свойства битумного вяжущего БНД 100/130 и БНД 70/100

Для оценки влияния разработанной добавки Вискодор ПВ-2 на физико-химические свойства битумного вяжущего проведен комплекс исследований, результаты которых опубликованы в работах [110-112]. С целью оценки изменений свойств битумного вяжущего под воздействием исследуемой добавки Вискодор ПВ-2, были приготовлены серии образцов модифицированных вяжущих на основе битумов БНД 70/100 и БНД 100/130, содержащие различное количество исследуемой добавки, а также известных добавок Sasobit и Licomont BS-100. Диапазоны концентраций добавок были выбраны исходя из опыта предыдущих исследований и рекомендаций производителей, а также исходя из необходимости получения наиболее полных данных по их влиянию на битумное вяжущее. Так, на основе битума марки БНД 100/130 были приготовлены составы битумного вяжущего с содержанием Вискодор ПВ-2 в диапазоне концентраций от 0,5 до 3,0% с шагом повышения 0,5%. Известные добавки Sasobit и Licomont BS-100 были введены в количестве 2, 2,5 и 3 % от массы вяжущего, исходя из рекомендаций производителей и опытных данных, представленных в работах [96, 97, 104, 156]. Результаты исследований физико-химических свойств образцов исходного и модифицированного добавками БНД 100/130 представлены в таблице 3.6

Таблица 3.6 – Физико-химические свойства образцов исходного и модифицированного битумного вяжущего на основе БНД 100/130

Концентрация добавки, %	Глубина проникания иглы (пенетрация)		Температура размягчения, °С	Температура хрупкости, °С	Интервал пластичности, °С	Растяжимость, см		Максимальное усилие при растяжении, Н	
	При 0°С	При 25°С				При 0°С	При 25°С	При 0°С	При 25°С
БНД 100/130 без добавки									
0	35	113	45,0	-20,5	65,5	4,5	>150	131	0,60
С добавкой Вискодор ПВ-2									
0,5	33	112	45,0	-21,0	66,0	4,5	>150	132	0,64
1,0	31	108	46,0	-21,0	67,0	4,8	112	138	0,66
1,5	31	105	60,0	-22,0	82,0	4,6	79	149	1,79
2,0	30	102	63,0	-22,0	85,0	4,4	75	152	3,05
2,5	28	87	66,0	-21,0	87,0	3,4	70	160	3,13
3,0	27	66	76,0	-21,0	97,0	3,2	64	161	3,43
С добавкой Licomont BS-100									
2,0	27	77	63,0	-20,0	83,0	4,3	72	179	3,39
2,5	27	71	70,0	-19,0	93,0	3,4	67	179	3,70
3,0	26	63	82,0	-19,0	101,0	3,0	62	180	4,00
С добавкой Sasobit									
2,0	23	65	62,0	-19,0	81,0	4,2	73	147	3,30
2,5	22	61	67,0	-18,0	86,2	3,2	68	169	4,46
3,0	22	58	72,0	-18,0	90,0	2,9	65	191	5,62
Требования ГОСТ 33133 для БНД 100/130	≥ 30	101-130	≥45	≤-20	Не норм.	≥ 4,0	≥ 70	Не норм.	Не норм.

Исходя из полученных результатов можно заключить, что общим изменением для всех образцов вяжущего, модифицированного добавками на основе восков, являются: снижение пенетрации при 25 °С, повышение температуры размягчения, увеличение интервала пластичности, снижение растяжимости при 25 и при 0 °С. При этом, при ведении разработанной добавки Вискодор ПВ-2 в концентрации, не превышающей 2,0%, все физико-химические показатели битумного вяжущего остаются в пределах значений, соответствующих ГОСТ 33133 для исходного битума БНД 100/130.

Динамика изменения глубины проникания иглы при 0 и 25 °С битума БНД 100/130, модифицированного добавками, представлена на рисунке 3.8.

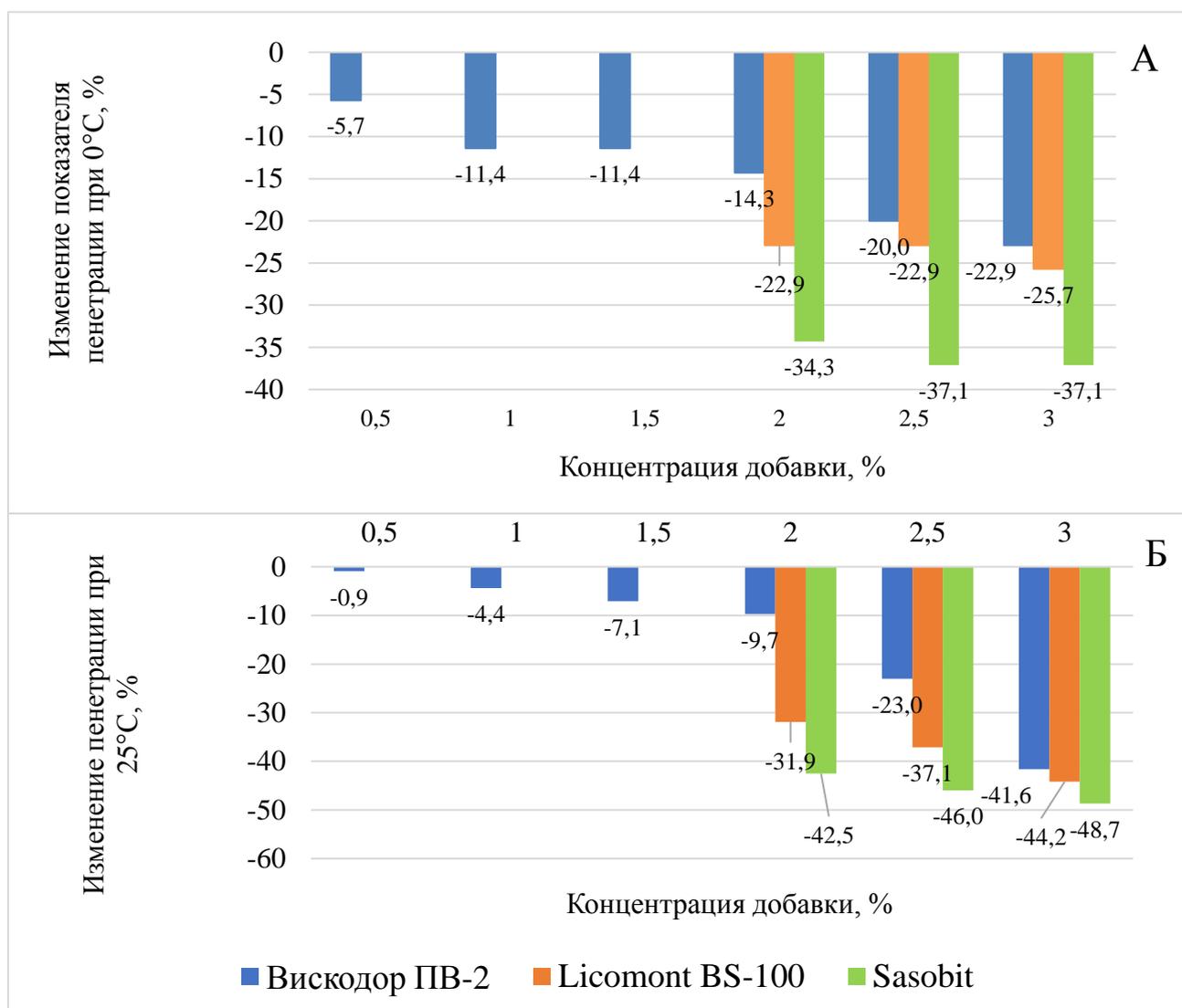


Рисунок 3.8 – Изменение пенетрации битумного вяжущего, модифицированного добавками в сравнении с исходным битумом БНД 100/130:
А – при 0 °С; Б – при 25 °С

Согласно результатам, представленным в таблице 3.9, а также на рисунке 3.8, можно отметить, что показатель глубины проникания иглы как при 0°C, так и при температуре 25°C снижается при модификации всеми исследуемыми добавками. Такое снижение пенетрации обусловлено тем, что воски при температуре ниже их температуры затвердевания формируют в битуме структуры, увеличивающие вязкость битума [86]. При этом структурированность вяжущего возрастает с увеличением концентрации введенной восковой добавки. Так, анализируя данные, полученные при введении в битум БНД 100/130 добавки Вискодор ПВ-2 в диапазоне концентраций от 0,5% до 3,0% можно отметить, что введении 0,5% добавки практически не повлияло на показатель пенетрации при 25°C, что может свидетельствовать о том, что находящегося в битуме воска при данной концентрации недостаточно, чтобы образовать увеличивающую вязкость структуру. Дальнейшее увеличение концентрации ведет к снижению глубины проникания иглы пропорционально количеству вводимой добавки. Модификация вяжущего посредством введения Licomont BS-100 и Sasobit также снижает пенетрацию при увеличении количества добавки. Полученные результаты коррелируют с данными литературных источников [93, 96, 104]. Наименьшее снижение показателя глубины проникания иглы как при 25°C, так и при 0°C вызывает добавка Вискодор ПВ-2, а наиболее значительное – Sasobit. Так, введение Вискодор ПВ-2 в концентрации 2% снизило пенетрацию при температуре 25°C на 9,7 %, а при температуре 0°C – на 14,3%, введение 2% Sasobit снижает пенетрацию при температуре 25°C на 42,5% а при 0 °C – на 34,3 %, 2% Licomont снижает пенетрацию при 25° и 0° – на 31,9 и 22,9% соответственно. Это свидетельствует о меньшем снижении пластических свойств битумного вяжущего при модификации добавкой Вискодор ПВ-2, что в сочетании со снижением температуры хрупкости может оказать положительное влияние на характеристики вяжущего при низких температурах. Это связано с присутствием в составе указанной добавки растительных масел и ПАВ на основе амидов жирных кислот растительных масел, обладающих пластифицирующим действием на битум [112].

Следует отметить, что показатели пенетрации как при 0°С, так и при 25°С битумного вяжущего, модифицированного Вискодор ПВ-2 в концентрации до 2% включительно, остаются в пределах нормативных требований для БНД 100/130 по ГОСТ 33133. Более высокая концентрация добавки снижает показатели глубины проникания иглы ниже требуемых по ГОСТ, что ухудшает пластические свойства вяжущего. Таким образом, дальнейшее повышение концентрации добавки является нецелесообразным. При введении добавок Licomont BS-100 и Sasobit показатели пенетрации снижаются более значительно, и уже при 2% ввода меняют марки битумного вяжущего, что негативно отразится на пластических свойствах вяжущего и долговечности асфальтобетонного покрытия.

Динамика изменения температуры размягчения по КиШ битума БНД 100/130 после модификации исследуемыми добавками представлена на рисунке 3.9.

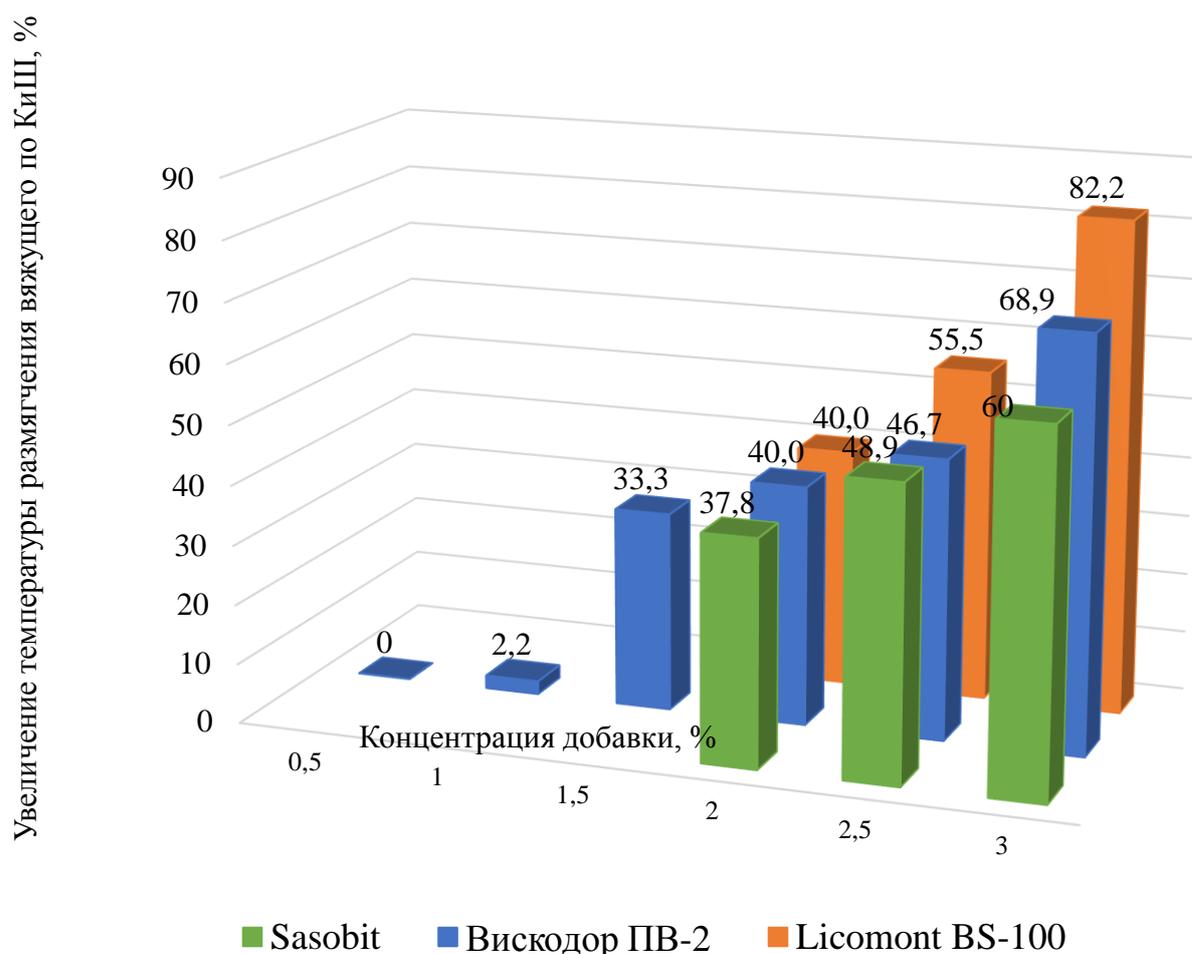


Рисунок 3.9 – Изменение температуры размягчения битума БНД 100/130, модифицированного исследуемыми добавками

Результаты исследования позволяют заключить, что все испытываемые добавки дают повышение температуры размягчения пропорционально введенной концентрации. Можно отметить, что для всех трех добавок в концентрации 2% наблюдается практически одинаковое повышение данного показателя, но с увеличением количества добавок отличие в эффекте их влияния становится более значительным. При концентрации 3% наибольшее увеличение температуры размягчения наблюдается при введении Licomont BS-100 (3% добавки повышают температуру размягчения БНД 100/130 на 82%), а наименьший – при введении Sasobit (3% добавки повышают данный показатель на 60%). Это коррелирует с результатами исследований [93, 96, 104] и обусловлено различной температурой плавления этих восков – наиболее низкой температурой плавления у Sasobit – 110°C и наиболее высокой у Licomont BS-100 – 141°C. Комплексная добавка Вискодор ПВ-2 с температурой плавления 137°C по эффекту повышения температуры размягчения немного уступает Licomont BS-100, но значительно превосходит Sasobit (3% добавки повышают температуру размягчения битума на 69 %).

Исходя из результатов, отраженных на рисунке 3.9, можно заключить, что введение добавки Вискодор ПВ-2 в количестве 0,5 и 1,0% практически не отражается на показателе температуры размягчения, что, очевидно, связано с недостаточной структурированностью битума. При повышении концентрации указанной добавки до 1,5% температура размягчения вяжущего существенно возрастает (на 33% по сравнению с показателем исходного битума без добавок), что является признаком достижения достаточного для формирования структуры содержания воска. Дальнейшее повышение концентрации добавки способствует пропорциональному увеличению температуры размягчения вяжущего.

Способность повышать температуру размягчения является основным преимуществом добавок на основе восков. Это позволяет улучшить эксплуатационные характеристики асфальтобетонов. Согласно многочисленным исследованиям [59, 61, 72, 114, 128], при применении температуропонижающих

добавок на основе ПАВ, температура размягчения вяжущего не изменяется, а в некоторых случаях даже снижается.

В результате исследования обнаружено, что модификация вяжущего введением Sasobit и Licomont BS-100 несколько повышает температуру хрупкости (таблица 3.6), что свойственно данным восковым добавкам согласно исследованиям [96, 104], и может негативно повлиять на эксплуатационные характеристики асфальтобетона при низких температурах в зимний сезон. Так, согласно полученным результатам, наибольшее повышение температуры хрупкости наблюдается при модификации битума добавкой Sasobit, введение которой уже в 2% ухудшает этот показатель до значения выше нормируемого по ГОСТ 33133 для БНД 100/130. Licomont BS-100 повышает температуру хрупкости БНД 100/130 выше нормативного значения в концентрации 2,5% и более.

Обнаружено, что введение добавки Вискодор ПВ-2 в испытанных концентрациях не только не ухудшает, но даже несколько улучшает показатель температуры хрупкости. Это обусловлено пластифицирующими свойствами растительных масел, входящих в состав указанной добавки. При этом наибольшее понижение температуры хрупкости битума БНД 100/130 наблюдается при введении 1,5 и 2% Вискодор ПВ-2 – на 1,5°C. Это указывает на создание при указанных концентрациях добавки структуры вяжущего, более устойчивой к переходу в хрупкое состояние. Дальнейшее повышение количества добавки ведет к повышению температуры хрупкости, что обусловлено увеличением содержания восков в составе вяжущего, но в концентрации до 3% этот показатель не повышается выше нормативного значения.

Разница между температурой размягчения и температурой хрупкости определяет интервал пластичности (работоспособности) битума, характеризующий его способность находится в вязкоупругом состоянии, устойчивом к воздействию пластических деформаций и образованию трещин. За счет существенного возрастания температуры размягчения и незначительного изменения температуры хрупкости, при модификации вяжущего всеми

исследуемыми добавками, интервал пластичности значительно увеличивается, что отражено графически на рисунке 3.10.

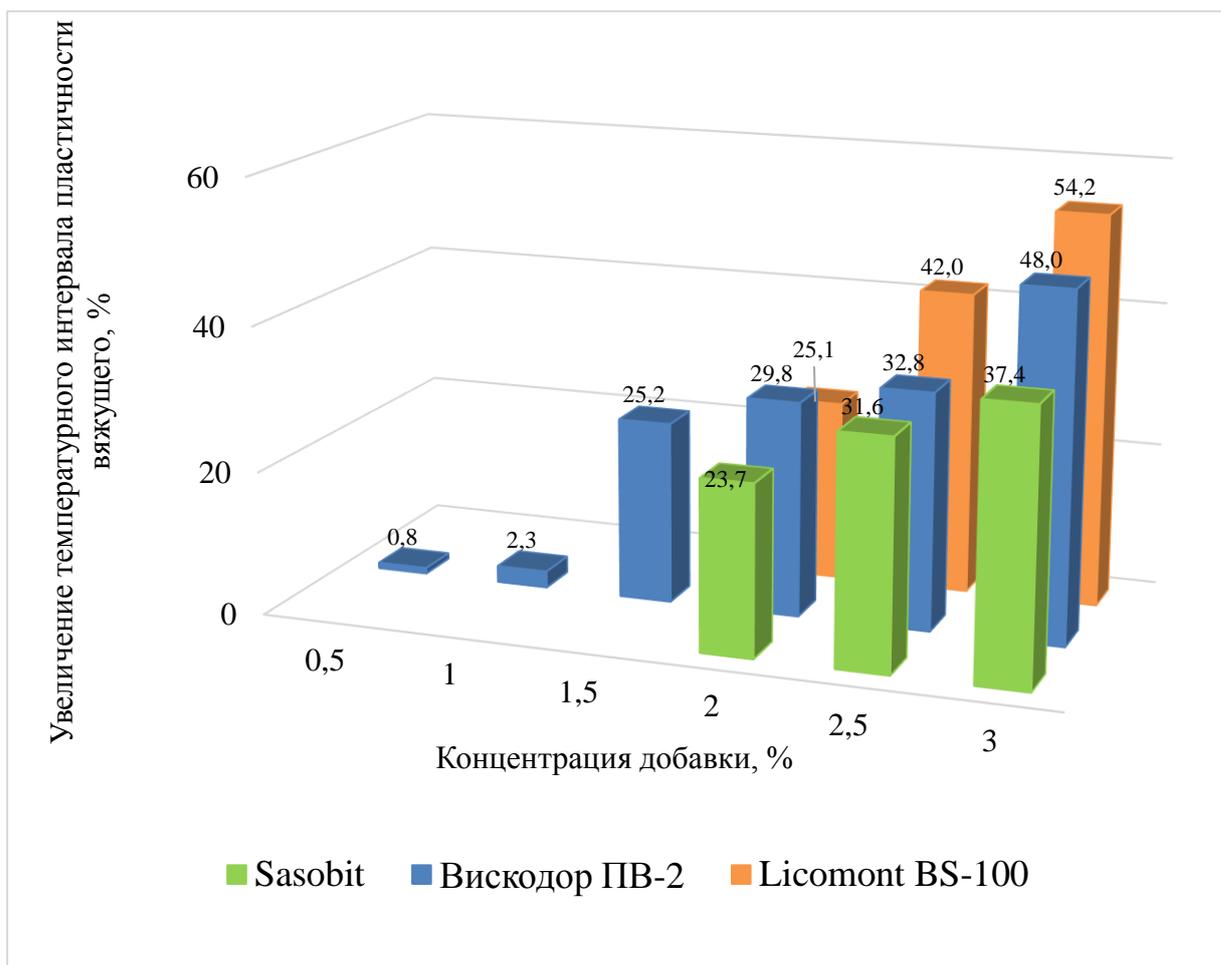


Рисунок 3.10 – Изменение интервала пластичности БНД 100/130 после модификации добавками

Можно отметить, что при введении Вискодор ПВ-2 в массовой концентрации до 1%, интервал пластичности практически не изменяется. Значительное расширение интервала работоспособности вяжущего наблюдается только при введении от 1,5% и более указанной добавки. Анализ представленных на рисунке 3.10 гистограмм позволяет заключить, что полиэтиленовый воск Sasobit дает значительно меньший эффект расширения интервала пластичности, чем амидный воск Licomont BS-100 и комплексная добавка Вискодор ПВ-2. При использовании 2% добавок наибольшее увеличение интервала пластичности дает добавка Вискодор ПВ-2, за счет снижения температуры хрупкости, при введении 3% – Licomont BS, что обусловлено значительным повышением температуры размягчения [112]. Так, 2 и 3% Вискодор ПВ-2 увеличивает интервал

работоспособности битума на 29,8 и 48,0 %, Licomont BS-100 на 25,1 и 54,2% Sasobit – на 23,7 и 37,4% соответственно. Широкий интервал пластичности модифицированного вяжущего обеспечит возможность получения дорожных покрытий, способных эффективно функционировать в условиях значительных сезонных колебаний температуры.

Введение исследуемых добавок значительно снизило растяжимость битума при 25°C. Для всех исследуемых добавок снижение растяжимости в зависимости от увеличения концентрации происходило практически одинаково. Наибольшее снижение растяжимости наблюдалось при увеличении количества исследуемых добавок до 3%. Так, введение 3% Вискодор ПВ-2 снизило растяжимость битума с показателя, превышающего 150 см до 64 см, 3% Sasobit – до 65 см, 3% Licomont BS-100 – до 62 см. Снижение растяжимости битума свидетельствует об увеличении структурированности вяжущего с увеличением содержания восковых компонентов. Растяжимость битума при 0°C, характеризующая пластичность вяжущего при низких температурах, при концентрациях добавок до 2% включительно остается в пределах нормативного требования, но снижается при дальнейшем повышении концентрации до 2,5% для всех исследуемых в данной работе добавок до значений, ниже нормируемых ГОСТ 33133 для БНД 100/130. Так введение 2,5% Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 снижает растяжимость битума на 24,4%, а 2,5% Sasobit – на 28,9%. Таким образом, пластические свойства битума при пониженных температурах ухудшаются при увеличении концентрации добавок до 2,5% и более [112].

Определение максимального усилия при растяжении битума позволяет оценить когезионные свойства битума. Из результатов испытаний следует, что с увеличением концентраций исследуемых добавок максимальное усилие при растяжении растет, следовательно, увеличивается когезионная прочность вяжущего. При концентрации 2% разница между максимальным усилием при растяжении при 25°C для всех исследуемых добавок незначительна. В то же время при концентрации 3% наибольшее максимальное усилие при растяжении наблюдается при введении Sasobit – 5,62Н, а наименьшее – для добавки

Вискодор ПВ-2 – 3,43Н. Но при использовании добавок Licomont BS-100 и Sasobit в указанной концентрации значительно увеличивается максимальное усилие при растяжении при 0°C, а растяжимость, наоборот, значительно падает, что свидетельствует об ухудшении пластических свойств при низких температурах. Так, использование 3% Licomont BS-100 увеличивает максимальное усилие при растяжении при 0°C на 37,8%, а 3% Sasobit – на 45,63% по сравнению с исходным битумом, в то время как при использовании 3% добавки Вискодор ПВ-2 этот показатель увеличивается меньше – на 22,6%, что объясняется влиянием пластифицирующих компонентов, содержащихся в добавке [112].

Опираясь на анализ полученных результатов, можно заключить, что несмотря на наиболее значительное увеличение интервала пластичности при введении исследуемых добавок в концентрации 3%, указанная концентрация добавок является нецелесообразной, так как при этом ухудшаются низкотемпературные характеристики вяжущего (температура хрупкости, пенетрация и растяжимость при 0°C), что негативно отразится на устойчивости покрытия к воздействию низких температур в зимний период. Таким образом, были выбраны наиболее рациональные концентрации введения добавки Вискодор ПВ-2 в битумное вяжущее на основе БНД 100/130 для испытаний влияния добавок на свойства теплых асфальтобетонных смесей – 1,5 и 2%, для Licomont BS-100 – 2%, при которых низкотемпературные свойства битума изменяются менее значительно. Так как добавка Sasobit значительно уступает по эффективности практически по всем исследованным показателям, было решено не использовать ее в качестве сравнения для последующих испытаний влияния добавок на свойства теплых асфальтобетонов.

На основе битума марки БНД 70/100 также были приготовлены составы с Вискодор ПВ-2, Sasobit и Licomont BS-100 в диапазоне концентраций от 1,5 до 3,0% с шагом повышения 0,5%. Результаты исследований физико-химических свойств образцов битума БНД 70/100 представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Физико-химические свойства образцов исходного и модифицированного битумного вяжущего на основе БНД 70/100

Концентрация добавки, %	Глубина проникания иглы		Температура размягчения вяжущего по КиШ, °С	Температура хрупкости, °С	Интервал пластичности, °С	Растяжимость, см		Максимальное усилие при растяжении, Н	
	При 0°С	При 25°С				При 0°С	При 25°С	При 0°С	При 25°С
Битум БНД 70/100 без добавок									
0	28	81	50,0	-22,0	77,0	4,2	130	115	1,00
С добавкой Вискодор ПВ-2									
1,5	28	74	63,0	-23,0	86,0	4,0	77	143	4,85
2,0	27	72	67,0	-24,0	91,0	3,8	64	159	5,10
2,5	26	71	78,5	-24,0	102,5	3,7	62	160	5,80
3,0	24	63	84,0	-23,0	107,0	3,0	52	171	6,00
С добавкой Licomont BS-100									
1,5	26	69	63,5	-22,0	85,5	3,7	71	142	4,75
2,0	25	68	68,5	-21,0	89,5	3,4	62	135	5,50
2,5	24	63	80,0	-21,0	101,0	3,2	58	150	6,00
3,0	23	61	86,0	-20,0	106,0	2,6	49	160	6,50
С добавкой Sasobit									
1,5	24	57	61,5	-21,0	82,5	2,3	67	163	4,80
2,0	23	54	65,5	-20,0	85,5	2,1	61	175	5,10
2,5	22	52	70,0	-20,0	90,0	2,0	55	177	5,90
3,0	21	50	76,5	-19,0	95,5	1,9	51	178	7,70
Требования ГОСТ 33133 для БНД 70/100	≥ 22	71-100	≥47	≤-18	Не норм.	≥ 3,7	≥ 62	Не норм.	Не норм.

Исходя из полученных результатов можно заключить, что также, как и в предыдущих опытах с БНД 100/130, при модификации более вязкого битума БНД 70/100 наблюдается аналогичные зависимости снижения пенетрации при 25 °С, повышения температуры размягчения, увеличения интервала пластичности и снижения растяжимости при 25 и при 0 °С от концентрации и вида восковой

добавки. При этом, при введении разработанной добавки Вискодор ПВ-2 в концентрации не превышающей 2,5% все физико-химические показатели битумного вяжущего остаются в пределах значений, соответствующих ГОСТ 33133 для БНД 70/100.

Графически изменение показателей пенетрации для битума БНД 70/100 после модификации добавками представлено на рисунке 3.11.

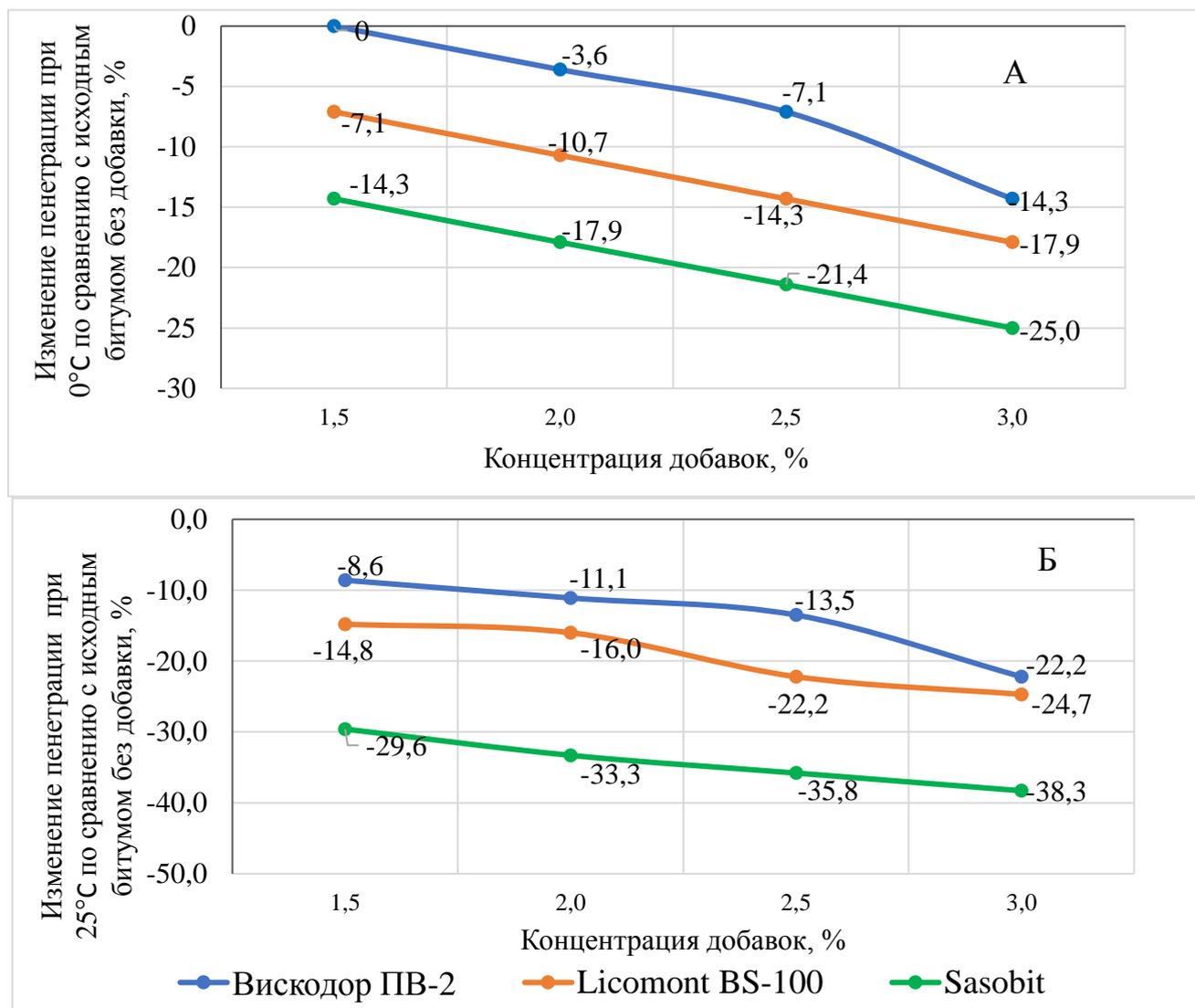


Рисунок 3.11 – Изменение пенетрации битума БНД 70/100 при модификации исследуемыми добавками: А – при 0°C; Б – при 25°C

Опираясь на результаты испытаний, можно констатировать, что для всех исследуемых добавок с увеличением концентрации показатель пенетрации при 0 и 25°C снижается, что обусловлено способностью восков структурировать битумное вяжущее. Также, как и в случае с битумом БНД 100/130, наибольшее снижение глубины проникания иглы наблюдается при введении добавки Sasobit. Так, при

введении 2,5% Sasobit пенетрация битума при температуре 25°C снижается на 35,8 %, а при 0°C – на 21,4%, в то время как введение такого же количества Licomont BS-100 дает снижение глубины проникания при 25°C на 22,2 %, а при 0°C – на 14,3%. Наименьшее снижение пенетрации при всех испытанных концентрациях наблюдается при введении Вискодор ПВ-2 (2,5 % добавки снижают пенетрацию вяжущего при 25°C – на 13,5%, а при 0°C – на 7,1%). Это связано с наличием в составе Вискодор ПВ-2 пластифицирующих компонентов. Следует отметить, что показатели пенетрации битумного вяжущего, модифицированного указанной добавкой в количестве до 2,5% включительно, как при температуре 25°C, так и при 0°C соответствуют ГОСТ 33133 для БНД 70/100. При повышении концентрации до 3%, показатель пенетрации при 25°C снижается до значения ниже соответствующего нормативным требованиям для БНД 70/100, что указывает на ухудшение пластических свойств вяжущего и ввиду этого может быть нецелесообразным для применения.

Изменение температуры размягчения по КиШ битума БНД 70/100 после модификации исследуемыми добавками представлено на рисунке 3.12.

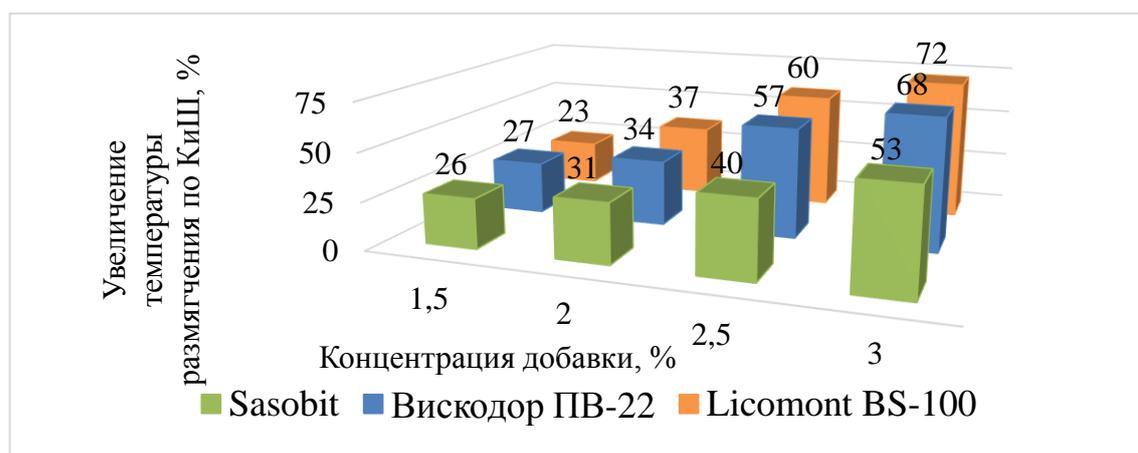


Рисунок 3.12 – Увеличение температуры размягчения модифицированного добавками битумного вяжущего в сравнении с исходным битумом БНД 70/100

Динамика изменения температуры размягчения битума БНД 70/100 при модификации исследуемыми добавками практически аналогична изменениям вяжущего на основе БНД 100/130. Наибольший прирост температуры размягчения при всех испытанных концентрациях наблюдается при введении добавки

Licomont BS-100, а наименьший для Sasobit. Но обе эти добавки несколько повышают температуру хрупкости вяжущего, что может отрицательно отразиться на устойчивости асфальтобетона к воздействию низких температур. Наибольшее повышение температуры хрупкости наблюдается при добавлении Sasobit (1,5% указанной добавки повышает температуру хрупкости на 1°С и далее повышение этого показателя коррелирует с увеличением концентрации).

Вискодор ПВ-2 не только не увеличивает, но и в концентрации до 2,5% понижает температуру хрупкости битумного вяжущего благодаря наличию в составе пластифицирующих веществ. Так, температура хрупкости битума при введении 2 и 2,5% Вискодор ПВ-2 снижается с минус 22°С до минус 24°С, Дальнейшее повышение концентрации добавки ведет к снижению температуры хрупкости. Так, данный показатель для вяжущего с 3,0% добавки равен минус 23°С. Благодаря снижению температуры хрупкости Вискодор ПВ-2 расширяет интервал работоспособности модифицированного битумного вяжущего. Поэтому несмотря на то, что добавка Licomont BS-100 значительно повышает температуру размягчения, наибольшее повышение интервала пластичности наблюдается при использовании добавки Вискодор ПВ-2, что отражено графически на рисунке 3.13.

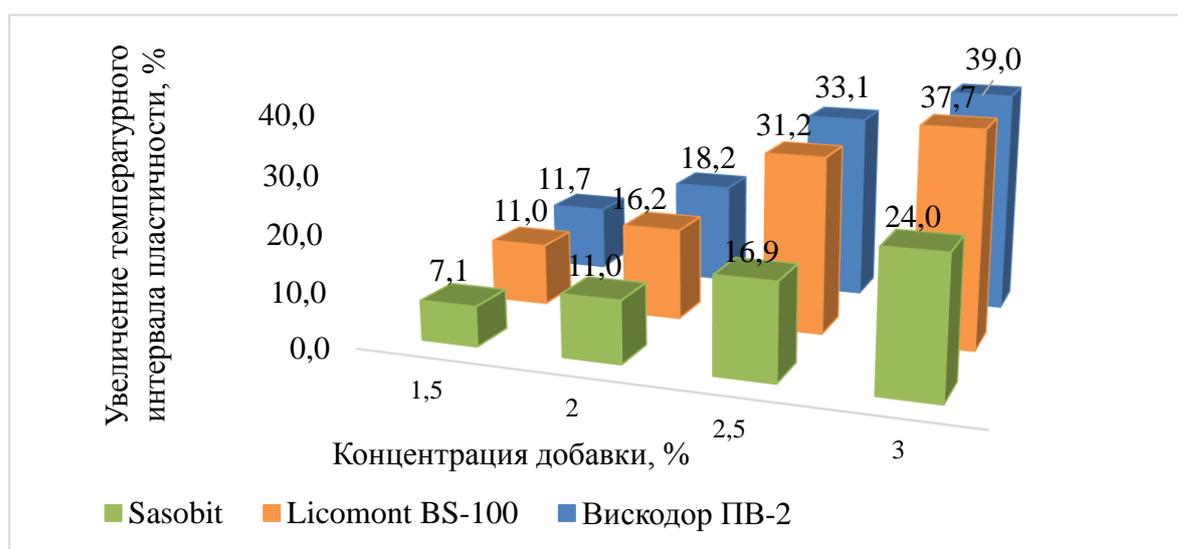


Рисунок 3.13 – Увеличение температурного интервала пластичности модифицированного битумного вяжущего в сравнении с исходным БНД 70/100

Опираясь на анализ полученных результатов, можно констатировать, что добавка Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 по эффекту расширения

температурного интервала пластичности значительно превосходят добавку Sasobit. Так, введение 1,5 % Sasobit повышает температурный интервал работоспособности вяжущего на 7,1 %, а Licomont BS-100 и Вискодор ПВ-2 на 11,0 и 11,7% соответственно. При дальнейшем увеличении концентрации отличие эффективности ещё более существенное. Так 3,0% Sasobit повышает интервал пластичности на 24,0%, в то время как Licomont BS-100 и Вискодор ПВ-2 на 37,7 и 39,0% соответственно. Наибольший эффект расширения интервала работоспособности битумного вяжущего демонстрирует добавка Вискодор ПВ-2 за счет увеличения не только температуры размягчения, но и снижения температуры хрупкости. Расширение температурного интервала пластичности позволит повысить устойчивость дорожного покрытия к пластическим деформациям в летний период и к трещинообразованию при низких зимних температурах.

Повышение структурированности вяжущего под воздействием восковых добавок отражается на таких важных показателях, характеризующих стойкость к механическим воздействиям, как растяжимость и когезия битумного вяжущего. Трансформация величин растяжимости битума и, характеризующего когезию, максимального усилия при растяжении при температуре 25°C под влиянием исследуемых добавок, графически представлена на рисунке 3.14.

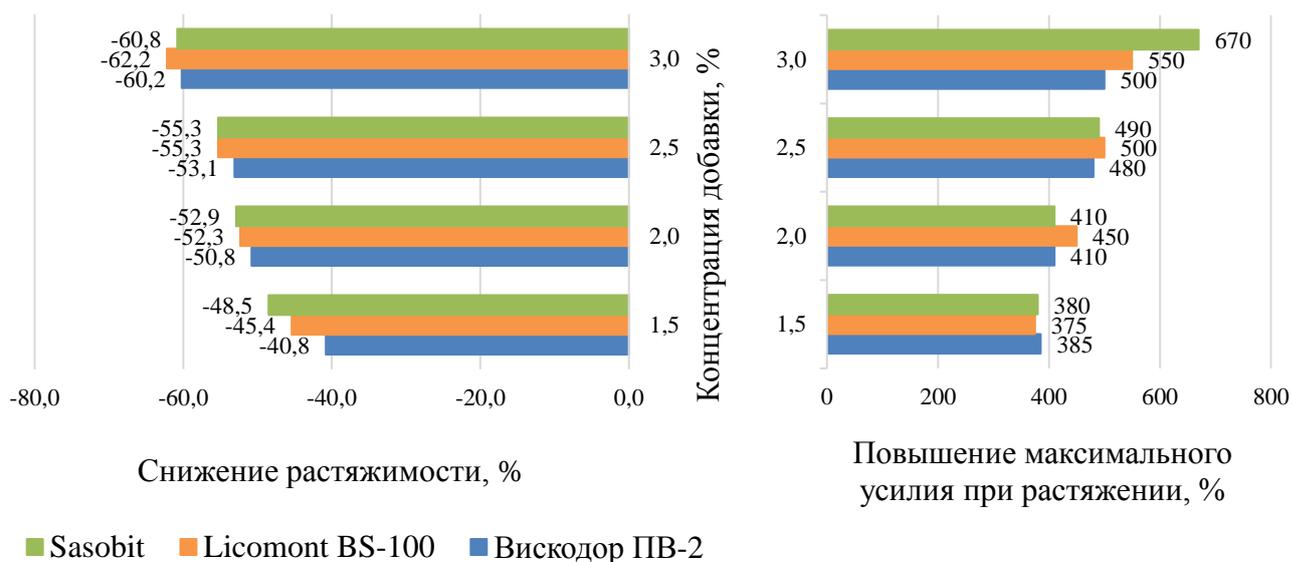


Рисунок 3.14 – Изменение растяжимости и когезионной прочности при 25°C битума БНД 70/100 после модификации исследуемыми добавками

Результаты, отображенные в таблице 3.7 и на рисунке 3.14 показывают, что применение добавок на основе синтетических восков вызывает снижение растяжимости битума при температуре 25°C, что ранее отмечено в исследованиях [96, 104, 117].

Зависимость снижения дуктильности от концентрации для модифицированных исследуемыми добавками вяжущих на основе битумов БНД 100/130 и БНД 70/100 практически аналогичная. С увеличением количества добавок происходило пропорциональное снижение растяжимости вяжущего, что указывает на повышение структурированности вяжущего с увеличением содержания восковых компонентов. Понижение величины дуктильности и увеличение максимального усилия при растяжении при 25°C коррелирует с увеличением концентрации как новой комплексной добавки Вискодор ПВ-2, так и импортных добавок Licomont BS-100 и Sasobit. Представленные на рисунке 3.14 диаграммы позволяют утверждать, что растяжимость битума при 25°C снижается всеми добавками практически одинаково. Так, модификация битума 1,5% Вискодор ПВ-2, Sasobit и Licomont BS-100 снижает дуктильность битума при 25 °C на 40,8%, 45,4%, и 48,5%, а введение 3,0% этих добавок – на 60,2, 62,2 и 60,8% соответственно, что очень близко по значению.

Измерение максимального усилия при растяжении битума дает возможность оценить его когезионные характеристики [157 – 159]. Результаты испытаний показывают, что с повышением концентрации исследуемых добавок максимальное усилие при растяжении возрастает, что, в свою очередь, свидетельствует об увеличении когезионной прочности вяжущего и будет способствовать повышению усталостной долговечности вяжущего. При этом возрастание когезионной прочности при температуре 25°C в концентрации до 2,5% практически одинаково для всех исследуемых добавок. Так, возрастание максимального усилия при растяжении при 25°C после модификации вяжущего добавками Вискодор ПВ-2, Licomont BS-100 и Sasobit в концентрации 2% возрастает на 410, 450 и 410%, а в концентрации 2,5% – на 480, 500 и 490% соответственно. В концентрации 3% наибольшие показатели максимального усилия при растяжении выявлены для

вяжущего модифицированного Sasobit. Так, 3 % указанной добавки повышают когезионную прочность на 670 %. Введение 3% Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 повышают этот показатель на 500 и 550% соответственно.

Влияние исследуемых добавок на растяжимость и максимальное усилие при растяжении при 0°C, характеризующие пластичность битума при понижении температуры, графически представлено на рисунке 3.15.

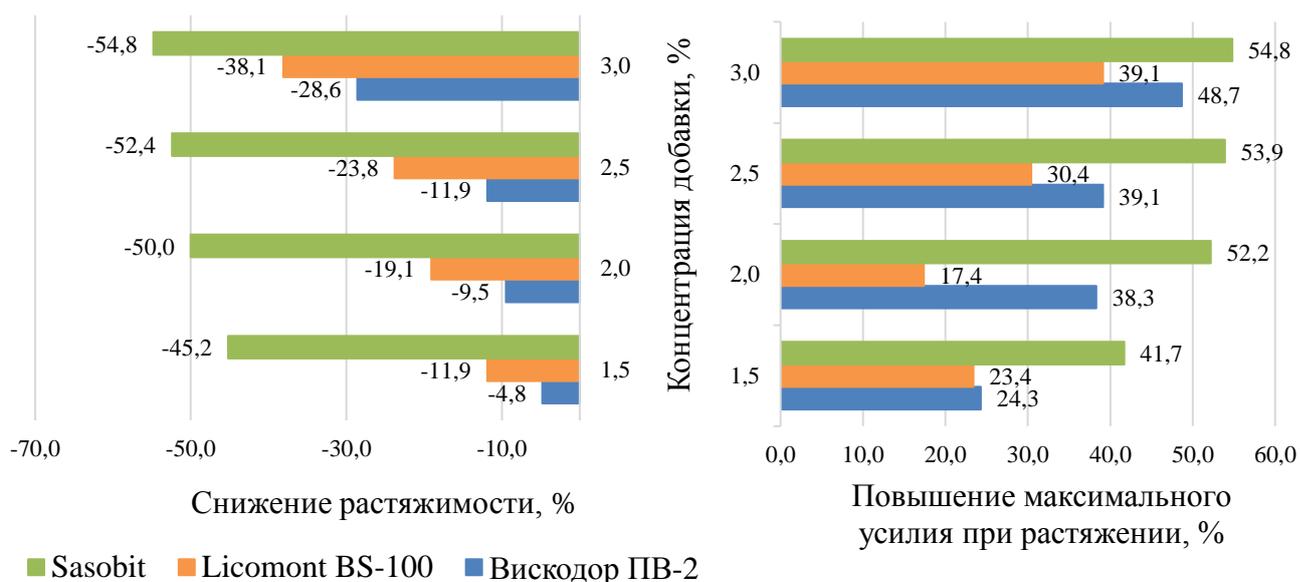


Рисунок 3.15 – Изменение растяжимости и когезионной прочности при 0°C битума БНД 70/100 после модификации исследуемыми добавками

Влияние исследуемых добавок на показатель растяжимости битума при 0°C, существенно различается. Наибольшее снижение дуктильности при 0°C выявлено при введении модификатора Sasobit. Так, уже при введении 1,5% указанной добавки дуктильность вяжущего при 0°C снижается на 45,2 %, в то время как 1,5 % добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 дают снижение растяжимости при 0°C при данной концентрации только на 4,8 и 11,9 % соответственно. Таким образом, применение добавки Sasobit может привести к значительному снижению пластических свойств вяжущего при низких температурах, что может негативно сказаться на устойчивости дорожного покрытия к воздействию низких температур зимнего периода.

Применение Вискодор ПВ-2 позволяет минимизировать ухудшение низкотемпературной дуктильности, поскольку при введении указанной добавки

для всех испытанных концентраций наблюдалось минимальное снижение данного показателя, что объясняется присутствием в составе добавки пластифицирующих компонентов. Таким образом, замена импортных восковых модификаторов Sasobit и Licomont BS-100 комплексной добавкой Вискодор ПВ-2 позволит улучшить низкотемпературные характеристики вяжущего, а, следовательно, и срок службы асфальтобетона.

Также следует обратить внимание, что при повышении концентрации исследуемых добавок до 3% интенсивность снижения низкотемпературной дуктильности усиливается, что является негативным фактором. Это важно учитывать при подборе оптимальных составов вяжущего для асфальтобетона.

Характер влияния исследуемых модификаторов на максимальное усилие при растяжении при температуре 0 °С несколько различается. Так наибольшее повышение данного показателя вызывает Sasobit, но динамика его изменения в зависимости от концентрации незначительна. Так, 1,5% добавки повышают когезионную прочность при 0°С на 41,7%, а 3,0% – на 54,8%. В сочетании с наибольшим снижением растяжимости при 0°С это может свидетельствовать о повышении хрупкости битума, ухудшении его пластических свойств уже при концентрации 1,5%. Наименьшие значения максимального усилия при растяжении при 0°С получены при введении Licomont BS-100, и в этом случае зависимость величины показателя от введенной концентрации наиболее существенная среди испытанных добавок: 1,5% дают увеличение на 23,4%, тогда как 3,0% – на 39,1%. При введении добавки Вискодор ПВ-2 в количестве 1,5 и 3,0% наблюдается увеличение когезионной прочности при 0°С на 24,3 и 48,7 % соответственно, что ниже показателей Sasobit, но выше чем для Licomont BS-100. В сочетании с наименьшим снижением дуктильности при 0°С это может свидетельствовать о повышении прочностных свойств с одновременным сохранением пластичности при низких температурах, что должно положительно отразиться на эксплуатационных характеристиках вяжущего при низких температурах.

Следует отметить, что при увеличении концентрации добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 до 3% наблюдается более резкое снижение растяжимости

битума при 0°C, что может отрицательно сказаться на морозоустойчивости дорожного покрытия. Таким образом, исходя из данных по изменению пенетрации при 0°C, температуры хрупкости и растяжимости при 0°C была выбрана наиболее рациональная концентрация введения добавки Вискодор ПВ-2 в битум БНД 70/100 для дальнейшего испытания литых асфальтобетонных смесей, максимально повышающая интервал пластичности и не приводящая к значимому снижению низкотемпературных характеристик вяжущего – 2,5%. Концентрация добавок Sasobit и Licomont BS-100 была выбрана аналогичной для получения сопоставимых результатов исследования.

При более низких температурах приготовления и укладки асфальтобетонных смесей наблюдается уменьшение поверхностного натяжения битума, что может привести к снижению адгезии вяжущего к минеральным материалам. Поэтому при выборе добавок для теплых асфальтобетонных смесей ключевым аспектом является получение вяжущего с отличными адгезионными характеристиками, которые обеспечивают надежное и стойкое соединение с поверхностью минеральных материалов.

Исследование адгезионных свойств битума к минеральному материалу проводилось по методикам согласно ГОСТ 58406.2 (приложение Г) и ГОСТ 11508. Также процессы химического взаимодействия, влияющие на адгезионные свойства, были исследованы посредством изучения ИК-спектров модельных составов вяжущего с введением 10% исследуемых модификаторов до и после взаимодействия с минеральным материалом. В качестве минерального материала был выбран щебень гранитный фракции 8-16 и песок из отсевов дробления гранитного щебня фракции 0-4 мм производства ОАО «Павловск Неруд», так как в дальнейшем указанные материалы были использованы для приготовления асфальтобетонных смесей.

На рисунке 3.16 представлен внешний вид гранитного щебня с битумным покрытием после кипячения в дистиллированной воде по ГОСТ 58406.2, а на рис. 3.17 – внешний вид отсева гранита после кипячения по ГОСТ 11508.



Рисунок 3.16 – Внешний вид щебня с битумным покрытием после кипячения: 1 – БНД 100/130 без добавок; 2,3,4 и 5 – с 1,5, 2, 2,5 и 3% Вискодор ПВ-2; 6, 7 – с 2 и 3% Sasobit; 8, 9 – т с 2 и 3% Licomont BS-100

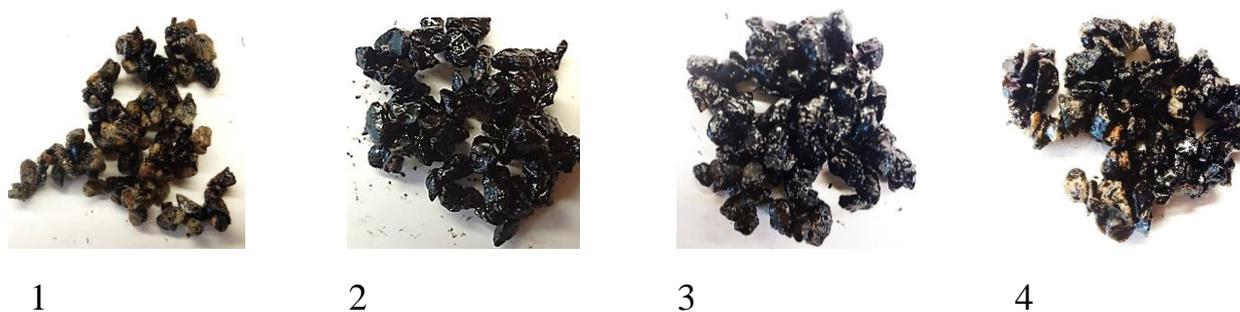


Рисунок 3.17– Внешний вид гранитного отсева с битумным покрытием после кипячения: 1) Битум БНД 70/100 без добавок; 2) 2,5% Вискодор ПВ-2; 3) 2,5% Licomont BS-100; 4) 2,5% Sasobit.

Как видно из полученных результатов, все исследуемые добавки вызывают улучшение адгезионных характеристик битумного вяжущего. Наибольший эффект повышения показателей сцепления с каменным материалом выявлен при модификации битума при помощи Вискодор ПВ-2, что закономерно, так как в состав добавки введены катионные ПАВ на основе продуктов конденсации растительных жирных кислот и полиаминов, эффективность которых в качестве промоторов адгезии, работающих в очень низких концентрациях доказана множеством исследований [60, 160 – 162].

Так, при оценке адгезионных свойств образцов модифицированных вяжущих по методике ГОСТ 58406.2 9 (рисунок 3.16), было выявлено, что исходный битум

обладает неудовлетворительным показателем сцепления (2 балла, покрытие битумом после кипячения менее 50% поверхности камня). Введение в битум Вискодор ПВ-2 в количестве 1,5 и 2,0% повысило адгезию вяжущего со щебнем с 2 до 4 баллов. Повышение концентрации содержащего Вискодор ПВ-2 до 2,5% и выше позволило получить показатели адгезии, соответствующие оценке 5 баллов (отлично). Согласно оценке адгезионных свойств по ГОСТ 11508 (рисунок 3.17 и таблица 3.8), показатель сцепления вяжущего, модифицированного 2,5% Вискодор ПВ-2, также довольно значительно повысился - до соответствия образцу №1 по сравнению с исходным битумом, показатель сцепления которого соответствовал образцу №2. Воски Sasobit и Licomont BS-100 увеличивают адгезию вяжущего менее значительно. Показатель сцепления вяжущего с 2 и 3% Licomont BS-100 со щебнем по ГОСТ 58406.2 оценен в 2 и 3 балла соответственно, а с 2 и 3% Sasobit – в 3 балла. Согласно испытанию по ГОСТ 11508 модификация битума 2,5% как Sasobit, так и Licomont BS-100 повысила сцепление вяжущего с минеральным материалом до соответствия образцу №2. Оценка адгезионных свойств исходного и модифицированного добавками битума количественным (весовым) методом (таблица 3.8) также показала высокую способность добавки Вискодор ПВ-2 улучшать адгезионные свойства битумного вяжущего.

Таблица 3.8– Сцепление с гранитом исходного и модифицированного битума

Добавка	Концентрация, %	Оценка адгезии весовым методом, %	По ГОСТ 11508, соответствует образцу, №
БНД 70/100 без добавки	0	21	3
Sasobit	1,5	36	3
	2,0	45	3
	2,5	75	2
	3,0	79	2
Licomont BS-100	1,5	48	3
	2,0	56	3
	2,5	77	2
	3,0	80	2
Вискодор ПВ-2	1,5	78	2
	2,0	84	2
	2,5	96	1
	3,0	99	1

Таким образом, наличие в составе добавки Вискодор ПВ-2 катионных поверхностно-активных веществ дает значительное преимущество, позволяя значительно увеличивать адгезионные свойства битумного вяжущего, что будет способствовать повышению устойчивости к воздействию воды, износостойкости и долговечности дорожного покрытия.

Для изучения механизма адгезионного взаимодействия модифицированных исследуемыми добавками битумов с каменными материалами было применено исследование ИК-спектров вяжущего после взаимодействия с заполнителем. Для этого были исследованы модельные составы с 10% исследуемых восковых добавок, которые наносились на гранитный щебень, затем пленка битумного вяжущего снималась с поверхности и использовалась для приготовления изучаемого препарата, посредством смешения с KBr. Полученные ИК-спектры представлены на рисунках 3.18 – 3.20.

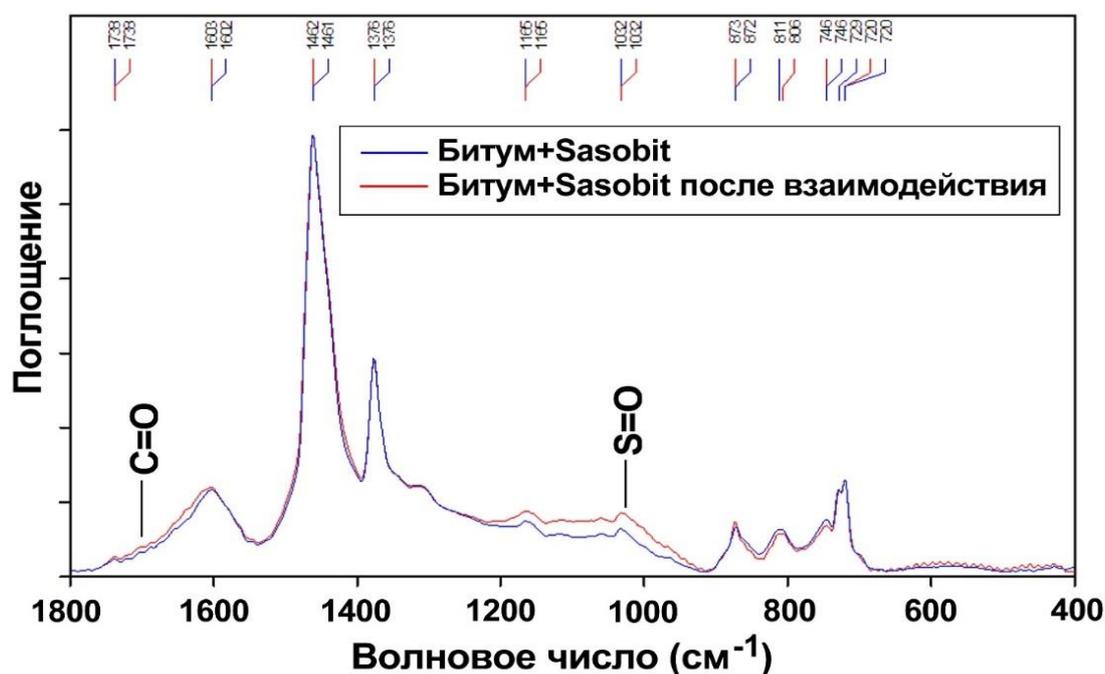


Рисунок 3.18 – ИК-спектры вяжущего, модифицированного Sasobit, до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева

При анализе ИК-спектров вяжущего, модифицированного добавкой Sasobit до и после взаимодействия с каменным материалом (рисунок 3.18), не выявлено значительного изменения кривых ИК-спектра. Изменение высоты пика 1031 см⁻¹, соответствующее наличию сульфоксидных групп S=O [151], и области ~900–1200 см⁻¹ связано с содержанием в битуме, снятом с минеральной поверхности,

микрочастиц гранита – полиминеральной алюмосиликатной породы, имеющей максимумы поглощения на ИК-спектрах именно в этом диапазоне [163]. Значимых изменений в интенсивности полос ИК-спектра не наблюдается, поскольку добавка Sasobit не содержит поверхностно-активных веществ. Взаимодействие с поверхностью твердых частиц в этом случае происходит в основном за счет физических процессов, а не хемосорбционных. Этим и объясняется невысокий показатель сцепления вяжущего с минеральным материалом (рисунки 3.16 и 3.17).

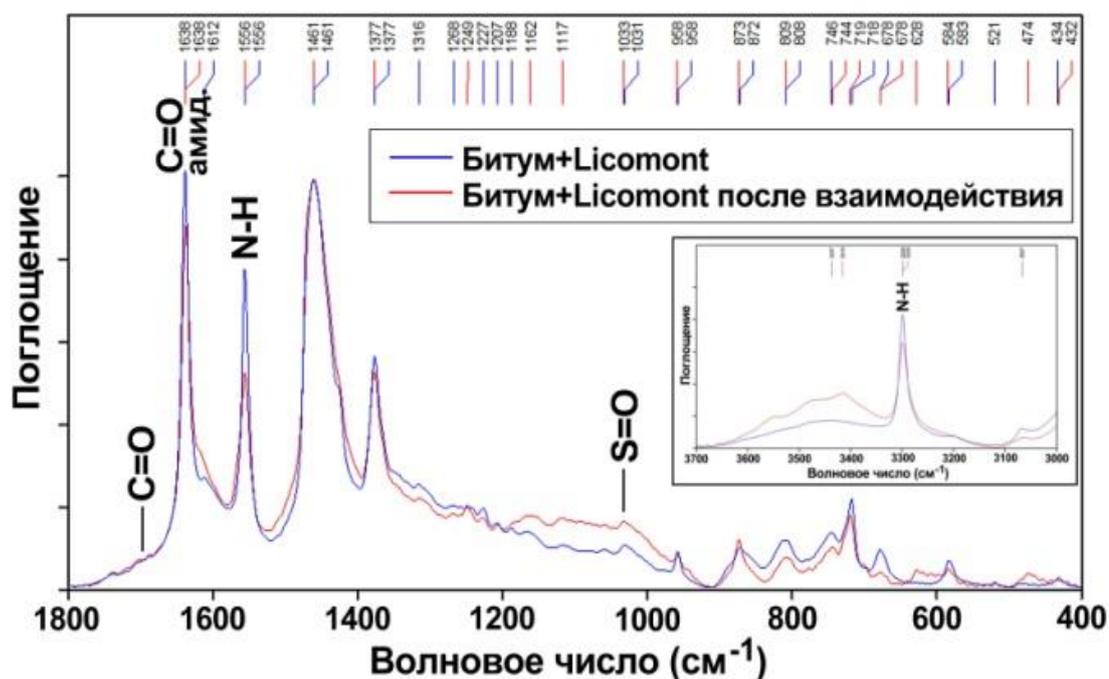


Рисунок 3.19 – ИК-спектры вяжущего, модифицированного Licomont BS-100, до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева

При сравнении ИК-спектров вяжущего, модифицированного Licomont BS-100, полученных при анализе образцов до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева (рисунок 3.19), выявлено существенное снижение интенсивности пиков, соответствующих таким функциональным группам, как N-H (3299 и 1556 cm^{-1}) и C=O в амидах (1638 cm^{-1}) [153, 154], что свидетельствует о том, что характер взаимодействия вяжущего с минеральным материалом носит не только физический, но и хемосорбционный характер. Это обусловлено тем, что модификатор Licomont BS-100 представляет собой амидный воск, содержащий в своем составе катионные поверхностно-активные вещества в виде амидов насыщенных жирных кислот. Но вследствие того, что реакционные группы в

составе добавки имеют связи с длинноцепочечными углеводородными структурами, обладающими большой молекулярной массой, действие таких ПАВ сосредоточено в местах контакта воска в массе битума с минеральной поверхностью. Этим можно объяснить недостаточно высокую в сравнении с Вискодор ПВ-2 адгезию модифицированного вяжущего с минеральным наполнителем.

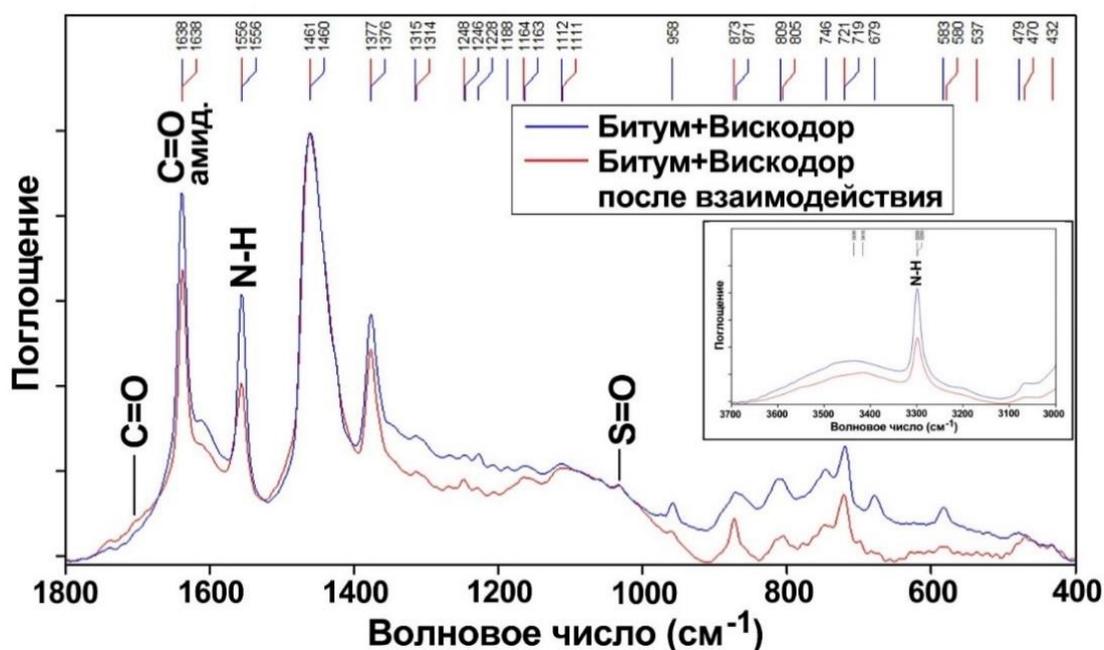


Рисунок 3.20 – ИК-спектры вяжущего, модифицированного Вискодор ПВ-2, до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева

ПАВ, основанные на амидных и аминных соединениях жирных кислот, содержащиеся в Вискодоре ПВ-2 (рисунок 3.20), способствуют возникновению химического взаимодействия битумного вяжущего с активными центрами на поверхности гранита в дополнение к физическому взаимодействию, которое проявляется на границе фаз. Это подтверждается данными ИК-спектроскопии: после взаимодействия наблюдается значительное снижение интенсивности пиков функциональных групп N-H (3299 и 1556 cm^{-1}) добавки, а также C=O в амидах (1638 cm^{-1}) (рисунок 3.20). В целом, полученные спектры напоминают ИК-спектры битума, модифицированного добавкой Licomont BS-100 (рисунок 3.19). Однако в составе Вискодора ПВ-2 активные группы присутствуют не только в амидных восках, как в Licomont BS-100, но и в отдельных ПАВ, таких как имидазолины, амидоамины и амины, имеющих более высокую адгезионную эффективность [157].

Таким образом, катионные ПАВ в составе Вискодор ПВ-2 обеспечивают высокое сцепление вяжущего с каменным материалом, превосходящим другие составы.

3.5 Влияние исследуемых добавок на реологические свойства вяжущего

Реологические свойства битумного вяжущего во многом определяют его поведение в составе асфальтобетонной смеси как при технологических операциях, так и в процессе эксплуатации дорожного покрытия. Важной реологической характеристикой битумного вяжущего является его вязкость. Этот показатель является ключевым при выборе температурного режима приготовления и уплотнения асфальтобетонной смеси.

Для оценки реологических свойств были использованы образцы битума БНД 70/100 исходного и модифицированного двумя процентами добавок Вискодор ПВ-2, Licomont BS-100 и Sasobit.

Вязкость для каждого образца битумного вяжущего определялась в диапазоне температур 100 - 165° в процессе охлаждения после его приготовления, а затем в процессе разогрева вяжущего. Полученные результаты графически представлены на рисунке 3.21.

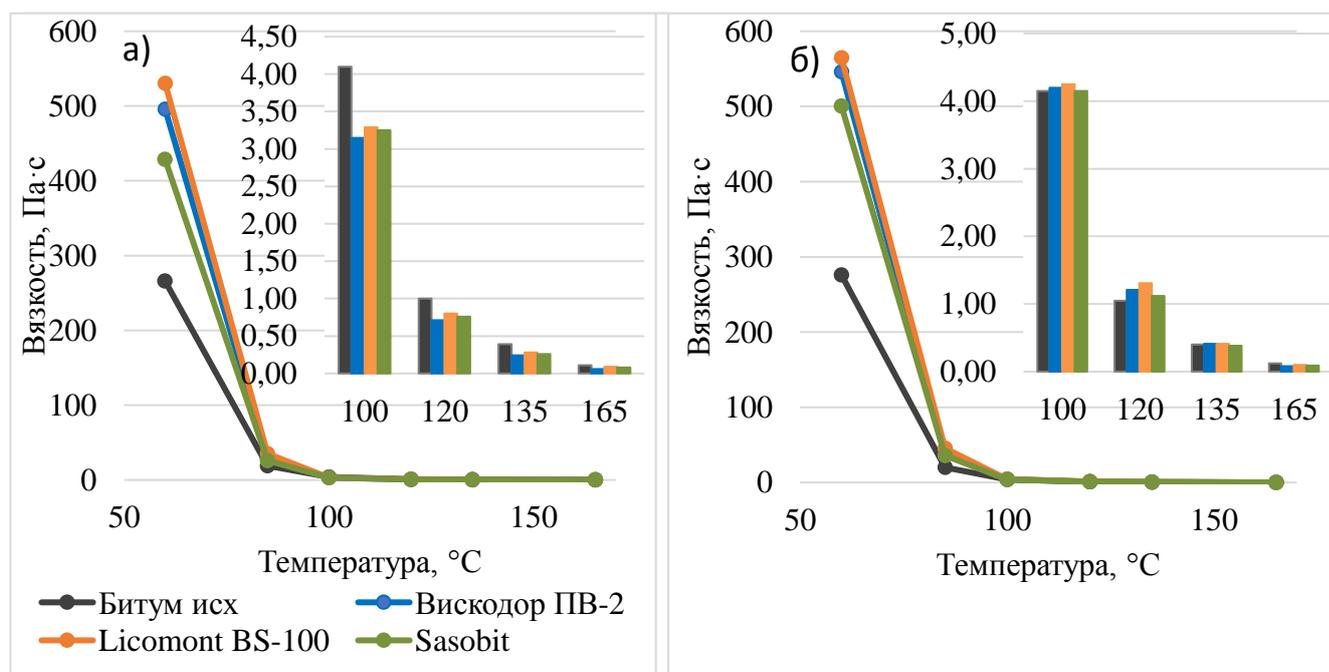


Рисунок 3.21 – Изменение вязкости исходного битума БНД 70/100 и модифицированного исследуемыми добавками при разных температурах, определенное при процессах: а) охлаждения и б) разогрева вяжущего

Представленные результаты показывают, что при использовании всех исследуемых добавок вязкость битумного вяжущего при температурах 135 – 165°C снижается. В процессе охлаждения модифицированного вяжущего со 165°C до 100°C наблюдается меньший рост вязкости по сравнению с исходным битумом, что объясняется тем, что воски выше температуры их плавления разжижают вяжущее, и разжижающий эффект сохраняется до начала кристаллизации ниже температуры их застывания. Наименьшая вязкость при высоких технологических температурах выявлена у образца вяжущего, модифицированного Вискодор ПВ-2, что связано с наличием пластифицирующих компонентов и катионных ПАВ, увеличивающих температуропонижающий эффект этой добавки. Добавки Licomont BS-100 и Sasobit оказывают менее значительное и близкое по значению друг к другу снижение показателя вязкости. Так, при 100°C вязкость исходного битума составляет 4,10 Па*с, вяжущего, модифицированного Вискодор ПВ-2 – 3,15 Па*с, Licomont BS-100 – 3,29 Па*с и Sasobit – 3,25 Па*с. Таким образом, применение исследуемых добавок повысит подвижность асфальтобетонной смеси и позволит производить ее приготовление и укладку при более низких температурах. В то же время вязкость модифицированного добавками вяжущего при температурах ниже 100°C выше вязкости исходного битума, что объясняется застыванием частиц воска, образующим в вяжущем сетчатых структур. Таким образом, применение исследуемых добавок улучшит устойчивость асфальтобетона к повышенным температурам и нагрузкам при эксплуатации дорожного покрытия.

Обнаружено, что динамика изменения вязкости битумного вяжущего, модифицированного исследуемыми добавками и немодифицированного битума, в процессах охлаждения и нагревания существенно отличается. Вязкость немодифицированного БНД 70/100, определенная при равных температурах, практически одинакова при нагреве и при охлаждении. В то же время показатели вязкости модифицированного восковыми добавками битумного вяжущего при нагреве до 120°C, значительно выше значений, измеренных в процессе понижения температуры и выше вязкости исходного битума. Так, в процессе охлаждения при 120°C вязкость исходного битума, составила 1,00 Па*с, а вязкость образцов

вяжущего, модифицированного Вискодор ПВ-2, Licomont BS-100 и Sasobit – 0,71, 0,80 и 0,76 Па*с соответственно, а в процессе подъема температуры при 120°С вязкость немодифицированного битума, составила 1,05 Па*с, вязкость образцов вяжущего с Вискодор ПВ-2, Licomont BS-100 и Sasobit – 1,21, 1,31 и 1,12 Па*с соответственно. Это связано с тем, что разрушение сформированной воском структуры происходит при более высокой температуре (коррелирующей с точкой его плавления), чем образование структуры (температура коррелирует с точкой застывания). Таким образом, применение исследуемых восковых добавок будет способствовать снижению температуры укладки асфальтобетонной смеси, и при этом обеспечивать повышение физико-механических свойств (прочность, теплоустойчивость и сдвигоустойчивость) и эксплуатационных свойств (устойчивость к колееобразованию).

Для оценки функциональных свойств битумных вяжущих, модифицированных исследуемыми добавками, были проведены испытания согласно требованиям объемно-функционального проектирования по ГОСТ Р 58400.1–2019, основанного на разработанной в США методологии проектирования составов асфальтобетонных смесей для дорожных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками Superpave (от англ. Superior Performing Asphalt Pavements) [164]. Принципы проектирования по Superpave позволяют получить дорожное покрытие с увеличенными сроками эксплуатации. На основе показателей сдвиговой устойчивости, жесткости и ползучести определен температурный диапазон эксплуатации битумного вяжущего, позволяющий классифицировать марку вяжущего по PG (Performance Grade) в соответствии с ГОСТ Р 58400.1–2019. Эта классификация позволяет при проектировании асфальтобетонных смесей производить подбор битумного вяжущего с учётом особенностей климатических условий и интенсивности нагрузок в регионе. Результаты испытаний представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Реологические свойства исходного и модифицированного добавками битума БНД 70/100

Наименование показателя	Фактические показатели				Требования ГОСТ Р 58400.1–2019	
	битум без добавок	Licomont BS-100	Sasobit	Вискодор ПВ-2		
Исходное битумное вяжущее						
Динамическая вязкость при 135°C, Па·с,	0,388	0,276	0,257	0,243	не более 3	
Динамическая вязкость при 165°C, Па·с,	0,110	0,093	0,081	0,063	не более 3	
Сдвиговая устойчивость при 10 рад/с, кПа при температуре испытания, °С	1,40	1,69	1,47	1,52	не менее 1	
	58	64	64	64		
Битумное вяжущее, состаренное по методу RTFOT						
Изменение массы после старения, %	0,28	0,18	0,20	0,16	не более 1	
Сдвиговая устойчивость при 10 рад/с, кПа при температуре испытания, °С	3,38	2,92	2,84	2,71	не менее 2,2	
	58	64	64	64		
Битумное вяжущее, подготовленное по методу PAV						
Усталостная устойчивость при 10 рад/с, кПа	при 28°C	1096	1176	984	1134	не более 5000
	при 25°C	792	835	719	829	не более 5000
Жесткость, S при минус 6°C, МПа	29,3	47,5	49,5	32,3	не более 300	
Ползучесть m, при минус 6°C	0,355	0,315	0,311	0,347	не менее 0,3	
Жесткость, S при минус 12°C, МПа	62,6	84,5	87,3	70,7	не более 300	
Ползучесть m, при минус 12°C	0,315	0,277	0,268	0,305	не менее 0,3	
Марка вяжущего по ГОСТ Р 58400.1 (марка по PG)	58-22	64-16	64-16	64-22		

Согласно приведенным результатам, можно констатировать, что испытанные восковые модификаторы повышают сдвиговую устойчивость вяжущего. Так, сдвиговая устойчивость исходного битума при 58°C составляет 1,40 кПа, в то время как при модификации вяжущего исследуемыми добавками сдвиговая устойчивость при 10 рад достигает величины более 1 кПа при температуре испытания - 64°C. Для вяжущего с Вискодор ПВ-2 этот показатель составляет 1,52 кПа, с Licomont BS-100 – 1,69 кПа, а с Sasobit – 1,47 кПа. После старения RTFOT сдвиговая устойчивость исходного битума достигает требуемой по ГОСТ величины также при 58°C, а модифицированных добавками образцов вяжущего – при 64°C. Таким образом, исследуемые добавки повышают определяемый сдвиговой устойчивостью верхний температурный предел эксплуатации битумного вяжущего (максимальную расчетную температуру слоя) с 58 до 64°C. Это позволит повысить устойчивость дорожного полотна к колееобразованию.

Меньшее изменение массы и сдвиговой устойчивости вяжущего после старения по методу RTFOT свидетельствуют о снижении процессов старения и коррелируют с результатами, полученными в разделе 3.4. Наименьшее изменение показателей вызывает введение добавки Вискодор ПВ-2. Так величина изменения массы для исходного битума – 0,28%, а для битума, модифицированного Вискодор ПВ-2 – 0,16%; сдвиговая устойчивость исходного битума после старения изменяется на 141,4%, а с добавкой – на 78,2%. Это повысит срок службы асфальтобетона.

Добавки Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 повышают усталостную устойчивость, характеризующую способность битумного вяжущего сопротивляться усталостному растрескиванию под действием многократных нагрузок. Так, добавка Вискодор ПВ-2 повышает усталостную устойчивость вяжущего с 1096 кПа до 1176 кПа, а Licomont BS-100 – до 1134 кПа. Это будет способствовать повышению срока службы дорожного покрытия. Добавка Sasobit несколько снижает данный показатель по сравнению с исходным битумом (до 984 кПа), что является негативным фактором.

Представленные результаты по низкотемпературной устойчивости битумного вяжущего, определяемой показателями жесткости и ползучести, свидетельствуют, что полиэтиленовый воск Sasobit и амидный воск Licomont BS-100 повышают нижний температурный предел эксплуатации вяжущего (минимальную расчетную температуру слоя), что ухудшит устойчивость дорожного покрытия к низким температурам зимнего периода. Так, ползучесть исходного битума при температуре минус 12°C составляет 0,315, а вяжущего с Licomont BS-100 и Sasobit – 0,277 и 0,268 соответственно, что ниже требуемого значения. Таким образом, указанные добавки изменяют марку вяжущего по PG, повышая верхний температурный предел эксплуатации и снижая нижний (с 58-22 – для исходного битума до 64-16 для модифицированного вяжущего), что является негативным фактором при эксплуатации в регионах России с низкими зимними температурами.

Комплексная добавка Вискодор ПВ-2, снижает показатель ползучести очень незначительно – до 0,305, позволяя битумному вяжущему сохранить нижний температурный предел на уровне исходного битумного вяжущего. Это обусловлено наличием в составе пластификатора. Соответственно, применение добавки Вискодор ПВ-2 позволяет расширить температурный интервал эксплуатации, повышая его верхний предел и сохраняя нижний. Добавка улучшает марку битумного вяжущего, изменяя ее до 64-22 с 58-22 – для исходного БНД 70/100, что является явным преимуществом Вискодор ПВ-2.

3.6 Влияние добавок на основе синтетических восков на изменение динамики термоокислительной деструкции вяжущего

В процессе приготовления, транспортировки и хранения асфальтобетонных смесей при высокой температуре битумное вяжущее подвергается неизбежным физико-химическим процессам, связанным с термодеструкцией составляющих его компонентов [165]. Сочетание изменений состава, структуры и физико-химических свойств битумного вяжущего, возникающих в течение технологических процессов приготовления, хранения и эксплуатации асфальтобетонной смеси, называют

старением битума. Групповой состав битума вследствие старения претерпевает значительные изменения: содержание масел уменьшается, а доля смол и асфальтенов возрастает. В итоге понижаются пластические свойства вяжущего, повышается его вязкость, температура размягчения, жесткость [23], что становится причиной повышения склонности дорожного полотна к хрупким разрушениям при низких температурах, выкрашиванию и трещинообразованию. В результате этого срок службы дорожного полотна значительно сокращается. Важно отметить, что наиболее интенсивно процессы старения протекают на этапе приготовления и укладки асфальтобетонной смеси, что подтверждают исследования [166]. Это обусловлено тем, что битумное вяжущее находится на поверхности минерального наполнителя в виде тонких пленок и подвергается воздействию высоких температур и кислорода воздуха, что способствует интенсивному протеканию термоокислительных реакций [51].

При выборе состава битумного вяжущего необходимо учитывать влияние вносимых модификаторов на динамику процессов термоокислительного старения. Таким образом, очень важны исследования закономерностей изменения характеристик модифицированного исследуемыми добавками вяжущего в процессе старения.

В работе, с целью оценки влияния исследуемых добавок на процессы термоокислительного старения вяжущего [111], была выбрана концентрация 2% каждой из добавок, так как именно эта концентрация оказалась рациональной для получения эффективных составов вяжущих для асфальтобетонных смесей, согласно результатам исследования физико-химических свойств образцов модифицированного битума, опубликованным в работе [112]. Подготовленные образцы битума БНД 100/130, модифицированного двумя процентами добавок Вискодор ПВ-2, Sasobit и Licomont BS-100 распределялись равномерным слоем толщиной 4 мм по дну чашек Петри и подвергались термостатированию при температуре 163°C в течение 5, 7 и 9 часов. Затем определялись физико-химические свойства образцов исходного и модифицированного вяжущего до и

после термостатирования. Результаты испытаний представлены в таблице 3.9, а также на рисунках 3.19 и 3.20.

Таблица 3.9 – Влияние термоокислительного старения на физико-химические свойства исходного и модифицированных битумов

Добавка	Глубина проникания иглы при 25 °С, 0,1 мм				Температура размягчения по «КиШ», °С			
	Время термостатирования, час							
	0	5	7	9	0	5	7	9
Без добавки	113	77	71	76	45	49	51	52
Вискодор ПВ-2	102	85	80	77	63	63	65	66
Licomont BS-100	77	54	49	47	62	64	65	66
Sasobit	65	48	45	43	63	66	68	69

Полученные результаты демонстрируют, что для всех образцов битума, модифицированного исследуемыми добавками, характерны: менее выраженное снижение пенетрации (рисунок 3.22) и повышение температуры размягчения, уменьшение потери массы после термостатирования (рисунок 3.23) по сравнению с показателями немодифицированного битума. Это указывает на то, что все протестированные добавки оказывают ингибирующее воздействие на процессы термоокислительной деструкции, протекающие в битуме при старении.

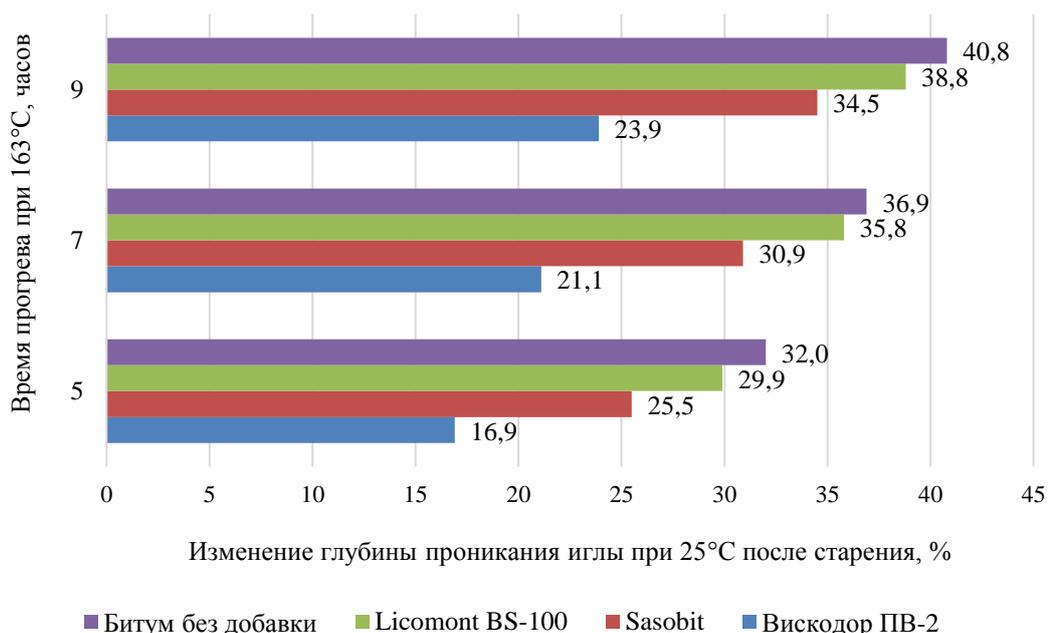


Рисунок 3.22 – Изменение пенетрации вяжущего после термостатирования

Данные, представленные в таблице 3.12 и на рисунке 3.22, показывают, что показатель пенетрации битумного вяжущего, модифицированного добавкой Вискодор ПВ-2, менее подвержен изменениям после старения. В частности, после 5 часов термостатирования при 163°C, глубина проникания иглы при 25°C для указанного образца уменьшилась на 16,9%, а после 7 и 9 часов — на 21,1% и 23,9% соответственно. В то же время изменение пенетрации битума без добавки уже через 5 часов составило 32%. Это обусловлено наличием аминных поверхностно-активных веществ в составе Вискодор ПВ-2, которые, согласно литературным источникам [51, 60], обладают ингибирующим действием и замедляют процессы термодеструкции. Изменения показателей глубины проникания иглы для составов с восками Sasobit и Licomont BS-100 также оказались ниже, чем у исходного битума, но ингибирующий эффект проявился в меньшей степени.

Оценка показателей температуры размягчения для анализируемых образцов (таблица 3.12) позволяет утверждать, что тестируемые органические добавки позволяют снизить изменение этого показателя при нагреве, что также указывает на улучшение стойкости битума к процессам технологического старения. Наибольшее ингибирующее воздействие также продемонстрировала добавка Вискодор ПВ-2. В частности, после 5 часов термостатирования при 163°C температура размягчения по КиШ для модифицированного указанной добавкой вяжущего осталась неизменной, а после 9 часов – возросла всего на 3°C. Образцы вяжущего, модифицированного Licomont BS-100 и Sasobit, также продемонстрировали способность этих добавок снижать интенсивность изменения температуры размягчения в процессе старения. Так, 5, 7 и 9 часов прогрева битумного вяжущего, модифицированного Licomont BS-100, вызвало изменение температуры размягчения на 2, 3 и 4°C, а для вяжущего с Sasobit эти изменения составили 3, 5 и 6°C соответственно.

Основным показателем, согласно ГОСТ 18180, позволяющим оценить скорость термоокислительного старения, является изменение массы после прогрева в тонком слое. По полученным данным (рисунок 3.23), все тестируемые модификаторы продемонстрировали положительное воздействие на стойкость

битумного вяжущего к процессам термодеструкции. Лучшие результаты были достигнуты при модификации вяжущего добавками Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100. В частности, потеря массы вяжущего с добавкой Вискодор ПВ-2 после 9 часов термостатирования составила 0,04%, в то время как битум с Licomont BS-100 показал потерю массы в 0,05%. Для исходного битума за тот же период термостатирования при 163°C, потеря массы составила 0,08%.

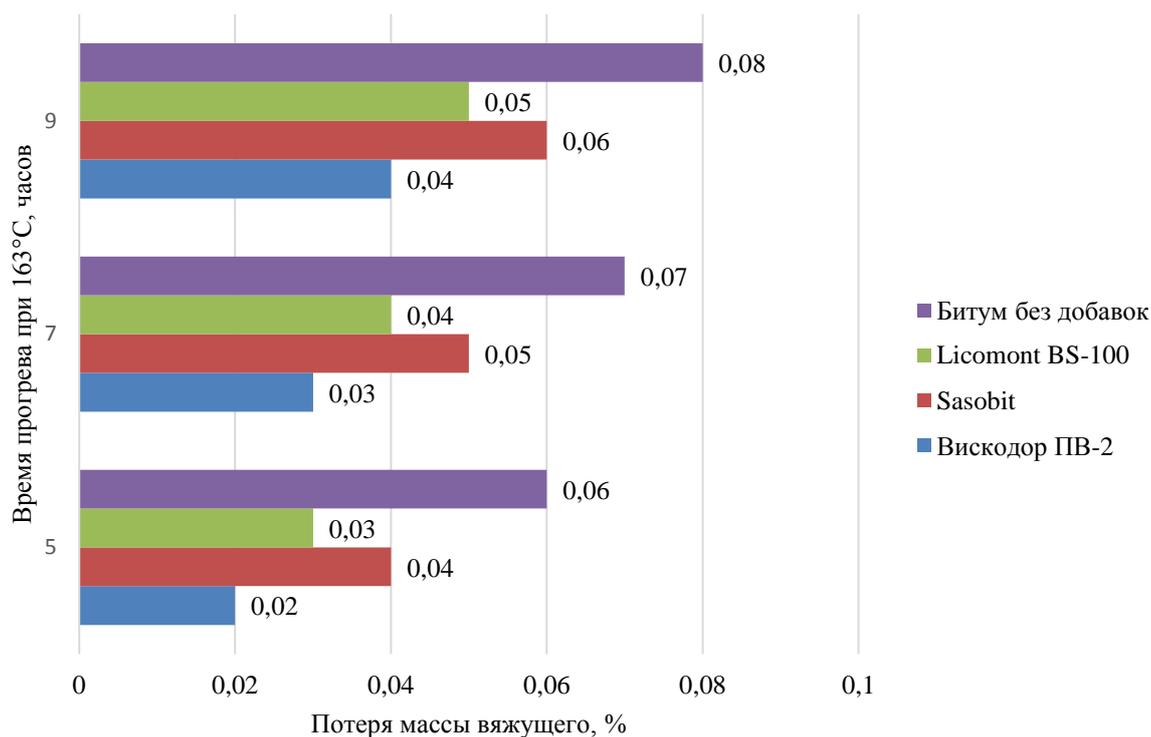


Рисунок 3.23 – Потеря массы битумного вяжущего после прогрева

Важным показателем, существенно влияющим на эксплуатационные свойства вяжущего является его динамическая вязкость. Изменение соотношения асфальтенов, смол и масел в составе битума под воздействием процессов старения, вызывает повышение вязкости битума. Поэтому динамику изменения этого показателя важно учесть при оценке интенсивности старения модифицированного вяжущего. Результаты испытания динамической вязкости исходного и модифицированного добавками вяжущего до и после старения представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Изменение динамической вязкости исходного и модифицированного добавками вяжущего в результате старения

Добавка	Динамическая вязкость до старения, Па*с		Динамическая вязкость после старения, Па*с		Изменение динамической вязкости после старения, %	
	при 135°С	при 165°С	при 135°С	при 165°С	при 135°С	при 165°С
Без добавки	0,33	0,10	0,74	0,14	124,2	55,6
Вискодор ПВ-2	0,24	0,06	0,29	0,08	21,4	12,5
Sasobit	0,28	0,08	0,44	0,12	57,1	50,0
Licomont BS-100	0,30	0,09	0,35	0,1	19,4	11,1

Анализ изменений показателей динамической вязкости (таблица 4) свидетельствует о том, что введение тестируемых органических добавок в битум приводит к некоторому снижению его вязкости при температурах 165°С и 135°С по сравнению с немодифицированным битумом, что будет способствовать повышению подвижности асфальтобетонной смеси в процессе приготовления и укладки. Наименьшие значения динамической вязкости как до, так и после старения были зафиксированы для образца вяжущего с добавкой Вискодор ПВ-2. Анализ изменений динамической вязкости показывает, что все исследованные добавки способствуют меньшему изменению этого показателя после старения по сравнению с битумом без добавок, что указывает на снижение деструктивных процессов старения. В частности, динамическая вязкость битума без добавок после старения увеличивается на 124,2% (более чем в 2 раза) при температуре 135°С и на 55,6% при 165°С. В образцах, модифицированных Licomont BS-100 и Вискодор ПВ-2, вязкость возрастает значительно меньше – на 19,4% и 21,4% при 135°С, а также на 11,1% и 12,5% при 165°С соответственно. Добавка Sasobit оказала менее выраженное влияние на сохранение вязкости: при 135°С вязкость увеличилась на 57,1%, а при 165°С – на 50%.

Для оценки изменения химических составов вяжущего вследствие термического старения образцы исходного битума, а также модельных составов с 10% исследуемых добавок, до и после старения были исследованы методом ИК-спектроскопии (рисунки 3.24 – 3.27). Процесс старения анализировался на основе изменений интенсивности двух ключевых полос: в области 1030 см^{-1} , которая ассоциируется с сульфоксидной группой $\text{S}=\text{O}$, и в диапазоне $1700\text{--}1750\text{ см}^{-1}$, относящейся к карбонильной группе $\text{C}=\text{O}$ [167, 168]. Увеличение полос поглощения в этих диапазонах свидетельствует о том, что активные углеродсодержащие и серосодержащие компоненты битума, подвергаются окислению при взаимодействии с кислородом воздуха [169, 170].

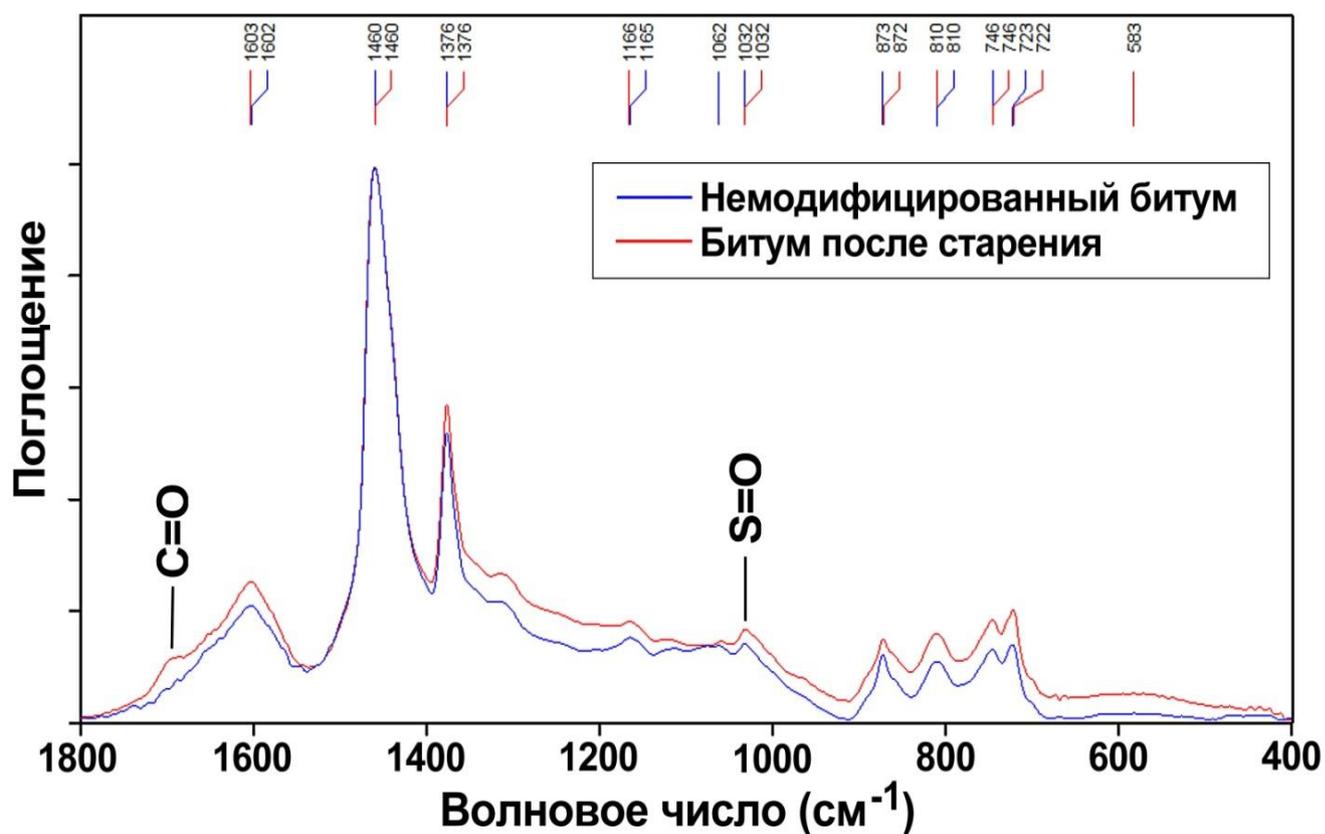


Рисунок 3.24 – ИК-спектры образца исходного и состаренного битума

Сравнительный анализ ИК спектров исходного битума без добавок до и после старения при температуре 163°C в течение 9 часов представлен на рисунке 3.24. При сопоставлении приведенных спектров можно заключить, что процессы старения протекают интенсивно. На это указывает существенное увеличение интенсивностей полос $\text{S}=\text{O}$ (1032 см^{-1}) и $\text{C}=\text{O}$ ($\sim 1700\text{ см}^{-1}$). Также, заметное

усиление полосы поглощения в области ($\sim 1600 \text{ см}^{-1}$), соответствующей ароматическим связям, указывает на более высокое содержание в состаренном битуме асфальтенов и смол [171, 172]. Интенсивные окислительные процессы, происходящие в битуме, отражаются на потере массы вяжущего (рисунок 3.20), а изменение группового состава битума обуславливает существенное изменение после старения качественных характеристик битума (таблицы 3.9 и 3.10).

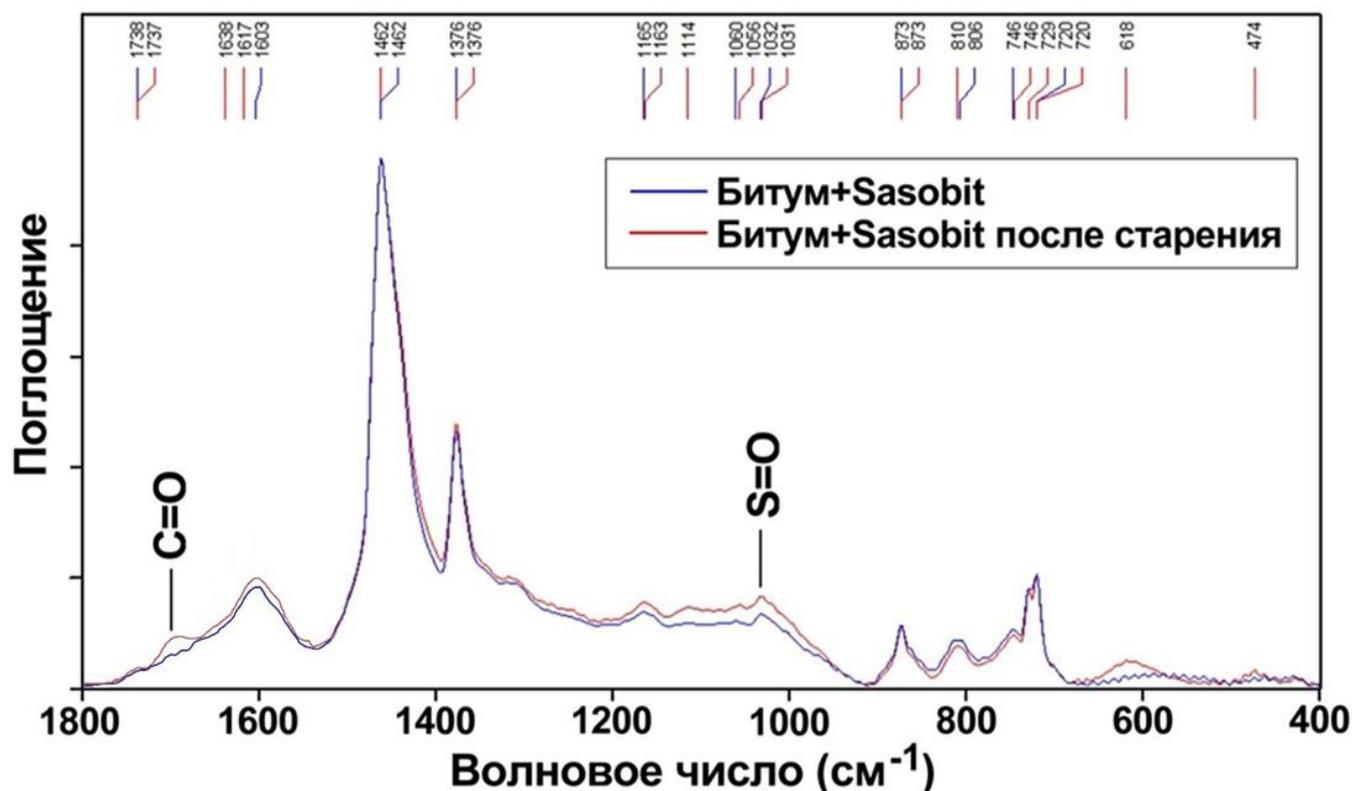


Рисунок 3.25 – ИК-спектры битума с добавкой Sasobit до и после старения

Исследование ИК-спектров вяжущего с воском Sasobit (рисунок 3.25) демонстрирует аналогичную картину, как и у битума без добавок: в процессе старения также наблюдается рост количества сульфоксидных групп S=O и карбонильных групп C=O. Тем не менее, увеличение интенсивности этих полос оказывается несколько менее выраженным по сравнению с исходным битумом, также и менее значительно увеличение интенсивности пика в области ($\sim 1600 \text{ см}^{-1}$), ассоциирующейся с содержанием ароматических групп смол и асфальтенов, что указывает на замедление процессов окислительного старения благодаря введенной добавке. Сделанные выводы также подтверждаются результатами анализа ИК-

спектров вяжущего, модифицированного Sasobit, которые были получены ранее китайскими учеными [173].

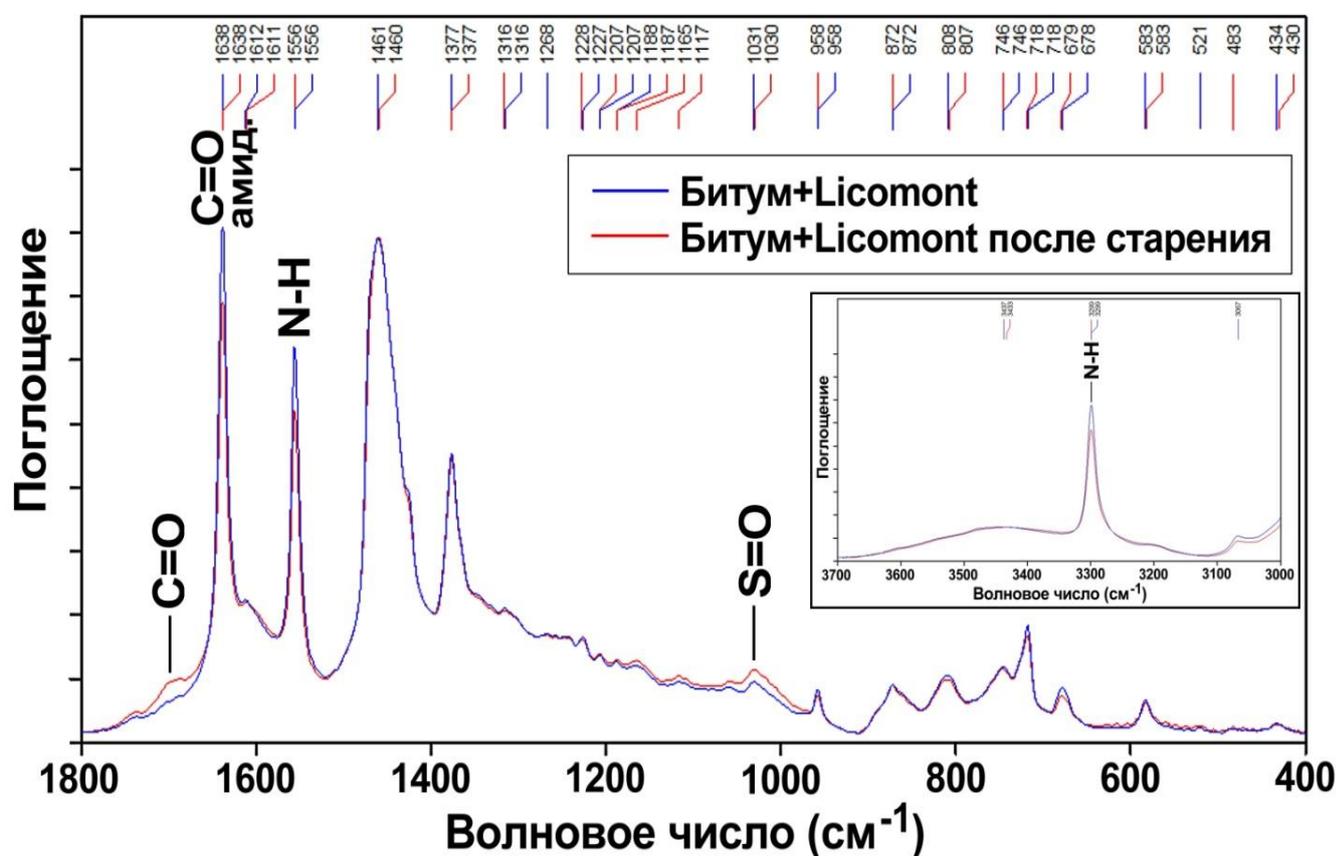


Рисунок 3.26 – ИК-спектры битума с Licomont BS-100 до и после старения

ИК-спектры вяжущего, модифицированного Licomont BS-100, полученные при анализе образцов до и после старения (рисунок 3.26), демонстрируют также менее значительное увеличение количества соединений, содержащих сульфоксидную S=O и карбонильную группу C=O, чем для исходного битума без добавок (рисунок 3.24), что также свидетельствует о замедлении процессов старения вяжущего. Можно отметить уменьшение интенсивности полос функциональных групп добавки N-H (3299 и 1556 см^{-1}) и C=O в амидах (1638 см^{-1}) [153,154], что указывает на процесс термической деструкции амидного воска под воздействием кислорода воздуха. Вследствие такого разрушения структуры воска прочностные характеристики вяжущего могут несколько снизиться в процессе продолжительной выдержки при высокой температуре.

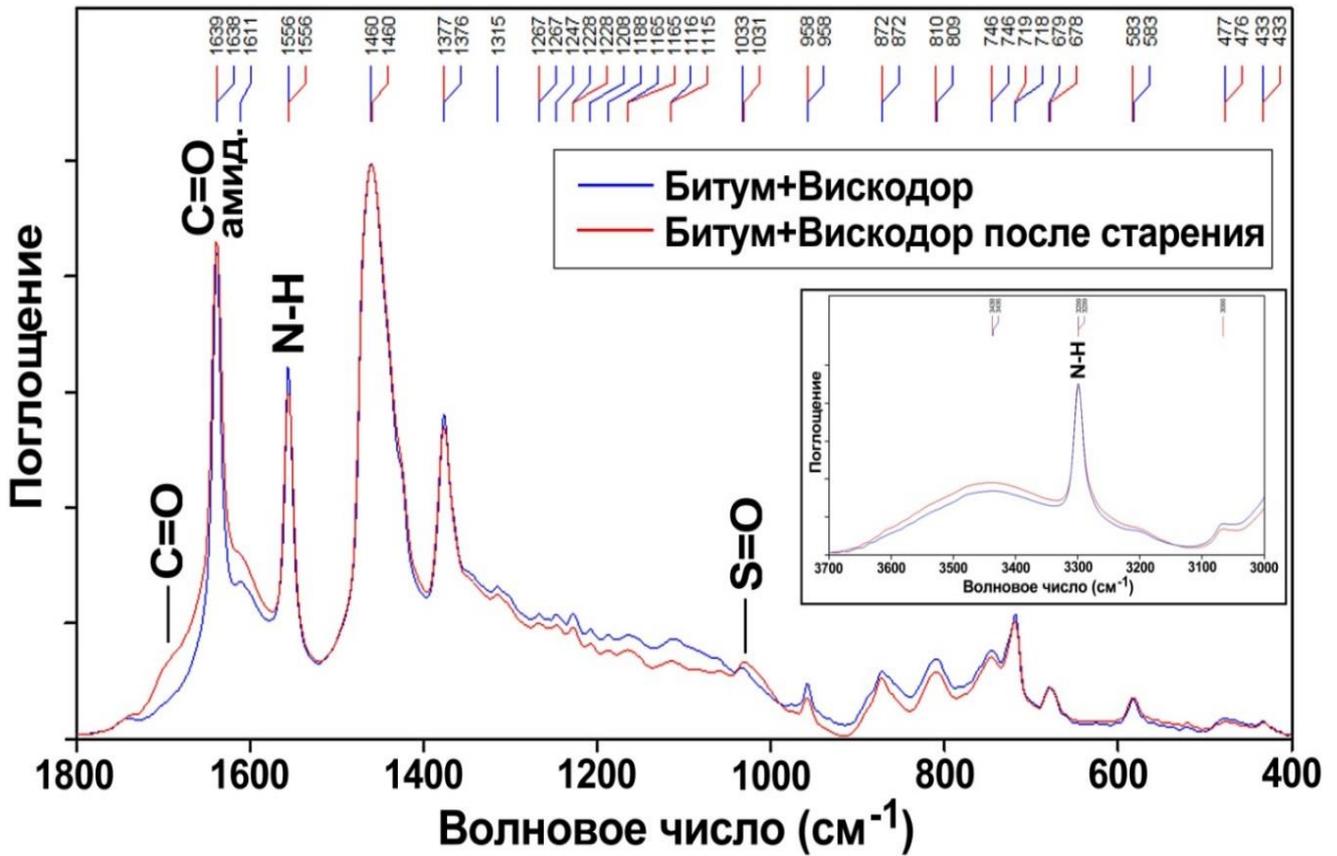


Рисунок 3.27 – ИК-спектры битума с Вискодор ПВ-2 до и после старения

При старении вяжущего с добавкой Вискодор ПВ-2, также наблюдается увеличение пиков поглощения, соответствующих группам S=O ($\sim 1031 \text{ см}^{-1}$) и C=O ($\sim 1700 \text{ см}^{-1}$) (рисунок 3.27). Однако изменения в этих областях ИК-спектра минимальны, как в сравнении с исходным битумом (рисунок 3.24), так и с образцами с добавками Sasobit и Licomont BS-100 (рисунки 3.26 и 3.27). Наиболее очевидно это отражается на полосе в области 1031 см^{-1} , которая практически не изменяется после старения. Интенсивности пиков в области групп N-H (3299 и 1556 см^{-1}) и C=O в амидах (1638 см^{-1}) также остаются практически неизменными после старения, что может указывать на термическую устойчивость всех компонентов добавки при длительной выдержке при высоких технологических температурах. Это также подтверждается минимальными потерями массы вяжущего, модифицированного Вискодор ПВ-2, после старения (рисунок 3.22). Более высокая устойчивость вяжущего с Вискодор ПВ-2 к термоокислительному

старению объясняется наличием в добавке имидазолинов, которые способствуют замедлению процессов старения вяжущего [60, 174], а также блокированием активных групп вяжущего, способных к окислению, за счет взаимодействия их с минеральными материалами.

Сравнение ИК-спектров образцов битумных вяжущих, модифицированных тестируемыми добавками, и исходного битума до и после процесса старения свидетельствует о том, что восковые модификаторы обладают ингибирующим влиянием на процессы старения, однако механизм их действия и эффективность несколько различаются. Наибольшее замедление процессов старения вяжущего вызывают добавки Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100, благодаря наличию амидов в их составе.

Процессы старения, происходящие под влиянием высоких технологических температур приготовления и хранения асфальтобетонной смеси, могут оказать негативное влияние на адгезионные свойства вяжущего, поэтому важно, чтобы вносимые в битум добавки обеспечивали его термостабильность [175].

Для оценки устойчивости адгезионных свойств вяжущего к воздействию термоокислительного старения, образцы исходного и модифицированного двумя процентами исследуемых добавок битума БНД 100/130 до и после прогрева по ГОСТ 18180 были исследованы на сцепление с минеральным материалом по методу, регламентированному в ГОСТ 11508. В качестве минерального материала был использован песок из отсевов дробления гранита фракции 0-4 мм. Дополнительно применяли количественный (весовой) метод оценки сцепления, сущность которого заключается в измерении массовой доли вяжущего, оставшегося на минеральном материале после кипячения.

Результаты проведенного испытания показаны на рисунке 3.28 и в таблице 3.11.

Таблица 3.11– Сцепление с гранитом исходного и модифицированного битума

Добавка	Сцепление битума с минеральным материалом			
	до термостатирования		после термостатирования	
	Оценка адгезии весовым методом, %	Визуально, соответствует образцу, №*	Оценка адгезии весовым методом, %	Визуально, соответствует образцу, №*
Без добавки	21	3	28	3
Sasobit	36	3	47	3
Licomont BS-100	48	3	56	3
Вискодор ПВ-2	99	1	91	2

* Где: №1 – минеральный материал покрыт битумом полностью;
 №2 – покрыто битумом более $\frac{3}{4}$ минерального материала;
 №3 – покрыто битумом менее $\frac{3}{4}$ минерального материала;

**Рисунок 3.28** – Внешний вид минерального материала с битумным покрытием после кипячения: слева – исходное вязущее, справа – после старения.

1) битум без добавок; с добавками: 2) Sasobit; 3) Licomont BS-100;
 4) Вискодор ПВ-2.

Фотографии (рисунок 3.28) наглядно показывают, что наибольшей адгезией к минеральному материалу как до, так и после термостатирования, обладает битумное вяжущее, модифицированное комплексной добавкой Вискодор ПВ-2. Так, сцепление с поверхностью минерального материала исходного битума как до, так и после кипячения неудовлетворительное и соответствует по ГОСТ 11508 образцу № 3 (после кипячения покрыто вяжущим менее $\frac{3}{4}$ поверхности материала), а сцепление вяжущего, модифицированного Вискодор ПВ-2, до термостатирования соответствует образцу № 1 (полное покрытие материала), а после старения – образцу № 2 (покрытие более $\frac{3}{4}$ материала). Такой эффект обусловлен наличием в составе модификатора амидов и имидазолинов, увеличивающих адгезию и термостабильность вяжущего [60, 174].

Добавки Licomont BS-100 и Sasobit повышают адгезию битума менее значительно. По визуальной оценке, согласно ГОСТ 11508 было затруднительно сравнить вклад этих добавок в изменения адгезии вяжущего, так как показатель сцепления с минеральным материалом битума, модифицированного двумя процентами указанных добавок как до, так и после старения оценивается как соответствующий образцу №3, также, как и для исходного битума. Поэтому был применен метод весового анализа (таблица 3.11). Согласно полученным в результате его проведения данным, можно заключить, что добавки Licomont BS-100 и Sasobit увеличивают адгезию битума, хоть и менее значительно, чем Вискодор ПВ-2. При этом, после старения адгезия как исходного, так и модифицированного Licomont BS-100 и Sasobit битума несколько возрастает. Это может быть связано с повышением вязкости битума, вследствие увеличения молекулярной массы асфальтенов и мальтенов, и повышением полярности некоторых компонентов битума под воздействием процессов окисления, что по литературным данным [176] может приводить к некоторому возрастанию адгезии.

Для оценки механизма изменения адгезионных свойств модифицированных вяжущих под воздействием старения, был применен метод ИК-спектроскопии для модельных составов вяжущего, модифицированного исследуемыми добавками, после взаимодействия несостаренных и состаренных образцов с поверхностью

минерального материала. ИК-спектры модифицированного вяжущего, подвергнутого термоокислительному старению до и после взаимодействия с поверхностью гранитного зерна, представлены на рисунках 3.29 – 3.33.

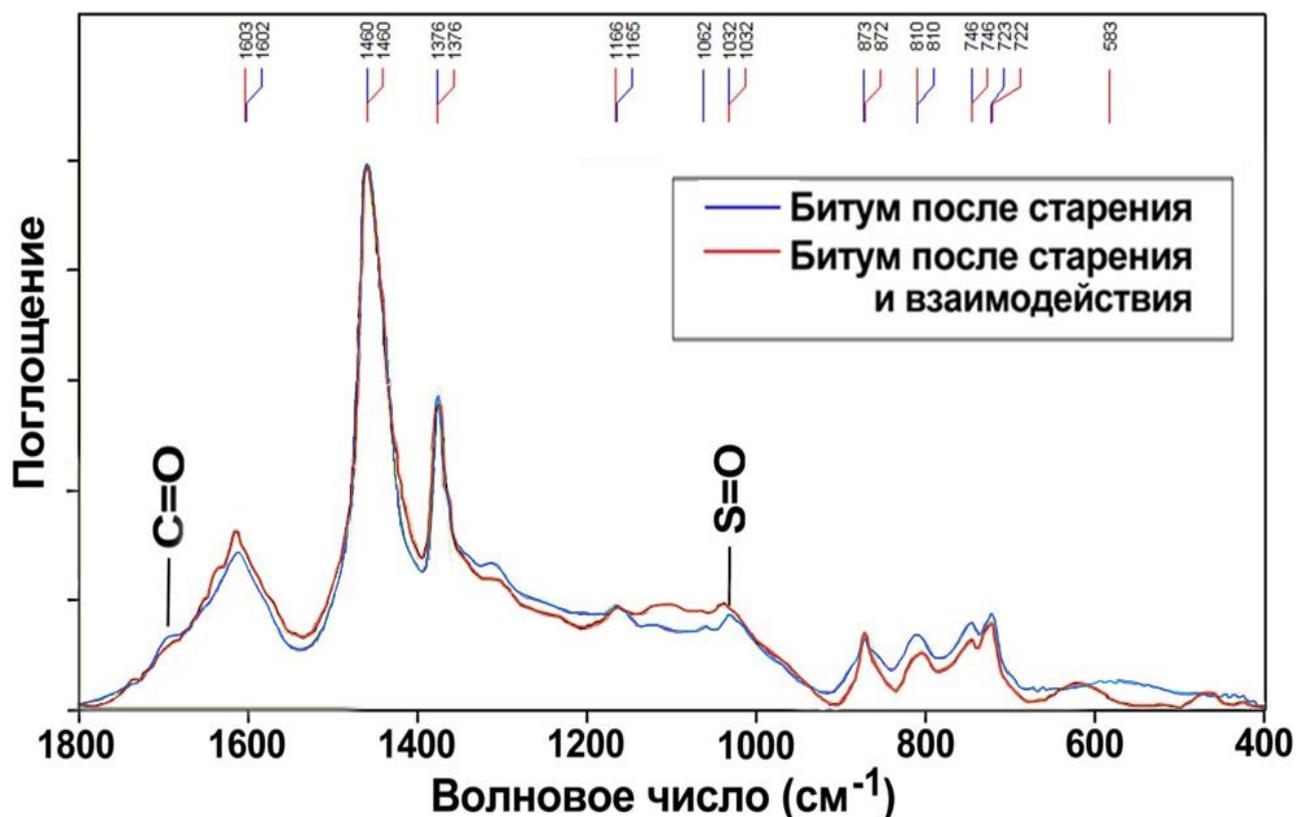


Рисунок 3.29 – ИК-спектры исходного битума после старения до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева

На рисунке 3.29 представлено сравнение ИК-спектров состаренного битума до и после взаимодействия с каменным материалом. Изменения интенсивностей полос поглощения после взаимодействия с каменным материалом очень незначительные, что свидетельствует о преобладании физического характера взаимодействия битума с каменным материалом и незначительности хемосорбционных процессов, и объясняет очень низкую адгезию как исходного, так и подвергнутого термостатированию битума (таблица 3.11). Кроме изменений, указывающих на протекание дальнейших термоокислительных процессов при нанесении на каменный материал, можно отметить некоторое уменьшение интенсивности полос в области $\sim 860 - 710 \text{ см}^{-1}$, соответствующих ароматическим соединениям [177], что указывает на их участие в осуществлении адгезионного

взаимодействия. Также наблюдается некоторое снижение интенсивности полосы поглощения карбонильной группы C=O в области ~ 1700 см⁻¹ в состаренном вяжущем после взаимодействия с минеральными зёрнами, что может свидетельствовать о дополнительной адсорбции некоторых окисленных компонентов битума на поверхности гранита. Это объясняет незначительное увеличение адгезии состаренного битума по отношению к исходному, выявленное при использовании количественного метода анализа.

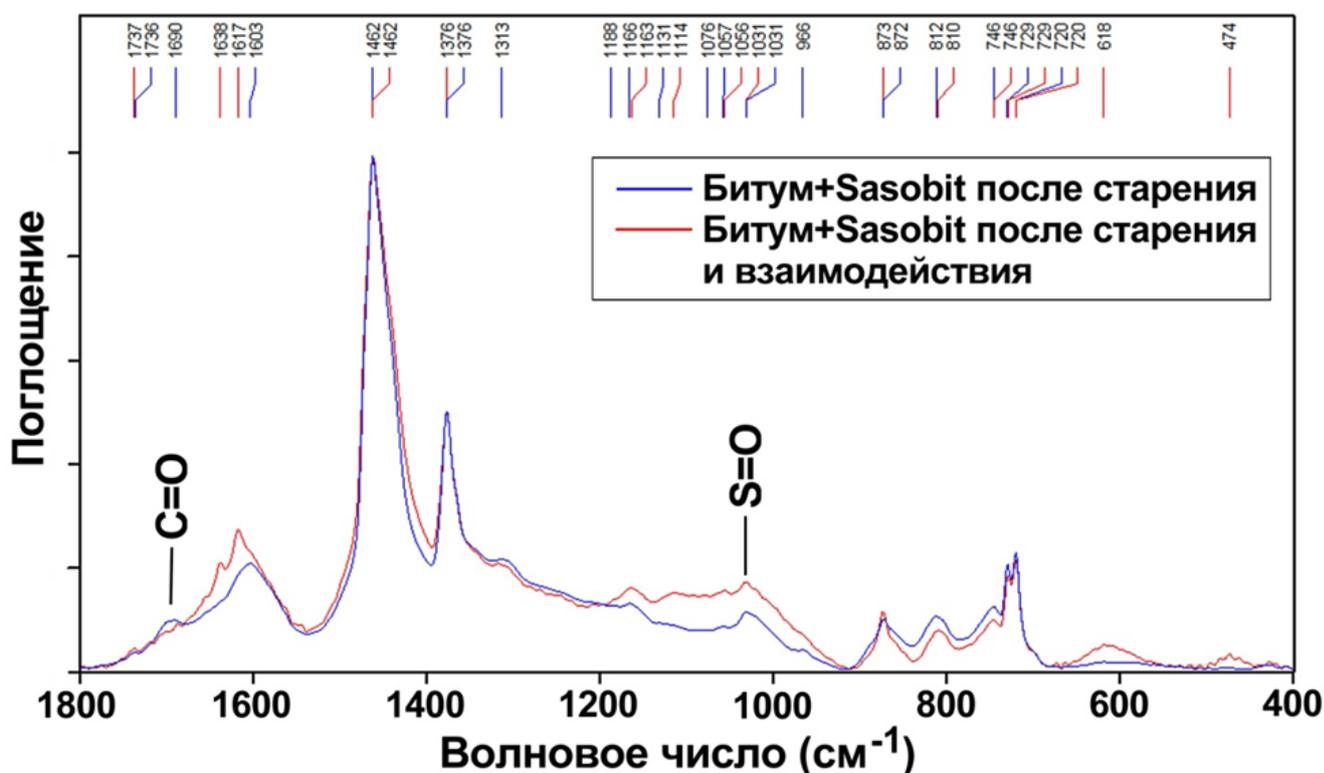


Рисунок 3.30 – ИК-спектры битума с добавкой Sasobit после старения до и после взаимодействия с поверхностью гранитного отсева

Картина изменения ИК-спектров состаренного вяжущего, модифицированного Sasobit, до и после взаимодействия с поверхностью гранита (рисунок 3.30), очень похожа на результаты, полученные на немодифицированном битуме после термостатирования (рисунок 3.29). Изменения весьма незначительны, что свидетельствует о преобладании физического характера взаимодействия вяжущего с минеральным наполнителем. В отличие от изменений, наблюдаемых при сравнении ИК-спектров несостаренного вяжущего Sasobit до и

после взаимодействия с гранитным отсевом (рисунок 3.18). В данном случае можно отметить уменьшение интенсивности полосы $\sim 1700 \text{ см}^{-1}$, соответствующей карбонильной группе $\text{C}=\text{O}$ [151], что также наблюдалось и в состаренном битуме без добавок, но в меньшей степени. Это указывает на наличие некоторой адсорбции окисленных компонентов вяжущего на поверхности минерального материала и объясняет повышение показателя адгезии вяжущего после старения с 36% до 47%.

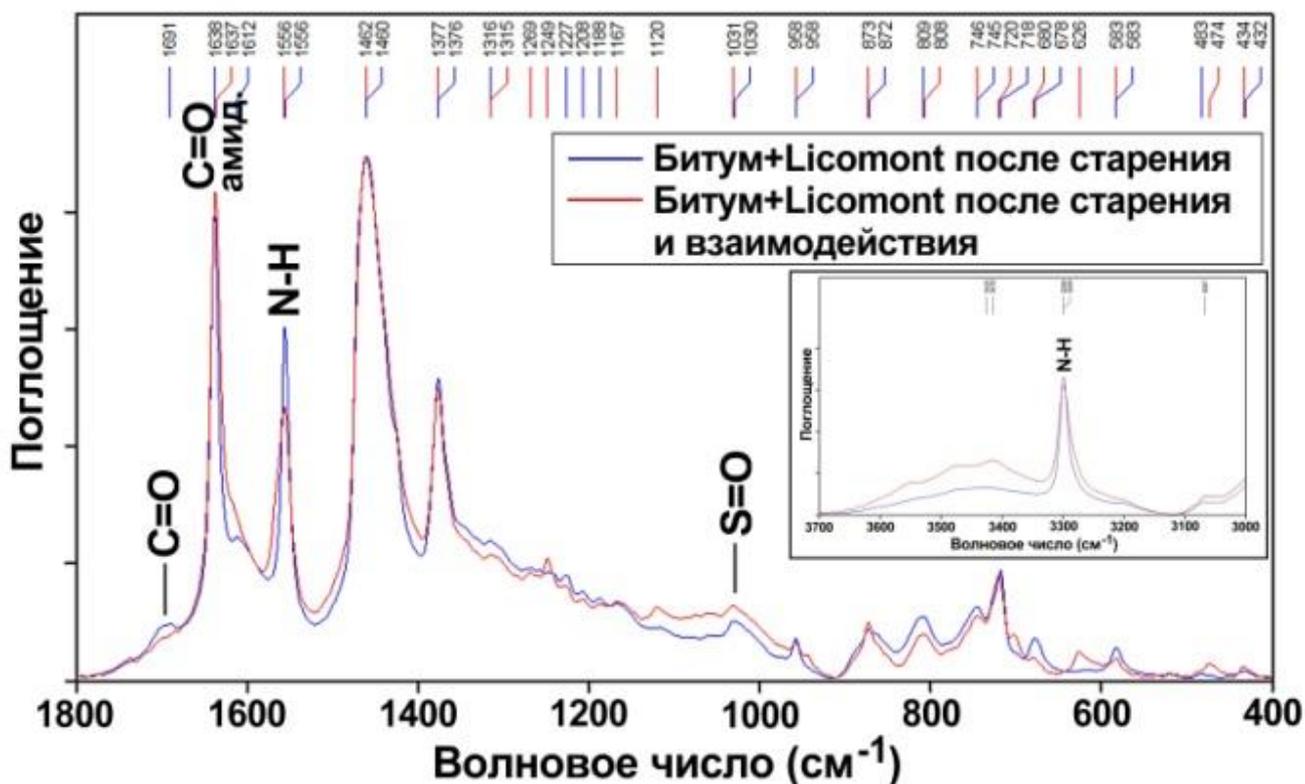


Рисунок 3.31 – ИК-спектры битума с добавкой Licomont BS-100 после старения до и после взаимодействия с поверхностью зерен гранитного отсева

При сравнении картин изменения ИК-спектров состаренного (рисунок 3.31) и несостаренного (рисунок 3.19) вяжущего, модифицированного Licomont BS-100, до и после взаимодействия с минеральным материалом, можно заключить, что, в случае с данной добавкой, механизм адгезии до и после старения практически не меняется, и в большей степени связан с наличием функциональных групп в составе амидного воска. В вяжущем, снятом с поверхности гранитных зерен, уменьшается интенсивность полос поглощения, связанных с N-H группами (3299 и 1556 см^{-1}), что указывает на их участие во взаимодействиях с активными центрами

поверхности минерального материала. Пик в области C=O группы в амидах (1638 см^{-1}) практически не изменяется, поскольку на него накладываются профили OH- групп, сорбированных бромидом калия при пробоподготовке. Отличие адгезии состаренного вяжущего от несостаренного выражается в том, что окисленные компоненты битума, которые определяются полосой поглощения карбонильной группы C=O ($\sim 1700\text{ см}^{-1}$), вносят дополнительный вклад в адгезионные свойства вяжущего. Заметно, что интенсивность этого пика уменьшается после смешения вяжущего с гранитным отсевом. Оценить изменения в содержании сульфоксидных групп S=O (1031 см^{-1}) сложно, так как в битумах после взаимодействия остаются мелкие частицы гранита, влияющие на изменения ИК-спектра в этой области.

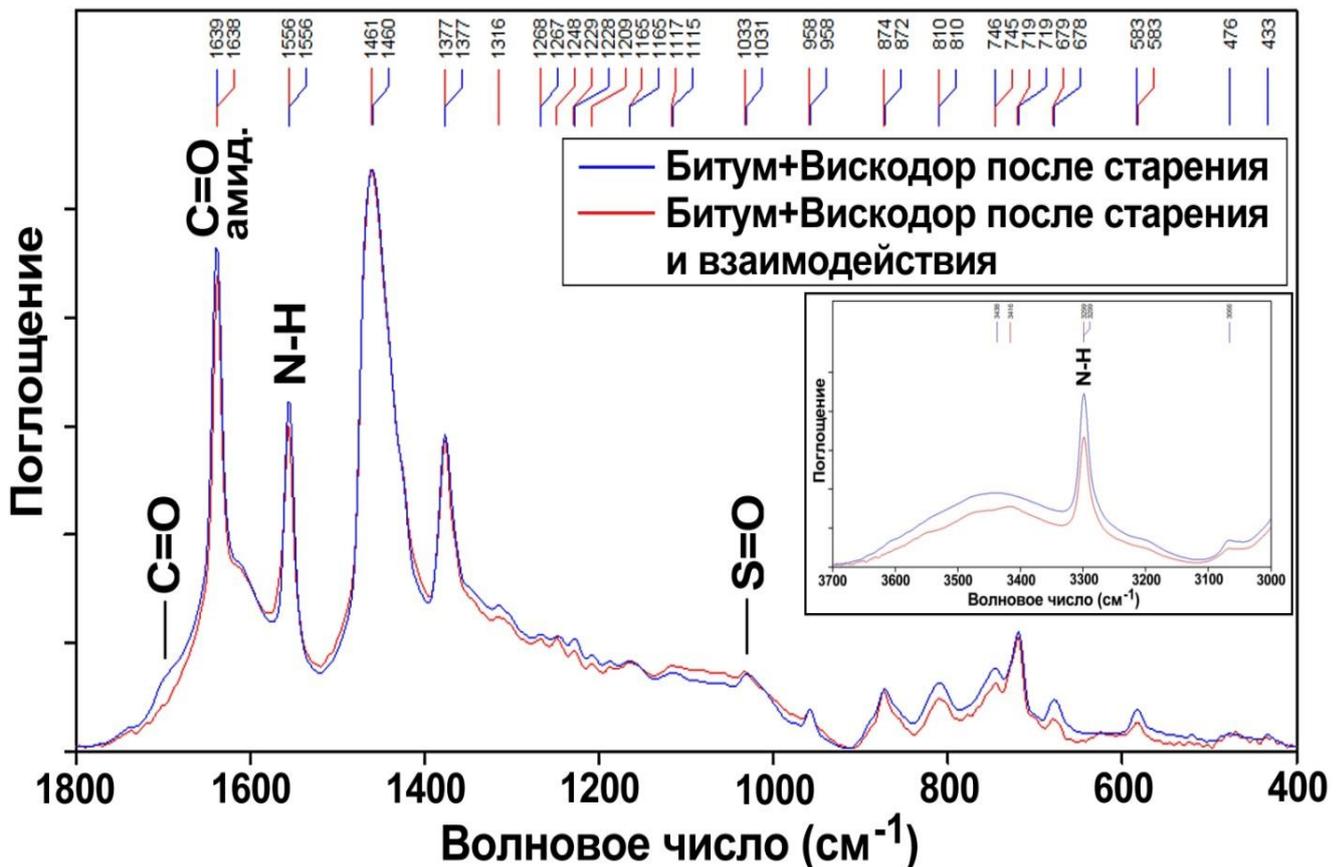


Рисунок 3.32 – ИК-спектры образцов состаренного битума с Вискодор ПВ-2 до и после взаимодействия с поверхностью зерен гранитного отсева

При анализе влияния процессов старения на характер взаимодействия вяжущего, модифицированного Вискодор ПВ-2 посредством сравнения ИК-спектров состаренного вяжущего до и после взаимодействия с поверхностью

гранитных зерен (рисунки 3.32 и 3.33), можно отметить существенную разницу происходящих изменений в сравнении с картиной несостаренного модифицированного вяжущего (рисунок 3.20). Уменьшение интенсивностей полос поглощения добавки 3299, 1638 и 1556 см^{-1} в результате хемосорбционного взаимодействия вяжущего с минеральным материалом, в вяжущем после прогрева проявляется не так значительно, как в несостаренном. Окисленные компоненты битума, характеризующиеся пиком карбонильной группы $\text{C}=\text{O}$ ($\sim 1700 \text{ см}^{-1}$), также вносят дополнительный вклад в адгезию вяжущего после старения, как и в других составах.

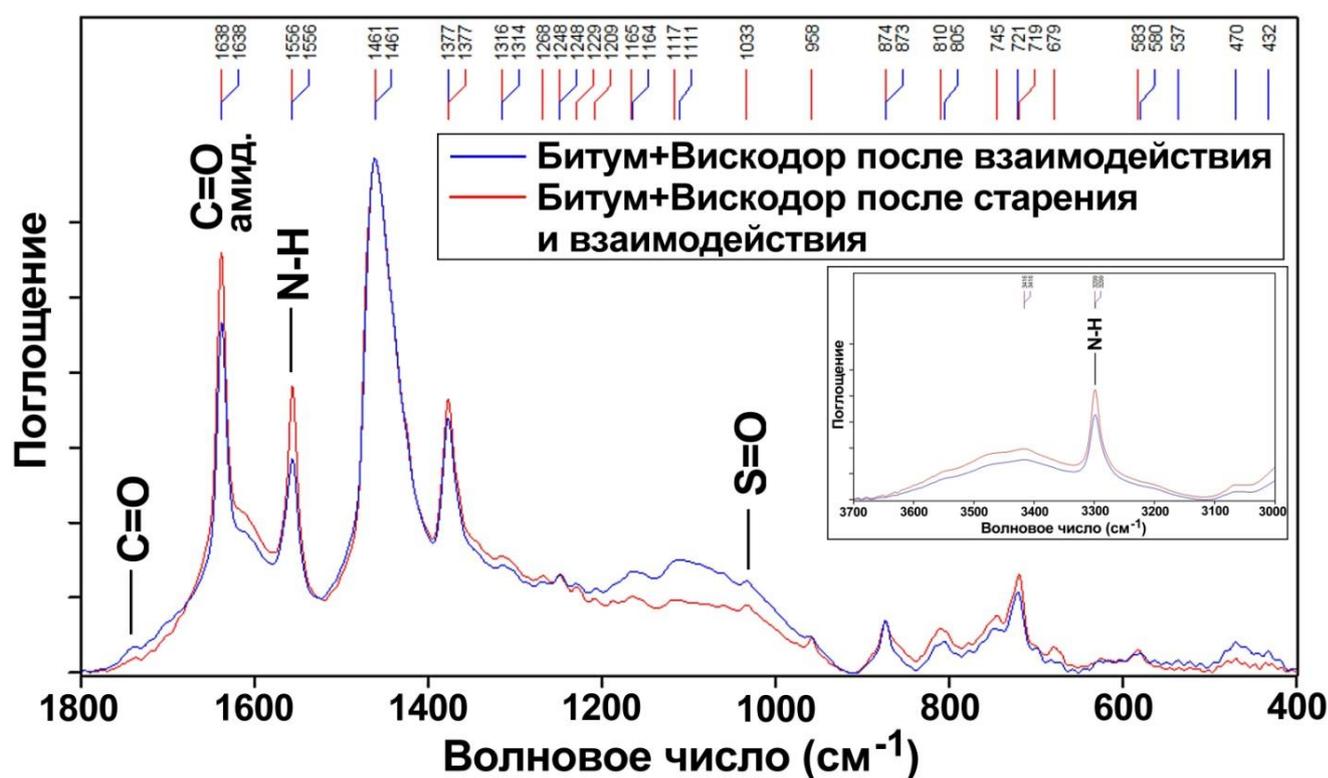


Рисунок 3.33 – ИК-спектры вяжущего с Вискодор ПВ-2, взятого с поверхности зерен гранитного отсева до и после старения

Сравнение кривых ИК-спектров после снятия с поверхности гранитного отсева несостаренного и состаренного вяжущего, модифицированного добавкой Вискодор ПВ-2 (рисунок 3.33), позволяет оценить отличие хемосорбционных процессов, происходящих при смешении образцов вяжущего с заполнителем.

После взаимодействия с поверхностью гранита, в состаренном вяжущем остается больше амидных групп, чем в несостаренном. Это указывает на то, что в

случае несостаренного вяжущего, процесс адгезии, основанный на химическом взаимодействии амидных и аминных ПАВ с активными центрами поверхности гранитных зерен, протекает интенсивнее, чем после старения. Также, в процессе адгезионного взаимодействия состаренного вяжущего происходит уменьшение интенсивностей пиков, относящихся к сульфоксидной (S=O), и карбонильной (C=O) группам самого битума. (рисунок 3.33). Это позволяет предположить, что механизм адгезии вяжущего, модифицированного Вискодор ПВ-2 изменяется после старения. В этом случае хемосорбционное взаимодействие частично осуществляется за счет карбонильных и сульфоксидных соединений. Следовательно, в результате старения может происходить определенное переструктурирование битума с восками и ПАВ, входящими в состав Вискодора ПВ-2, что, в свою очередь, влияет на взаимодействие с заполнителем. Этим объясняется небольшое снижение адгезии по сравнению с несостаренным вяжущим (таблица 3.22, рисунок 3.28). Но при этом величина адгезии остается даже в состаренном вяжущем значительно более высокой, чем в случае применения Licomont BS-100 и Sasobit, что является явным преимуществом добавки Вискодор ПВ-2.

Для оценки влияния исследуемых добавок на интенсивность технологического старения в соответствии с требованиями ГОСТ 33133-2014, образцы исходного и модифицированного добавками БНД 70/100 подвергались старению по методу RTFOT согласно ГОСТ 33140-2014, а также по методу упрощенного кратковременного старения УСК на специальных пластинах по ГОСТ 70243-2022 [150]. Согласно указанным ГОСТ была определена потеря массы в образцах после старения. Затем исходное и состаренное вяжущее было исследовано на показатели температуры размягчения и температуры хрупкости. Для несостаренного вяжущего и для образцов после RTFOT было определено изменение показателя пенетрации при 25°C (по ГОСТ 33136-2014). Для образцов, состаренных по методу УСК, ввиду малого количества получаемого материала, данный показатель не определялся [150].

Результаты исследования кратковременного старения исходного и модифицированного битумного вяжущего представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12. – Изменение физико-химических свойств битумного вяжущего после старения методами RTFOT и УСК

Наименование показателя	До старения	После старения методом RTFOT	После старения методом УСК
Битум БНД 70/100 без добавок			
Пенетрация при 25°C, 0,1 мм	81	62	-
Температура размягчения по КиШ, °С	48,0	53,0	53,5
Температура хрупкости, °С	-22	-18	-17
Изменение массы после прогрева, %	-	0,38	0,42
Изменение температуры размягчения после прогрева, °С	-	5	5,5
Остаточная пенетрация при 25°C, %	-	76,5	-
Изменение температуры хрупкости, С	-	4	5
Битумное вяжущее с 2% Вискодор ПВ-2			
Пенетрация при 25°C, 0,1 мм	72	63	-
Температура размягчения по КиШ, °С	67,0	69,0	69,5
Температура хрупкости, °С	-24	-22	-22
Изменение массы после прогрева, %	-	0,19	0,23
Изменение температуры размягчения после прогрева, °С	-	2,0	2,5
Остаточная пенетрация при 25°C, %	-	87,5	-
Изменение температуры хрупкости, С	-	2	2
Битумное вяжущее с 2% Licomont BS-100			
Пенетрация при 25°C, 0,1 мм	68	54	-
Температура размягчения по КиШ, °С	68,5	72,0	72,5
Температура хрупкости, °С	-21	-18	-18
Изменение массы после прогрева, %	-	0,27	0,31
Изменение температуры размягчения после прогрева, °С	-	3,5	4,0
Остаточная пенетрация при 25°C, %	-	79,4	-
Изменение температуры хрупкости, С	-	3	3

Согласно полученным результатам, показатели изменения массы, а также температур хрупкости и размягчения для образцов после старения вяжущего по методам RTFOT и УСК близки по значению, что подтверждает возможность использования метода УСК в качестве альтернативного методу RTFOT для определения интенсивности технологического старения [178].

При старении образцов как исходного, так и модифицированного вяжущего наблюдается увеличение температуры размягчения и температуры хрупкости, а также снижение показателя пенетрации. Это свидетельствует об увеличении жесткости вяжущего, снижении его пластичности и переходе в более хрупкое состояние, что будет негативно отражаться на эксплуатационных свойствах асфальтобетона. Такие изменения обусловлены протеканием процессов деструкции компонентов битума, приводящей к снижению содержания в битуме масляных и повышению смолисто-асфальтовых фракций [179-181]. О протекании процессов деструкции, сопровождаемых выделением газообразных веществ, свидетельствует и уменьшение массы образцов после старения. Наиболее интенсивное старение, характеризующееся большими значениями изменения массы после прогрева, увеличения температур размягчения и хрупкости, снижения пенетрации, наблюдается для образца исходного битума.

Введение органических добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 позволяет заметно снизить интенсивность старения вяжущего, что выражается в менее значительном изменении физико-химических показателей. Наиболее высокую способность ингибировать процессы старения показала добавка Вискодор ПВ-2.

Так, изменение массы после старения для вяжущего с Вискодор ПВ-2 снижается в 2, а с Licomont BS-100 – в 1,4 раза в сравнении с исходным битумом.

Изменение температуры размягчения после старения по методам RTFOT и УСК для исходного битума составляет 5 и 5,5°C соответственно, для битумного вяжущего с Licomont BS-100 изменения составляют 3,5 и 4,0°C, а с Вискодор ПВ-2 – всего 2,0 и 2,5 °C соответственно.

Температура хрупкости исходного битума после старения повышается на 4 – 5°C, а температура хрупкости вяжущих, модифицированных Licomont BS-100 и

Вискодор ПВ-2, ухудшается после старения лишь на 3 и 2 °С соответственно. Также битум, модифицированный Вискодор ПВ-2, обладает наибольшей остаточной пенетрацией после старения (87,5%) в сравнении с остаточной пенетрацией исходного (76,5%) и модифицированного Licomont BS-100 (79,4%) вяжущего.

Таким образом, модифицирование вяжущего добавкой Вискодор ПВ-2 замедляет интенсивность его старения больше по сравнению с образцами исходного битума и битума с Licomont BS-100, что позволит лучше сохранить пластические свойства вяжущего и устойчивость его к разрушению под воздействием нагрузок и низких температур при эксплуатации.

3.7 Выводы

1. Теоретически обоснован выбор компонентов полифункциональной добавки Вискодор ПВ-2 и механизм их влияния на структуру и характеристики модифицированного битумного вяжущего. Благодаря рациональному соотношению восков, пластификатора растительного происхождения и ПАВ, добавка изменяет структуру и свойства битумного вяжущего, характеризующегося расширением интервала пластичности, повышением когезионных и адгезионных свойств, снижением динамической вязкости при повышенных температурах и улучшением низкотемпературных свойств.

2. С помощью метода матричного планирования эксперимента подобраны необходимые для получения эффективной полифункциональной добавки рецептурно-технологические параметры. Определен рациональный состав добавки Вискодор ПВ-2: 77,5% восковой смеси, 7,5% катионного поверхностно-активного вещества ДАД-ТА и 15% пластификатора Унипласт-3. Разработана технология производства добавки.

3. Проведен сравнительный анализ влияния разработанной добавки Вискодор ПВ-2 и широко известных импортных добавок Sasobit и Licomont BS-100 на свойства битумного вяжущего на основе битумов БНД 100/130 и БНД 70/100. Выявлено, что по эффективности полифункциональная добавка не только не уступает импортным, а даже имеет преимущества по воздействию на ряд

показателей, таких как температура хрупкости, пенетрация при 0°C, адгезия вяжущего к минеральному материалу, что объясняется наличием в составе добавки ПАВ и пластификатора. Это положительно отразится на эксплуатационных характеристиках асфальтобетона.

4. При анализе физико-химических свойств битумного вяжущего, модифицированного исследуемой добавкой, выявлено значительное повышение температуры размягчения и снижения температуры хрупкости, что, в свою очередь, увеличивает интервал пластичности (работоспособности) вяжущего; уменьшение вязкости и растяжимости битума; повышение когезионных свойств. Это объясняется наличием в составе Вискодор ПВ-2 восковых компонентов, которые приводят к образованию в битумном вяжущем упорядоченной связнодисперсной структуры, что позволит повысить стойкость дорожного покрытия к воздействию нагрузок в условиях повышенных температур окружающей среды в летний сезон.

5. При оценке влияния тестируемых органических добавок в различных концентрациях на свойства битума, выявлено что использование исследуемых добавок в концентрациях выше 2,5% ведет к ухудшению таких свойств, как как глубина проникания иглы и растяжимость вяжущего при 0°C, характеризующих пластическое поведение вяжущего при низких температурах. На основании этого были определены рациональные концентрации введения добавки Вискодор ПВ-2, улучшающие прочностные свойства вяжущего – 1,5 и 2% от массы вяжущего для теплых асфальтобетонных смесей при использовании битума БНД 100/130 и 2,5% от массы вяжущего для литых асфальтобетонных смесей при использовании битума БНД 70/100.

6. Обоснован механизм адгезионного взаимодействия вяжущего, модифицированного Вискодор ПВ-2, с минеральным наполнителем, заключающийся в образовании катионными ПАВ хемосорбционных связей на поверхности зерен наполнителя. Благодаря наличию в составе поверхностно-активных веществ на основе имидазолинов и амидаминов, модификатор Вискодор ПВ-2 позволяет существенно повысить сцепление битумного вяжущего с минеральным наполнителем. Это будет способствовать повышению

водостойкости, а, следовательно, износостойкости асфальтобетонного покрытия и сократит затраты на его ремонт.

7. Установлено, что применение добавки Вискодор ПВ-2 снижает динамическую вязкость при высоких температурах, что связано с наличием в его составе пластификатора и ПАВ и позволит производить и уплотнять асфальтобетонные смеси при более низких температурах, и одновременно повышает ее при температурах формирования структуры асфальтобетонного покрытия после уплотнения, что обеспечит высокие физико-механические и эксплуатационные показатели асфальтобетона.

8. Показано, что применение модификатора Вискодор ПВ-2 позволяет существенно замедлить процессы старения битумного вяжущего в результате длительно воздействия высоких температур за счет наличия в его составе амидного воска и функциональных добавок, содержащих аминные и амидные группы. Ингибирующее действие добавки Вискодор ПВ-2 на процессы старения вяжущего превосходит по эффективности Sasobit и Licomont BS-100.

4. ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ВИСКОДОР ПВ-2 НА ФИЗИХО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА АСФАЛЬТОБЕТОНА

4.1 Изменение физико-механических свойств теплых асфальтобетонных смесей, приготовленных с исследуемыми органическими добавками

Оценка влияния добавки Вискодор ПВ-2 на свойства асфальтобетонных смесей производилась на основе испытаний асфальтобетонных смесей типа Б по ГОСТ 9128-2013, типа А16Вн в соответствии с ГОСТ Р 58406.2 – 2020 и ГОСТ Р 70396 – 2022, а также литой асфальтобетонной смеси марки ЛА16Вн по ГОСТ 54401-2020.

4.1.1 Асфальтобетон типа Б на основе вяжущего, модифицированного Вискодор ПВ-2

Подбор состава минеральной части асфальтобетонной смеси типа Б происходил в соответствии с требованиями ГОСТ 9128-2013, на основе гранулометрических составов используемых минеральных материалов: щебня гранитного фракции 5 – 20 мм., песка из отсевов дробления кварцитопесчаника фракции 0 – 10 мм, известнякового минерального порошка МП-2. Определение оптимального содержания битумного вяжущего было произведено в соответствии с рекомендациями ГОСТ 9128-2013 и правилами проектирования, регламентированными ГОСТ Р 58406.10.2022. График гранулометрического состава подобранной минеральной части асфальтобетонной смеси представлен на рисунке 4.1. Рациональный состав асфальтобетонной смеси А16Вн представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Рациональный состав асфальтобетонной смеси типа Б

Компоненты	Содержание, %
Щебень фракции 5 – 20 мм	30,0
Песок дробленный 0 – 10 мм	63,8
Минеральный порошок МП-2	6,2
Битумное вяжущее (сверх 100%)	6,0

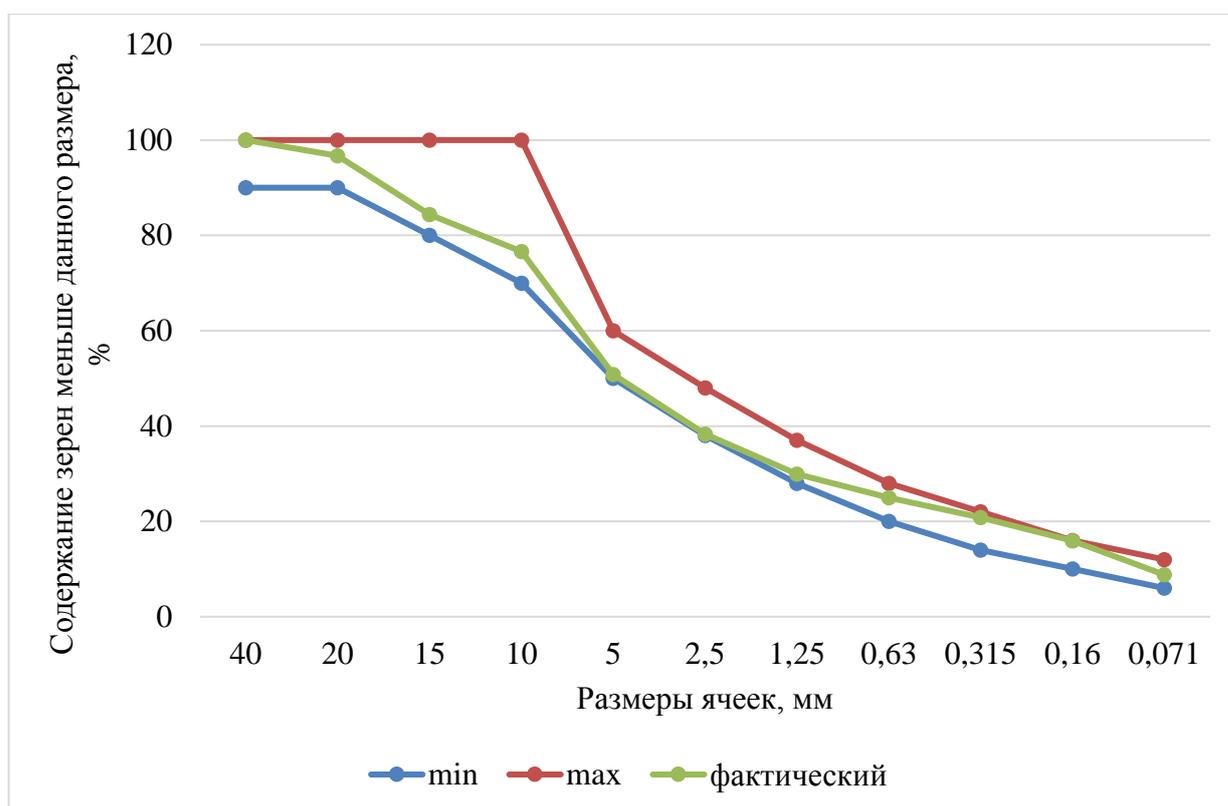


Рисунок 4.1 – График зернового состава минеральной части смеси асфальтобетонной смеси типа Б

В качестве битумного вяжущего для образцов асфальтобетонной смеси использовали битум БНД 100/130 без добавок, а также модифицированный 1,5 и 2,0% Вискодор ПВ-2 и 2% Licomont BS-100.

Стандартный метод определения технологических температур смешивания и уплотнения асфальтобетонных смесей, рекомендованный ГОСТ Р 58406.2, предполагает определение значений динамической вязкости используемого битумного вяжущего и расчет интервалов температур смешивания и уплотнения, при которых вязкость вяжущего составляет $0,17 \pm 0,02$ и $0,28 \pm 0,03$ Па·с соответственно. В соответствии с указанным методом были произведены замеры вязкости исходного и модифицированного добавками битума при 165 и 135°C, и при помощи программного продукта «Вязкость» [182], произведен расчет температурных интервалов смешивания и уплотнения асфальтобетонных смесей, представленный в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Расчетные диапазоны температур смешивания и уплотнения асфальтобетонной смеси типа Б на основе показателей вязкости вяжущего

Состав вяжущего	Вязкость, Па·с		Температурный диапазон	
	при 135°	при 165°	смешивания	уплотнения
Битум БНД 100/130 без добавок	0,33	0,10	149 – 155	135 – 141
Битум с 1,5% Вискодор ПВ-2	0,26	0,08	142 – 148	131 – 136
Битум с 2% Вискодор ПВ-2	0,24	0,06	139 – 144	131 – 134
Битум с 2% Licomont BS-100	0,29	0,09	145 – 150	133 – 138

Из полученных расчетов следует, что температура смешения для составов с Вискодор ПВ-2 по сравнению с исходным битумом снижается в среднем на 10°С, а уплотнения – на 6°. Для состава с Licomont BS-100 снижение температур происходит на ещё меньшую величину. Но многочисленные зарубежные [173, 183, 83, 84, 88, 90] и отечественные [184] исследования добавок на основе органических восков подтверждают их эффективность в качестве температуропонижающих. Также авторами работ [59] установлено, что не все температуропонижающие добавки оказывают значимое влияние на вязкость, а авторы работы [185] при исследовании различных температуропонижающих технологий констатировали, что результаты проведенных испытаний входят в противоречие с представлением о том, что вязкость является единственным фактором, определяющим температуропонижающий эффект. Таким образом, при определении рациональных температур приготовления и уплотнения асфальтобетонных смесей целесообразно применить альтернативный метод.

Одним из важнейших показателей качества уплотнения асфальтобетона является его остаточная пористость. В исследовании [186] авторы доказали, что при соответствии нормам остаточной пористости степень уплотнения асфальтобетона также соответствует требованиям норм. На основании этого было принято решение определить оптимальные температуры приготовления и укладки асфальтобетонных смесей на основе исследования показателей пористости образцов асфальтобетонных смесей, приготовленных и уплотненных при различных температурах. Результаты испытаний пористости образцов,

приготовленных при разных температурах смешивания и уплотнения представлены в таблице 4.3

Таблица 4.3 – Остаточная пористость образцов асфальтобетона типа Б, приготовленного и уплотненного при различных температурах

Состав вяжущего	Температура смешивания, °С	Температура уплотнения		
		85	110	135
		Остаточная пористость, %		
Битум БНД 100/130 без добавок	160	6,9	5,3	3,5
	150	7,2	5,5	4,7
Битум с 1,5% Вискодор ПВ-2	150	4,8	2,4	1,9
	135	5,3	3,9	-
	120	7,5	6,5	-
Битум с 2% Вискодор ПВ-2	150	4,7	2,3	1,5
	135	5,1	3,5	-
	120	7,3	6,2	-
Битум с 2% Licomont BS-100	150	4,8	2,3	1,7
	135	5,2	3,7	-
	120	7,4	6,4	-

По нормативным требованиям, согласно ГОСТ 9128-2013 для асфальтобетонной смеси типа Б, остаточная пористость должна составлять 2,5 – 5,0%. Исходя из результатов можно констатировать, что остаточная пористость образцов с органическими добавками, приготовленных при температуре 135°С и уплотненных при температуре 110°С соответствует нормативным требованиям и практически идентична данному показателю для смеси на исходном битуме без добавок, приготовленной при 160°С и уплотненной при 135°С. Указанные температуры были выбраны для проведения испытаний.

Результаты исследований физико-механических свойств асфальтобетонов, приготовленных на битуме, модифицированном исследуемыми органическими добавками представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты испытаний асфальтобетонной смеси типа Б

Наименование показателя		Требования по ГОСТ 9128-2013 к III/IV ДКЗ	Исходный битум	Вискодор ПВ-2		Licomont BS-100
Количество введенной добавки, %		Не нормируется	0	1,5	2,0	2,0
Средняя плотность, г/см ³		Не нормируется	2,43	2,42	2,4	2,43
Предел прочности при сжатии, МПа	50°С	Не менее 0,9/1,1	1,2	1,4	1,6	1,5
	20°С	Не менее 2,0/2,0	3,5	3,8	4,5	4,3
	0°С	Не более 12,0 / 13,0	8,6	8,1	8,2	8,6
Водонасыщение, % по объему		1,5 – 4,0	2,5	2,7	2,6	2,4
Сдвигоустойчивость	По коэффициенту внутреннего трения	Не менее 0,80 / 0,81	0,93	0,94	0,94	0,94
	По сцеплению при сдвиге при температуре 50°С	Не менее 0,34/0,36	0,37	0,40	0,42	0,42
Трещиностойкость		2,5 – 7,0/ 3,0 – 7,5	3,7	3,7	3,8	3,5
Водостойкость		Не менее 0,75/0,70	0,83	0,89	0,90	0,89
Водостойкость при длительном водонасыщении		Не менее 0,65/0,60	0,69	0,83	0,86	0,85

Полученные результаты показали, что все испытанные смеси с применением органических добавок удовлетворяют требованиям ГОСТ 9128-2013 к III/IV ДКЗ. Образцы теплых асфальтобетонных смесей с добавками 1,5 и 2% Вискодор ПВ-2, а также с 2% Licomont, приготовленные при температуре 135°С и заформованные при 110°С, не уступают по своим физико-механическим свойствам горячей

асфальтобетонной смеси, приготовленной с использованием исходного битума без добавок при температуре 165°C и заформованной при 135°C.

Так, предел прочности при сжатии при 20°C образцов с введением 1,5 % Вискодор ПВ-2 возрастает на 8,6%; 2% Вискодор ПВ-2 – на 28,6 %, 2 % Licomont BS- 100 – на 22,9% в сравнении с асфальтобетоном на исходном битуме без добавок. Предел прочности при 50°C образцов с введением 1,5 % Вискодор ПВ-2 возрастает на 16,6%; 2% Вискодор – на 33,3 %, 2 % Licomont BS- 100 – на 25 % в сравнении с асфальтобетоном на исходном битуме без добавок.

Значительное разрушающее влияние на структуру дорожного покрытия оказывает воздействие влаги. Перемещаясь в порах, вода вызывает неравномерное распределение напряжений, что способствует разрушению асфальтобетона. Водонасыщение образцов с 1,5 и 2% Вискодор ПВ-2 несколько выше, а водонасыщение с добавкой Licomont BS-100 на 4% ниже, чем у образца исходной горячей асфальтобетонной смеси.

При этом водостойкость всех образцов с исследуемыми добавками выше, чем у образца исходной горячей смеси без добавок, что положительно отразится на долговечности дорожного покрытия.

Анализ показателей трещиностойкости показывает, что внесение Licomont BS-100 несколько снижает данный показатель по сравнению со смесью без добавок, что связано со способностью восков понижать низкотемпературную устойчивость вяжущего, в то время как введение Вискодор ПВ-2 не только не снижает, но и повышает трещиностойкость, что обусловлено наличием в составе добавки ПАВ и пластификаторов и положительно отразится на устойчивости дорожного полотна в зимний период.

В процессе эксплуатации автомобильной дороги на дорожное покрытие воздействует ряд факторов, которые влияют в целом на состояние дороги, а в частности, на состояние покрытия. Проблема колеиности на дорогах является актуальной в условиях увеличения трафика и транспортных нагрузок на дорогах. Колея на поверхности дорожного покрытия может образовываться под действием

транспортных нагрузок по нескольким независимым друг от друга причинам: сдвиговое необратимое деформирование верхнего и нижнего слоев покрытия; необратимое деформирование нижележащих слоев основания и грунта земляного полотна; неравномерный износ и доуплотнение покрытия [43].

Способность асфальтобетона сопротивляться пластическим деформациям характеризует показатель сдвигоустойчивости.

Для определения коэффициента внутреннего трения и оценки сдвигоустойчивости асфальтобетона были определены максимальные нагрузки и соответствующие предельные деформации стандартных цилиндрических образцов при двух напряженно деформированных состояниях: при одноосном сжатии и при сжатии специальным обжимным устройством по схеме Маршалла

Коэффициент внутреннего трения теплых асфальтобетонов с исследуемыми добавками немного выше, чем у образца исходной горячей смеси.

Сцепление при сдвиге при температуре 50°C у образцов теплых асфальтобетонных смесей с добавками выше по сравнению с исходной горячей асфальтобетонной смесью. Так сцепление при сдвиге для смеси с 1,5% добавки Вискодор ПВ-2 на 8,1%, с 2% Вискодор ПВ-2 - на 13,5%, с 2% Licomont BS-100 – на 7,2% выше, чем для исходной горячей асфальтобетонной смеси без добавки. Повышение физико-механических характеристик, тепло- и сдвигоустойчивости позволяет предполагать более длительные сроки службы теплых асфальтобетонов с исследуемыми добавками относительно аналогичной горячей асфальтобетонной смеси без добавок.

Таким образом, введение добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 позволяет снизить температуру приготовления и уплотнения асфальтобетона на 25 °C без ухудшения его физико-механических характеристик. Введение исследуемых добавок повышает показатели прочности и водостойкости асфальтобетона, что позволит увеличить срок службы дорожного покрытия. Выявлено, что отечественная добавка Вискодор ПВ-2 по эффективности не уступает импортной добавке Licomont BS-100.

4.1.2. Асфальтобетон типа А16Вн на основе вяжущего, модифицированного Вискодор ПВ-2

Подбор состава асфальтобетонной смеси А16Вн производился в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58406.2 – 2020 и ГОСТ Р 70396-2020 по методам, аналогичным изложенным в предыдущем разделе.

Исходя из гранулометрических составов минеральных материалов, выбранных для приготовления исследуемых асфальтобетонных смесей (гранитного щебня фракций 8-16 мм и 4-8 мм, песка дробленого фракции 0-4 мм производства и минерального порошка МП-2), по методике, изложенной в ГОСТ Р 58406.10-2020 был подобран оптимальный состав минеральной части асфальтобетонной смеси А16Вн, а также рациональное содержание битумного вяжущего. Кривая оптимизированного гранулометрического состава представлена рисунке 4.2. Рациональный состав асфальтобетонной смеси А16Вн представлен в таблице 4.5.

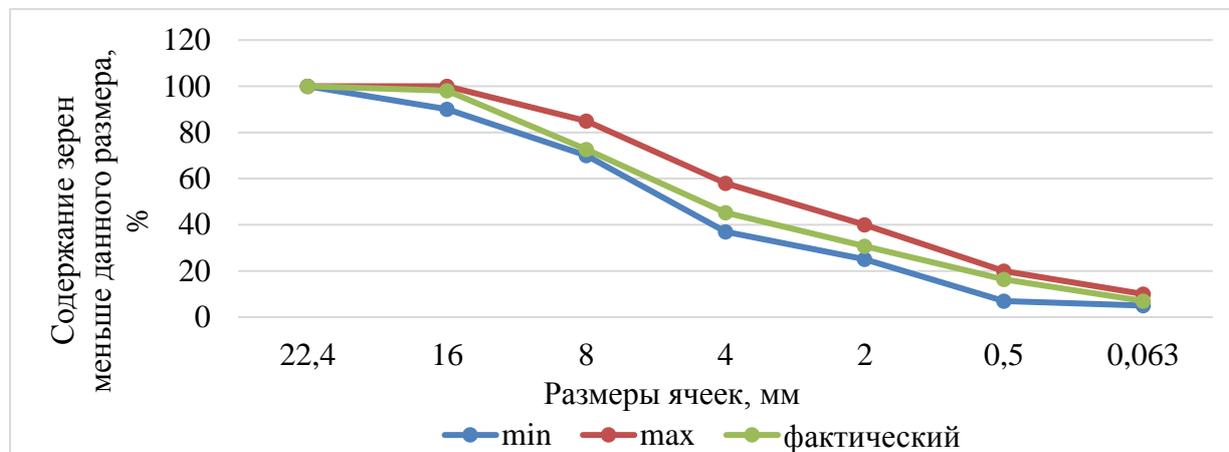


Рисунок 4.2 – График зернового состава минеральной части смеси

Таблица 4.5 – Рациональный состав асфальтобетонной смесей А16Вн

Компоненты	Содержание, %
Щебень фракции 8-16 мм	35,0
Щебень фракции 4 – 8 мм	25,6
Песок дробленый из отсева гранита фракции 0 – 4 мм	33
Минеральный порошок МП-2	6,4
Битумное вяжущее (сверх 100%)	5

В качестве битумного вяжущего для образцов асфальтобетонной смеси использовали битум БНД 70/100 без добавок и модифицированный двумя процентами Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100, руководствуясь результатами испытаний физико-механических и реологических свойств, приведенных в главе 3. Целесообразные температуры приготовления и уплотнения асфальтобетонных смесей были выбраны определением содержания воздушных пустот в образцах асфальтобетона, приготовленных и уплотненных при различных температурах аналогично методу, описанному предыдущем разделе. Результаты испытаний содержания воздушных пустот для образцов, приготовленных при разных температурах смешивания и уплотнения, представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Содержание воздушных пустот в образцах асфальтобетона типа А16Вн приготовленного и уплотненного при различных температурах

Состав вяжущего	Температура смешивания, °С	Температура уплотнения		
		85	110	135
		Содержание воздушных пустот, %		
Битум БНД 70/100 без добавок	160	6,1	5,3	3,3
	150	6,5	5,5	4,5
Битум с 2% Вискодор ПВ-2	150	4,4	2,5	1,7
	135	5,0	3,4	-
	120	6,3	5,1	-
Битум с 2% Licomont BS-100	150	4,6	2,3	1,9
	135	5,2	3,5	-
	120	6,4	5,9	-

По нормативным требованиям, согласно ГОСТ Р 58406.2 – 2020 для асфальтобетонной смеси типа А16Вн, содержание воздушных пустот должно составлять 2,5 – 4,5 %. Исходя из результатов можно констатировать, что остаточная пористость образцов с органическими добавками, приготовленных при температуре 135°С и уплотненных при температуре 110°С соответствует нормативным требованиям и практически идентична данному показателю для смеси на исходном битуме без добавок, приготовленной при 160°С и уплотненной при 135°С. Указанные температуры были выбраны для проведения испытаний.

Контрольная асфальтобетонная смесь без добавок (состав №1) приготавливалась при температуре 160°C, образцы уплотнялись при температуре 135°C. Составы с восковыми добавками Вискодор ПВ-2 (№2) и Licomont BS-100 (№3) приготавливались при температуре 135°C и уплотнялись при 110°C.

Результаты исследования физических свойств образцов асфальтобетонных смесей представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Физические свойства исследуемых асфальтобетонных смесей

Наименование показателя	Требования ГОСТ Р 58406.2-2020 к А16Вн и ГОСТ Р 70396-2022 к А16Вн теплой	Составы		
		№1	№2	№3
Максимальная плотность, г/см ³	Не нормир.	2,460	2,442	2,452
Объемная плотность, г/см ³	Не нормир.	2,384	2,370	2,375
Содержание воздушных пустот, %	От 2,5 до 4,5	3,1	2,9	3,1
Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ), %	Не менее 12,0	14,2	14,6	14,5
Пустоты, наполненные битумным вяжущим (ПНБ), %	67,0 – 80,0	78,2	79,8	78,3
Разрушающая нагрузка по Маршаллу, Н	≥ 5340	≥ 4300	10650	15040
Деформация по Маршаллу, мм	2,0 – 4,0	2,0 – 4,5	3,4	2,2

Согласно полученным результатам (таблица 4.7) физические показатели всех трех испытуемых асфальтобетонных смесей соответствуют требованиям ГОСТ Р 58406.2-2020 для марки А16Вн, что подтверждает, что зерновой состав асфальтобетонной смеси и количество вяжущего подобраны оптимально.

Объемная и максимальная плотности исследуемых асфальтобетонных смесей отличаются друг от друга незначительно, что свидетельствует об однородности составов. Содержание воздушных пустот, пустот в минеральном

заполнители, а также пустот, наполненных битумным вяжущим в образцах асфальтобетонных смесей с добавками (составы №2 и №3), не выше, чем в контрольном образце №1 без добавок. Таким образом, применение добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 позволило снизить температуру приготовления и температуру укладки на 25° без ухудшения уплотняемости смеси. Следует отметить, что наименьшим показателем содержания воздушных пустот, а также наибольшим содержанием пустот, наполненных битумным вяжущим, обладает образец с битумным вяжущим, модифицированным 2% Вискодор ПВ-2, что указывает на лучшее уплотнение смеси. Это объясняется наличием в добавке температуропонижающих катионных ПАВ и пластифицирующих компонентов.

Разрушающая нагрузка по Маршаллу и деформация по Маршаллу позволяют оценить устойчивость асфальтобетона к необратимым деформациям. На рисунке 4.3 представлено изменение этих свойств при использовании в качестве связующего битумного вяжущего, модифицированного исследуемыми добавками в сравнении с образцом асфальтобетона без добавок.

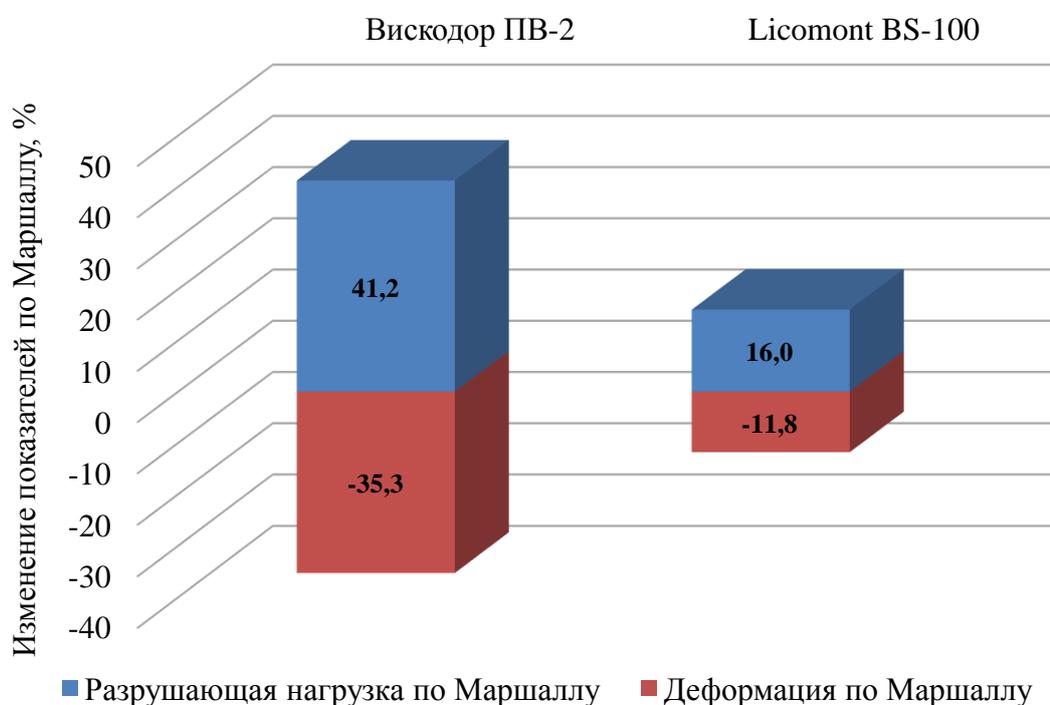


Рисунок 4.3 – Изменение разрушающей нагрузки по Маршаллу и деформации по Маршаллу при использовании добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100

Исходя из данных, представленных в таблице 4.10, можно заключить, что показатели разрушающей нагрузки по Маршаллу более чем в 2 раза превышают значения, требуемые по ГОСТ Р 58406.2-2020. Представленная на рисунке 4.4 диаграмма, показывает, что введение добавки Вискодор ПВ-2 повышает этот показатель на 41,2, а Licomont BS-100 – на 16,0%. Такое увеличение будет способствовать повышению устойчивости асфальтобетона к образованию колеи, впадин и наплывов.

Деформация по Маршаллу для асфальтобетонов, приготовленных с использованием модифицированных вяжущих, понижается в сравнении с образцом, приготовленным на исходном битуме. Так, данный показатель для асфальтобетона с добавкой Вискодор ПВ-2 снизился на 35,3, а с Licomont BS-100 – на 11,8%, по сравнению с контрольным составом без добавок. Это свидетельствует о том, что применение исследуемых органических добавок повышает устойчивость асфальтобетона к остаточным деформациям.

4.1.3 Влияние исследуемых восковых добавок на физико-механические свойства литых асфальтобетонных смесей

Наиболее высокие температуры приготовления и укладки требуются для литого асфальтобетона, разновидности горячих асфальтобетонных смесей, отличительной чертой которой является практически полное заполнение связующим пространства между зернами минерального материала. Остаточная пористость при этом практически стремится к нулю. Температура приготовления литого асфальтобетона составляет 190 – 220°C [187]. Это приводит к высокому энергопотреблению и значительному повышению вредных выбросов. Поэтому задача снижения температуры приготовления особенно актуальна при производстве литых асфальтобетонных смесей.

Литой асфальтобетон от традиционных асфальтобетонных смесей отличается повышенным содержанием битума (7,5 – 10%) и минерального порошка (20-30 %) [188, 189]. За счет этого, а также за счет более высоких температур приготовления и укладки, они обладают высокой подвижностью, что позволяет

укладывать их без уплотнения. В связи с этим основными факторами, определяющими его прочностные характеристики, являются реологические свойства битумного вяжущего и микроструктура асфальтобетона [190]. Благодаря монолитности, литым асфальтобетонам присущи высокие показатели износостойкости, морозоустойчивости, водонепроницаемости и усталостной долговечности [191 – 193].

Покрытия из литого асфальтобетона на основе битума без применения полимерных модификаторов имеют низкую устойчивость к пластическим деформациям. [136]. Для улучшения способности литых асфальтобетонных смесей противостоять воздействию нагрузок и высоких температур эксплуатации, вяжущее модифицируют полимерами. Но использование в составе ПБВ приводит к увеличению вязкости и снижению подвижности литых асфальтобетонных смесей, что негативно сказывается на удобоукладываемости и требует повышения температур приготовления. Применение в качестве модификатора восков в литых асфальтобетонных смесях может позволить одновременно снизить температуру приготовления и укладки смеси и улучшить устойчивость покрытия к пластическим деформациям [11].

Для оценки эффективности исследуемой добавки Вискодор ПВ-2 при использовании ее для приготовления литых асфальтобетонов, были исследованы составы литых асфальтобетонных смесей марки ЛА16Вн по ГОСТ 54401-2020 на основе немодифицированного битума БНД 70/100 и битумных вяжущих, модифицированных исследуемой добавкой Вискодор ПВ-2 и импортными добавками Sasobit и Licomont BS-100.

На основании зерновых составов используемых минеральных материалов (щебня фракций 8-16 мм и 4-8 мм производства ОАО «Павловск Неруд», песка дробленого фракции 0-4 мм производства ОАО «Павловск Неруд» и минерального порошка МП-2 ООО «Центр-Известняк») в соответствии с ГОСТ 54401-2020 был подобран оптимальный состав минеральной части для литой асфальтобетонной смеси ЛА16Вн (рис.4.4).

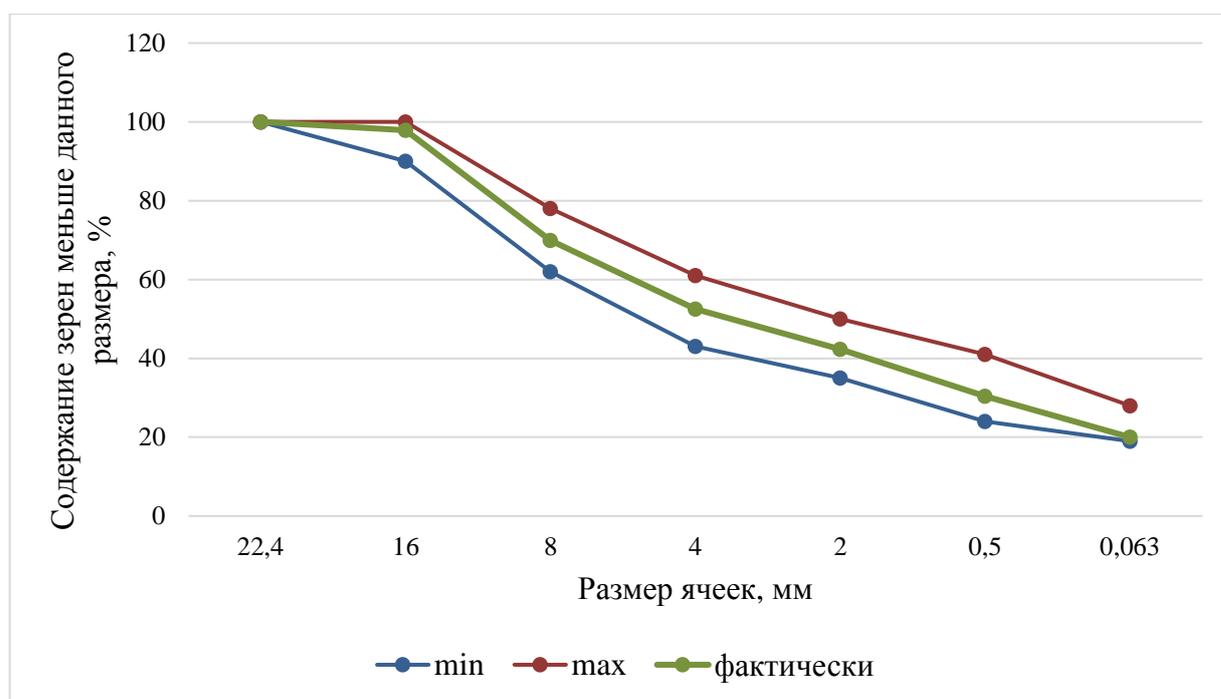


Рисунок 4.4 – Гранулометрический состав минеральной части смеси

На основе исходного битума БНД 70/100 без добавок и вяжущего, модифицированного 2,5% исследуемых добавок, а также оптимально подобранного состава минеральной части смеси были приготовлены асфальтобетонные смеси ЛА16Вн, составы которых представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Составы исследуемых литых асфальтобетонных смесей

Компоненты состава битумного вяжущего в смеси	№ состава смеси					
	1	2	3	4	5	6
	Содержание, %, (сверх 100% минеральной части)					
Битум	9	9,5	10	8,775	8,775	8,775
Вискодор ПВ-2				0,225		
Sasobit					0,225	
Licomont BS-100						0,225
Всего вяжущего	9	9,5	10	9	9	9

Полученные результаты исследований физико-механических свойств литых асфальтобетонных смесей на основе исходного битума БНД 70/100 и модифицированных вяжущих представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Физико-механические показатели литых асфальтобетонных смесей

Наименование показателя		Требования ГОСТ Р 54401	№ состава литой асфальтобетонной смеси					
			1	2	3	4	5	6
Максимальная плотность смеси, г/см ³		не норм.	2,4098	2,3977	2,3984	2,3981	2,3937	2,4031
Объемная плотность, г/см ³		не норм.	2,3931	2,3834	2,3844	2,3852	2,3795	2,3902
Содержание воздушных пустот, %		не более 1,5	0,69	0,60	0,58	0,54	0,59	0,54
Удобоукладываемость смеси, мм, при температуре:	185°С	не норм.	10	17	19	33	35	31
	200°С	не норм.	17	25	28	39	42	36
	215°С	не менее 30	26	35	40	49	55	43
Глубина вдавливания штампа, при 40°С, мм		от 1,0 – 4,0	2,73	3,31	4,48	2,45	3,11	2,38
Увеличение глубины вдавливания штампа через 30 мин., мм		не более 0,6	0,15	0,49	0,51	0,35	0,4	0,32

Анализ полученных данных (таблица 4.7) позволяет утверждать, что контрольные асфальтобетонные смеси без использования добавок (№ 1 и 3) с содержанием вяжущего в составе 10 и 9 % соответственно по своим показателям не отвечали требованиям ГОСТ Р 54401-2020. Так, состав № 1, содержащий 9% битума, при температуре 215°С имел показатель удобоукладываемости 26 мм, что ниже нормативного показателя – не менее 30 мм, а состав № 3, содержащий 10% немодифицированного битума, с удовлетворяющим нормативному требованию показателем удобоукладываемости 40 мм при 215°С, имел показатель глубины вдавливания штампа – 4,48 мм, что выше требуемого ГОСТ Р 54401-2020 нормативного значения – от 1 до 4 мм. Состав № 2 с содержанием 9,5% вяжущего отвечает требованиям ГОСТ Р 54401-2020 (удобоукладываемость данной смеси при 215°С – 35 мм, глубина вдавливания штампа – 3,31 мм).

Введение исследуемых добавок позволило получить смеси с меньшим содержанием битумного вяжущего – 9%, соответствующие нормативным требованиям как по удобоукладываемости, так и по глубине вдавливания штампа.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что качество уплотнения, характеризуемое показателем содержания воздушных пустот, в образцах № 4, 5, и 6 с использованием битума, модифицированного исследуемыми добавками, улучшается по сравнению как с образцом № 1, содержащим такое же количество вяжущего, но без добавок, так и с образцом №2, содержащим большее количество вяжущего (9,5%).

Лучшее уплотнение выявлено в образцах с содержанием в составе Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 (содержание воздушных пустот – 0,54%, по сравнению с 0,69% в образце с равным содержанием битумного вяжущего без добавок и с 0,60% в образце с содержанием 9,5% вяжущего). Введение Sasobit снизило количество воздушных пустот до 0,59%. Таким образом, использование исследуемых добавок позволит улучшить уплотняемость асфальтобетонной смеси без необходимости увеличения температуры укладки и при меньшем содержании вяжущего.

Показатели удобоукладываемости испытываемых составов при температурах 185, 200 и 215°C позволяют утверждать, что введение исследуемых восковых добавок дает возможность понижения температуры укладки смеси на 30°C.

Так, даже при температуре 185 °С удобоукладываемость состава с Вискодор ПВ-2 составляет 33 мм, с Sasobit – 35 мм, Licomont BS-100 – 31 мм, что соответствует нормативным требованиям для удобоукладываемости литых асфальтобетонных смесей при 215 °С. Величина удобоукладываемости при 185°C состава с Вискодор ПВ-2 несколько выше, чем у состава с Licomont BS-100, что связано с присутствием ПАВ и пластификаторов в составе Вискодор ПВ-2. Наиболее эффективно улучшает удобоукладываемость добавка Sasobit, так как указанный воск обладает более низкой температурой плавления. Удобоукладываемость контрольных составов с битумом без добавок при температурах 185 и 200°C менее 30 мм. Возможность снижения температуры, обеспечивающей требуемую подвижность литой асфальтобетонной смеси до 180-185°C при помощи введения восковых добавок, выявлена ранее исследованиями

Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) [11, 194].

Следует отметить, что показатели глубины вдавливания штампа в составах № 4 с Вискодор ПВ-2 и № 6 с Licomont BS-100 на 10,3 и 12,8% соответственно ниже, чем в контрольном составе № 1 с таким же количеством немодифицированного вяжущего, что объясняется высокой способностью амидного воска, входящего в состав этих добавок, структурировать битумное вяжущее. Таким образом, указанные добавки будут способствовать увеличению прочностных характеристик литого асфальтобетона и устойчивости к пластическим деформациям. Глубина вдавливания штампа для смеси № 5 с добавкой Sasobit на 13,9% выше, чем у образца №1 с равным количеством вяжущего без добавки, но на 6% ниже, чем у соответствующего требованиям ГОСТ Р 54401-2020 образца № 2, с 9,5% немодифицированного битума. Это связано с более низкой способностью полиэтиленового воска Sasobit структурировать вяжущее в сравнении с добавками Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100, имеющими в своем составе амидные воски. Уменьшение показателя глубины вдавливания штампа при введении добавок на основе синтетических восков подтверждается также многочисленными исследованиями [11, 13, 96].

4.2 Влияние добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 на эксплуатационные свойства асфальтобетонных смесей

При проектировании асфальтобетонного покрытия важнейшей задачей является оценка его долговечности. Долговечность асфальтобетона обусловлена его способностью сопротивляться воздействию нагрузок, перепадов температур, воды и других факторов, оказывающих негативное влияние [195-197]. Эксплуатационными показателями, которые позволяют оценивать долговечность, относятся водостойкость и устойчивость к образованию колеи.

Результаты исследования данных эксплуатационных свойств в тестируемых образцах асфальтобетона представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Эксплуатационные свойства исследуемых образцов асфальтобетонных смесей типа А16Вн

Наименование показателя	Требования ГОСТ Р 58406.2-2020 (для А16Вн)	Требования ГОСТ Р 70396 – 2022 (для А16Вн теплая)	Составы на основе вяжущего		
			Битум без добавок	С Вискодор ПВ-2	С Licomont BS-100
Коэффициент водостойкости	$\geq 0,85$	$\geq 0,85$	0,89	0,94	0,91
Средняя глубина колеи, мм	$\leq 4,5$	$\leq 5,5$	3,9	2,3	2,6
Угол наклона кривой колееобразования, мм/1000 циклов	$\leq 0,20$	$\leq 0,23$	0,12	0,04	0,06

Полученные результаты показывают, что введение исследуемых добавок увеличивает коэффициент водостойкости, характеризующий устойчивость асфальтобетона к разрушающему воздействию воды. Наибольшее влияние на данный показатель оказала добавка Вискодор ПВ-2 (состав №2) в концентрации 2% – коэффициент водостойкости составил 0,94 против 0,89 у асфальтобетона на исходном битуме без добавок (состав №1). Это объясняется наличием в добавке пластификаторов и катионных ПАВ, способствующих увеличению адгезионных свойств вяжущего и наибольшему уплотнению при формовании образцов, что положительно отразится на долговечности асфальтобетонного покрытия.

Результаты исследования процесса колееобразования представлены в таблице 4.10 и рисунке 4.5.

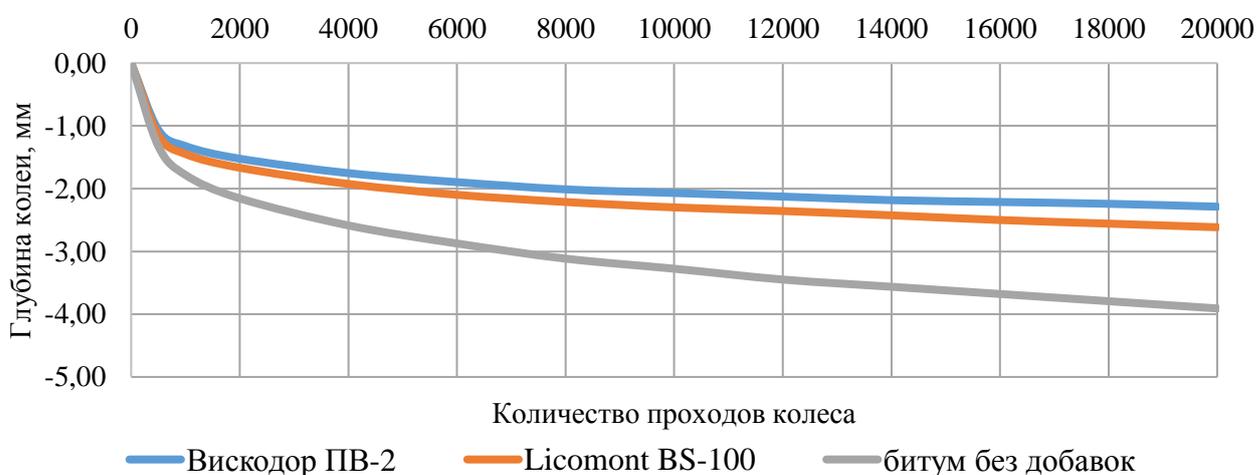


Рисунок 4.5 – График колееобразования образцов асфальтобетона А16Вн на битуме без добавок и модифицированном Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100

На кривой колееобразования выделяют три зоны: стадия доуплотнения, при которой происходит интенсивное уплотнение до максимально возможного значения, стадия пластических деформаций, характеризующаяся сопротивляемостью асфальтобетона к образованию колеи, и стадия разрушения – на этом этапе кривая колееобразования резко увеличивает наклон [198].

График колееобразования иллюстрирует характерные стадии доуплотнения (от 0 до 2000 проходов колеса) и развитие пластических деформаций (свыше 2000). Анализ полученных данных позволяет утверждать, что введение исследуемых органических добавок существенно повышает устойчивость асфальтобетона к воздействию пластических деформаций. Глубина колеи после 20000 проходов колеса на образцах с Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 существенно снизилась, что визуально заметно на фото образцов после тестирования (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 – Внешний вид образцов асфальтобетона А16Вн после 20000 проходов (10000 циклов) нагруженного колеса:
а) без добавки; б) с Вискодор ПВ-2; в) с Licomont BS-100

Наименьшая глубина колеи после 20000 проходов выявлена на образцах асфальтобетона, модифицированного Вискодор ПВ-2, – 2,3 мм, в то время как для асфальтобетона без добавок этот показатель составил 3,9, для образца с добавкой Licomont BS-100 – 2,6 мм (таблица 4.10). Угол наклона кривой колееобразования, характеризующий динамику развития пластических деформаций, для образцов с добавками также значительно снижается. Так, этот показатель для асфальтобетона

без добавок составляет 0,12мм/1000 циклов, тогда как угол наклона для кривых колееобразования для образцов асфальтобетона с добавками составил 0,06мм/1000 циклов. Таким образом, применение добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 улучшает устойчивость асфальтобетона к пластическим деформациям и будет способствовать повышению долговечности асфальтобетона.

Наиболее высокие показатели устойчивости к колееобразованию асфальтобетона с применением Вискодор ПВ-2 объясняются его лучшим уплотнением при формовании образцов, вследствие наличия в добавке ПАВ и пластификаторов. В этом случае происходит меньшее доуплотнение асфальтобетона, чем в образцах с использованием исходного битума и вяжущего, модифицированного воском Licomont BS-100.

По критерию устойчивости к пластическим деформациям был выполнен расчет срока службы согласно методике [199], по формуле 4.1:

$$T_{\text{пласт}} = (K_{\text{усл}} \cdot H_{\text{кр}}) / (H_1 \cdot I_{\text{расч}} \cdot T_{50}); \quad (4.1)$$

где $K_{\text{усл}}$ – коэффициент условий движения ($K_{\text{усл}} = 1,3$);

$H_{\text{кр}}$ – критическая глубина колеи, м (согласно ОДН 218.0.006-2002 для дорог с расчетной скоростью 100 и более км. в час составляет 0,02 м);

H_1 – глубина колеи после одного цикла воздействия колесной нагрузки, м;

$I_{\text{расч}}$ – интенсивность расчетной нагрузки, авт/час ($I_{\text{расч}} = 200$ авт./час);

T_{50} – сумма времени в году с температурой покрытия 50 °С и выше (при отсутствии заданных условий региона T_{50} принимают равным 190 ч/год).

Глубину колеи после одного цикла нагрузки определяли по формуле 4.2:

$$H_1 = \frac{h_2 - h_1}{N_2 - N_1} 0,001; \quad (4.2)$$

где N_1 – минимальное количество циклов прохода колеса, принимаемое в расчете (равно 2000);

N_2 – максимальное количество циклов прохода колеса, принимаемое в расчете (равно 10000);

h_1 – глубина колеи после минимального количества циклов прохода колеса;

h_2 – глубина колеи после максимального количества циклов прохода колеса.

Результаты расчета срока службы дорожного покрытия на основе испытываемых образцов асфальтобетона представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Расчет срока службы дорожного покрытия

Показатель	Асфальтобетон на основе битумного вяжущего		
	без добавки	с Вискодор ПВ-2	с Licomont BS-100
Глубина колеи после минимального количества циклов прохода колеса	2,6	1,8	1,9
Глубина колеи после максимального количества циклов прохода колеса	3,9	2,3	2,6
Глубина колеи после 1 цикла нагрузки	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$6,2 \cdot 10^{-8}$	$8,7 \cdot 10^{-8}$
Расчетный срок службы дорожного покрытия, лет	4,9	10,9	7,8

Исходя из полученных результатов можно констатировать, что применение исследуемых органических добавок позволяет значительно повысить долговечность дорожного покрытия. Так, добавка Вискодор ПВ-2 повышает срок службы в 2,2, а Licomont BS-100 – в 1,6 раза.

Согласно ОДМ 218.6.029-2017 рекомендованный гарантийный срок службы для верхнего слоя покрытия при прогнозируемой интенсивности движения 2500-5000 автомобилей в сутки должен быть не менее 6 лет. Таким образом, согласно полученным расчетам асфальтобетонная смесь без добавок не обладает необходимым сроком службы, что делает в данном случае применение добавок, повышающих устойчивость к колееобразованию, обязательным.

4.3 Влияние добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 на старение асфальтобетонной смеси

Срок службы дорожного покрытия значительно снижается из-за склонности асфальтобетона к старению, которое начинается в процессе производства асфальтобетонной смеси и продолжается в течение всего периода эксплуатации дорожного покрытия [200].

Старение асфальтобетона связано со структурными и химическими изменениями, происходящими в составе битумного вяжущего, как во время приготовления, так и в течение всего периода эксплуатации [201]. При старении снижаются пластичные свойства битума, повышается его жесткость и хрупкость, что приводит к разрушению асфальтобетона под воздействием внешних факторов, особенно при низких температурах окружающей среды [179]. При этом наиболее интенсивные изменения происходят во время приготовления, хранения, транспортировки и укладки асфальтобетонных смесей – «технологическое старение» битумного вяжущего. Связано это с тем, что в это время битум находится при высоких температурах в тонкой пленке, покрывающей минеральный наполнитель и подвергается при перемешивании воздействию кислорода воздуха [180, 181].

Известно [51, 179, 202 – 205], что в процессе старения асфальтобетона можно выделить два периода. На первом, до определенного времени, происходит упрочнение структуры асфальтобетона, выражающееся в повышении показателей прочности, водостойкости и трещиностойкости асфальтобетона, что связано с повышением вязкости битума. Затем хрупкость битума значительно повышается, что приводит к ухудшению всех эксплуатационных характеристик асфальтобетона. При этом асфальтобетоны, прочностные свойства которых значительно повышаются на первом этапе старения, склонны к более интенсивному ухудшению свойств на втором этапе старения, что ведет к снижению их долговечности [203].

В работе было оценено влияние добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 и снижения температуры приготовления на интенсивность старения асфальтобетонной смеси.

О старении судили по изменению физико-механических показателей асфальтобетонной смеси типа Б марки III. Температура приготовления асфальтобетонной смеси без добавки составляла 160°C, с добавкой – 135 °С.

Для моделирования процессов старения, смеси выдерживались при температуре их приготовления от 30 до 120 минут, затем охлаждались до температуры формования образцов для испытания (135°C для асфальтобетонной смеси без добавки и 110°C

для смесей с добавками). О старении асфальтобетонной смеси судили по изменению физико-механических показателей, таких как предел прочности при сжатии при 50 и 20°C, водостойкость и трещиностойкость, определяемых по стандартным методикам согласно ГОСТ 12801.

Для оценки интенсивности старения по всем тестируемым показателям были определены коэффициенты старения по формуле 4.3, предложенной сотрудниками Поволжского государственного технологического университета [206]:

$$K_{ст} = \frac{P_{ni}^{t_{пр}}}{P_{ni}^{t_{пр}=0}}; \quad (4.3)$$

где $P_{ni}^{t_{пр}}$ – значение n -го физико-химического свойства образца асфальтобетона из смеси после термостатирования при высокой температуре;

$P_{ni}^{t_{пр}=0}$ – значение того же показателя до прогрева.

Результаты исследования изменений свойств асфальтобетонных смесей, приготовленных на основе исходного и модифицированных вяжущих после старения, представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Изменение характеристик асфальтобетона в результате старения

Наименование показателя	Время термостатирования, час				
	Без прогрева	0,5	1	1,5	2
Асфальтобетонная смесь на исходном битуме без добавок					
Средняя плотность, г/см ³	2,42	2,43	2,43	2,43	2,43
Предел прочности при 20 °С, МПа	3,5	3,9	4,3	4,6	4,7
Предел прочности при 50 °С, МПа	1,1	1,2	1,4	1,7	1,8
Предел прочности водонасыщенных образцов, МПа	2,9	3,4	3,8	4,1	4,3
Водостойкость	0,83	0,87	0,88	0,89	0,91
Трещиностойкость	3,7	3,9	4,2	4,4	4,5
Коэффициент старения по прочности при 20°C		1,11	1,23	1,31	1,34
Коэффициент старения по прочности при 50°C		1,09	1,27	1,55	1,64
Коэффициент старения по водостойкости		1,05	1,06	1,07	1,07
Коэффициент старения по трещиностойкости		1,05	1,14	1,19	1,22

Наименование показателя	Время термостатирования, час				
	Без прогрева	0,5	1	1,5	2
Асфальтобетонная смесь на битумном вяжущем с 2% Вискодор ПВ-2					
Средняя плотность, г/см ³	2,43	2,43	2,43	2,43	2,44
Предел прочности при 20 °С, МПа	4,5	4,6	4,9	5,2	5,3
Предел прочности при 50 °С, МПа	1,5	1,6	1,8	1,9	2
Предел прочности водонасыщенных образцов, МПа	3,9	4,1	4,4	4,8	4,9
Водостойкость	0,87	0,89	0,90	0,92	0,92
Трещиностойкость	3,8	3,9	4,1	4,2	4,2
Коэффициент старения по прочности при 20°С		1,02	1,09	1,16	1,18
Коэффициент старения по прочности при 50°С		1,07	1,20	1,27	1,33
Коэффициент старения по водостойкости		1,02	1,03	1,06	1,06
Коэффициент старения по трещиностойкости		1,03	1,08	1,10	1,10
Асфальтобетонная смесь на битумном вяжущем с 2% Licomont BS-100					
Средняя плотность, г/см ³	2,43	2,43	2,43	2,43	2,43
Предел прочности при 20 °С, МПа	4,3	4,5	4,9	5,2	5,4
Предел прочности при 50 °С, МПа	1,4	1,5	1,7	1,9	2,1
Предел прочности водонасыщенных образцов, МПа	3,7	4,0	4,4	4,8	4,9
Водостойкость	0,86	0,89	0,90	0,91	0,92
Трещиностойкость	3,6	3,7	4,0	4,2	4,2
Коэффициент старения по прочности при 20°С		1,05	1,14	1,21	1,26
Коэффициент старения по прочности при 50°С		1,07	1,21	1,36	1,50
Коэффициент старения по водостойкости		1,03	1,05	1,07	1,07
Коэффициент старения по трещиностойкости		1,03	1,11	1,17	1,17

Динамика изменения показателей пределов прочности представлена на рисунке 4.7.

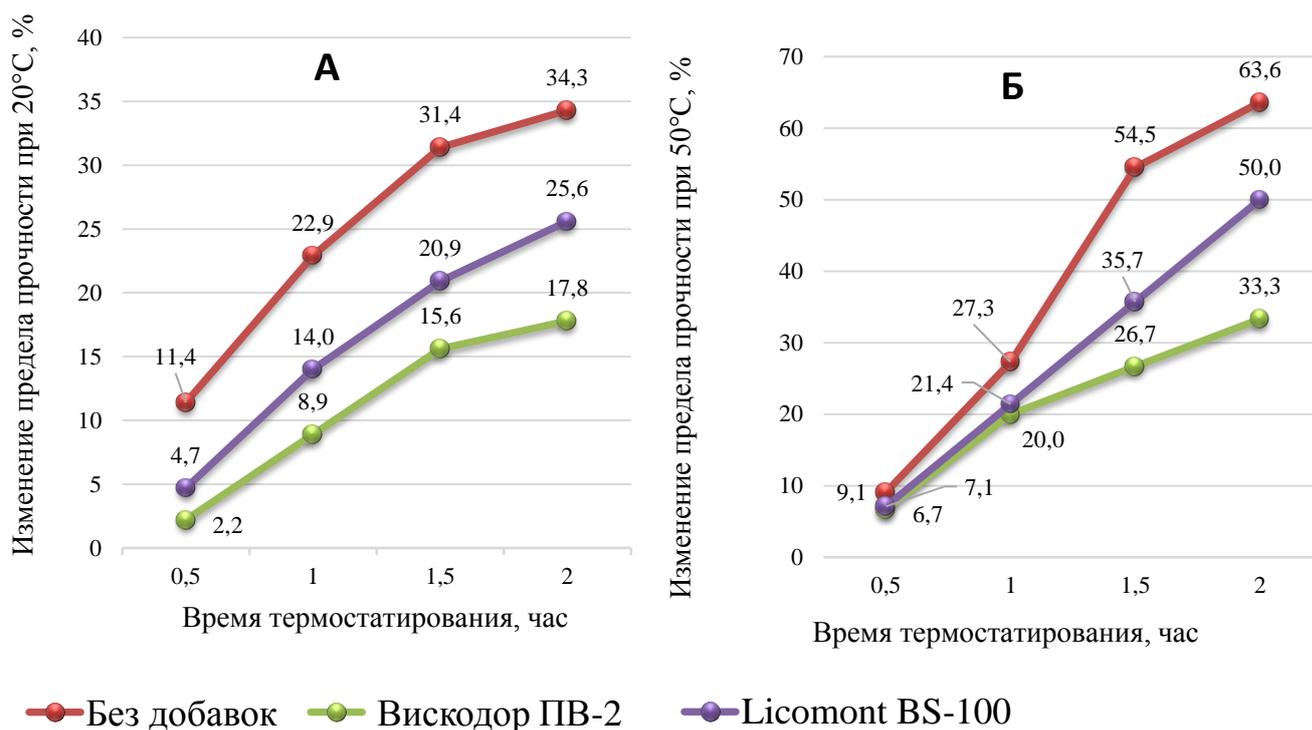


Рисунок 4.7 – Изменения предела прочности асфальтобетона в результате старения асфальтобетонной смеси: А –при 20°C; Б –при 50°C

Анализируя представленные в таблице 2 результаты, можно отметить, что образцы, полученные из асфальтобетонных смесей с применением исследуемых добавок, приготовленные при температуре 135°C и уплотненные при 110°C практически идентичны по показателю плотности образцам из асфальтобетонной смеси без добавки, приготовленной при температуре 160°C и уплотненным при 135°C, что свидетельствует о том, что тестируемые добавки могут быть использованы как температуропонижающие для приготовления теплого асфальтобетона.

Согласно результатам, полученным при выдержке асфальтобетонных смесей при температуре их приготовления в период от 30 до 120 минут, можно отметить тенденцию к возрастанию всех прочностных показателей. При этом наиболее значительные изменения наблюдаются при тестировании показателей предела прочности при 20 и 50°C (таблица 4.12). Подобная динамика изменений показателей наблюдалась и в работах [51, 179, 202]. В течение всего времени термостатирования от 30 до 120 минут происходит постепенный прирост

показателей, что свидетельствует о том, что в данном случае асфальтобетонная смесь подвергается первому этапу старения, во время которого происходит упрочнение коллоидной структуры и возрастание вязкости битумного вяжущего [203].

Как видно из таблицы 4.12, показатели пределов прочности смесей, модифицированных добавками Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100, выше, чем у смеси на исходном битуме без добавок. Это связано с упрочнением структуры вяжущего восками, входящими в состав используемых добавок и положительно скажется на эксплуатационных свойствах дорожного покрытия в условиях высоких транспортных нагрузок.

При оценке интенсивности старения по показателям прочности при 20 и 50°C, можно отметить, что прирост прочности для смеси без добавки значительно выше, чем для смесей с добавками. Наименьший прирост прочности наблюдается при использовании добавки Вискодор ПВ-2, что отражается на значениях коэффициентов старения по прочности (таблица 4.12) и отражено на графиках А и Б на рисунке 4.7. Так, после 120 минут термостатирования смеси без добавок увеличение прочности при 20 и 50°C составляет 34,3% и 63,6%, для смеси с Licomont BS-100 данные показатели возрастают на 25,6 и 50,0%, а для смеси с Вискодор ПВ-2 – только на 17,8 и 33,3%. Это свидетельствует о том, что снижение температуры приготовления, а также введенные добавки обладают ингибирующим действием на процессы старения асфальтобетонной смеси, что обусловлено снижением интенсивности деградиационных процессов в составе битумного вяжущего выявленного по результатам испытаний, представленных в главе 3. Наибольшая эффективность Вискодор ПВ-2 объясняется наличием в составе этой добавки катионных ПАВ, которые замедляют процессы деструкции вяжущего [60].

Динамика изменения показателя водостойкости представлена графически на рисунке 4.8.

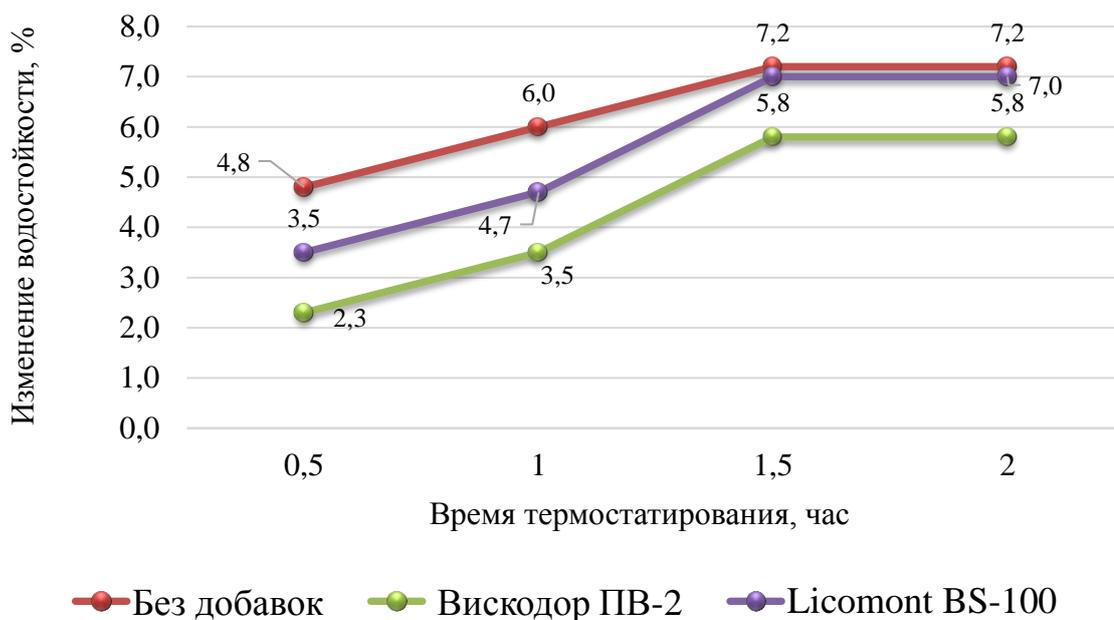


Рисунок 4.8 – Изменения водостойкости асфальтобетона в результате термоокислительного старения асфальтобетонной смеси.

Водостойкость асфальтобетонных смесей с исследуемыми добавками при оценке на этапе до технологического старения значительно выше, чем у контрольной смеси без добавок. Таким образом, добавки Licomont BS-100 и Вискодор ПВ-2 позволят улучшить устойчивость асфальтобетонного покрытия к разрушающему воздействию воды и повысят долговечность асфальтобетонного покрытия.

В результате технологического старения, показатель водостойкости возрастает для всех тестируемых асфальтобетонных смесей, что связано с повышением прочности на первом этапе процессов старения. В данном случае также выявлена тенденция к понижению прироста показателя при использовании органических добавок и более низкой температуры приготовления.

Так, изменение водостойкости при термостатировании в течение 120 минут асфальтобетонной смеси без добавок составляет 7,2%, смеси с Licomont BS-100 – 7,0%, а смеси с Вискодор ПВ-2 – 5,8%.

Динамика изменения показателя трещиностойкости представлена графически на рисунке 4.9.

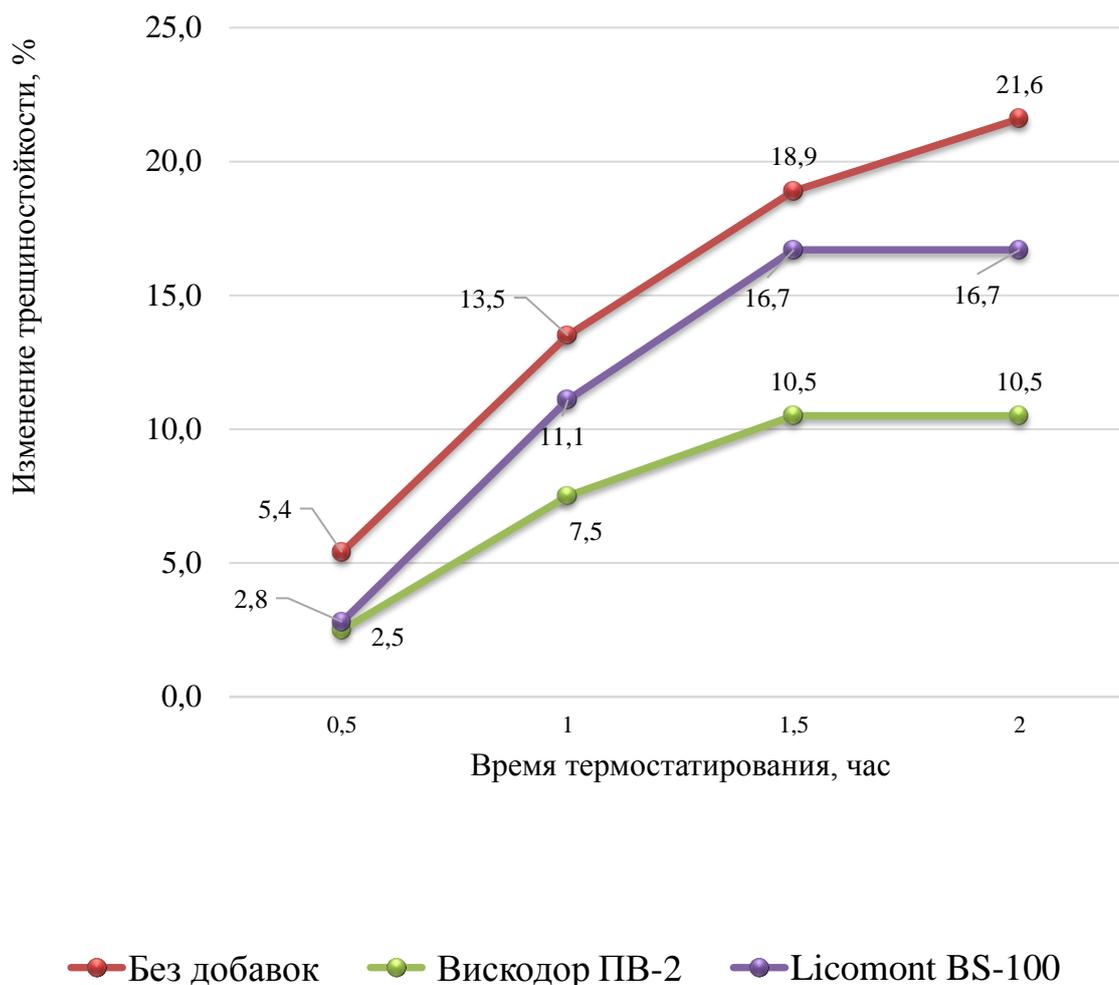


Рисунок 4.9 – Изменения трещиностойкости асфальтобетона в результате термоокислительного старения асфальтобетонной смеси.

Представленные результаты показывают, что в результате термостатирования при температурах приготовления возрастает показатель трещиностойкости, что также связано с повышением когезии вяжущего при упрочнении коллоидной структуры на первом этапе старения. Интенсивность прироста также наибольшая для смеси без добавок – прирост за 120 минут составил 21,6%, и наименьшая для смеси с добавкой Вискодор ПВ-2 – прирост 10,5% (график Г рисунка 1), что также свидетельствует о способности добавки снижать интенсивность процессов старения. В свою очередь, замедление деструкционных процессов позволит лучше сохранить пластические свойства битумного вяжущего, повысит срок службы дорожного покрытия и сократит расходы на ремонтные работы.

4.4 Выводы

1. Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение по модифицированию битума полифункциональной добавкой на основе синтетических восков и его применению в рецептурах теплых асфальтобетонных смесей для производства асфальтобетона с улучшенными характеристиками и повышенной долговечностью дорожного покрытия. Благодаря рациональному соотношению восков, пластификатора растительного происхождения и ПАВ, добавка изменяет структуру и свойства битумного вяжущего, что позволяет: снизить температуру приготовления и укладки уплотнения асфальтобетонных смесей без потери качества асфальтобетона; повысить устойчивость к пластическим деформациям, прочность и долговечность, а также улучшить устойчивость асфальтобетона к воздействию низких температур. В отличие от импортных аналогов, разработанная добавка не снижает трещиностойкость асфальтобетона.

2. Установлено, что применение в составе асфальтобетона типа Б добавки Вискодор ПВ-2 в концентрации 2% от массы битумного вяжущего обеспечило увеличение прочности при 50°C на 22,9%, при 20°C – на 33,3%, при снижении температуры приготовления и уплотнения на 25°C, что обусловлено изменением динамической вязкости, расширением интервала пластичности, повышением структурированности модифицированного добавкой битумного вяжущего.

3. Выявлено, что асфальтобетоны типа Б и А16Вн, приготовленные с применением битумного вяжущего, модифицированного добавкой Вискодор ПВ-2, обладают большей водостойкостью, чем асфальтобетон на основе немодифицированного битума. Повышение устойчивости асфальтобетона к разрушающему воздействию воды, связанное с увеличением адгезионных свойств вяжущего за счет наличия ПАВ в составе разработанной добавки, окажет положительное влияние на долговечность дорожного покрытия.

4. Показано, что использование полифункциональной добавки Вискодор ПВ-2 в составе асфальтобетона типа А16Вн повышает показатель разрушающей

нагрузки по Маршаллу на 41,2%, понижает деформацию по Маршаллу на 35,3% по сравнению с асфальтобетоном без применения добавок, что будет способствовать повышению устойчивости асфальтобетона к воздействию циклических нагрузок.

5. Выявлено, что применение добавки Вискодор ПВ-2 в составе литой асфальтобетонной смеси типа ЛА16Вн позволяет улучшить ее удобоукладываемость, понизить температуру укладки на 30°C и глубину вдавливания штампа, что обусловлено комплексным влиянием компонентов, входящих в состав добавки и приведет к повышению устойчивости покрытия к пластическим деформациям.

6. Установлено, что Вискодор ПВ-2 в составе асфальтобетона типа А16Вн повышает устойчивость к колееобразованию. Глубина колеи снижается до 2,6 мм с 4,5 мм для асфальтобетона без добавок, а расчетный срок службы дорожного покрытия, рассчитанный по критерию «критической глубины колееобразования» повышается в 3,8 раза.

7. Выявлено, что Вискодор ПВ-2 в составе асфальтобетонной смеси снижает интенсивность процессов старения битумного вяжущего за счет содержания ПАВ, что позволяет сохранять физико-механические характеристики асфальтобетона в течение более длительного срока эксплуатации.

8. Показано, что новая отечественная добавка Вискодор ПВ-2 в составе теплых и литых асфальтобетонных смесей превосходит по эффективности известные импортные добавки Licomont и Sasobit. Применение Вискодор ПВ-2 взамен дорогостоящих импортных материалов позволит снизить экономические и экологические затраты и повысить срок службы дорожного покрытия.

5 АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ. ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДОБАВКИ ВИСКОДОР ПВ-2 В СОСТАВЕ АСФАЛЬТОБЕТОНА

5.1 Разработка регламентирующей документации и практическое внедрение результатов исследования

С целью обеспечения нормативной базы внедрения результатов работы, совместно с научно-производственной компанией ООО «Селена», разработана следующая документация, обеспечивающая производство полифункциональной добавки на основе синтетических восков для получения теплых асфальтобетонов с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками:

– Стандарт организации «Полифункциональная добавка для битума и асфальтобетона «Вискодор ПВ-2». Технические условия», который устанавливает технические требования к выпускаемой добавке и к применяемому при ее производстве сырью, методы испытаний добавки, область применения и рекомендации по использованию, а также требования безопасности и охраны окружающей среды при производстве, транспортировке и хранении добавки;

– «Технологический регламент на производство полифункциональной добавки для битума и асфальтобетона «Вискодор ПВ-2», описывающий технологический режим, порядок основных операций производства, контроль качества добавки, а также требования безопасности ведения процесса.

Апробация технологии получения асфальтобетона с использованием полифункциональной добавки Вискодор ПВ-2 проводилась при участии следующих организаций: ГКУ «Управление автомобильных дорог общего пользования и транспорта Белгородской области», ООО «Селена», ООО «Автодорстрой-Подрядчик».

Выпуск опытно-промышленных партий полифункциональной добавки на основе синтетических восков «Вискодор ПВ-2» производился на базе научно-

производственного предприятия ООО «Селена», специализирующемся на производстве химических материалов для дорожного строительства.

С целью оценки эффективности добавки при производстве и укладке асфальтобетонной смеси осуществлены промышленные испытания при участии дорожно-строительной организации ООО «Автодорстрой-Подрядчик».

Для выполнения работ запроектирована асфальтобетонная смесь типа А16Вн теплая по ГОСТ Р 58406.2-2020 на основе щебня фракций 8-16 мм и 4 – 8мм производства РУП «Гранит», отсева дробления фракции 0 – 4 мм производства АО «Павловск Неруд», а также минерального порошка МП-2 производства ООО «ВЗПМ».

В качестве вяжущего применялся модифицированный 2% добавки битум БНД 70/100. На контрольном участке в качестве вяжущего использован битум БНД 70/100 без внесения добавок. Количество вяжущего в обоих случаях составляло 5,80% сверх массы минеральной части.

Приготовление асфальтобетонной смеси без добавки осуществлялось при температуре 165°С, а укладка при температуре 140°С. Приготовление теплой асфальтобетонной смеси с добавкой Вискодор ПВ-2 производилось при температуре 135°С, а укладка – при 110° С.

Подобранный зерновой состав минеральной части представлен на рисунке 5.1. Составы тестируемых асфальтобетонных смесей А16Вн представлены в таблицах 5.1 и 5.2.

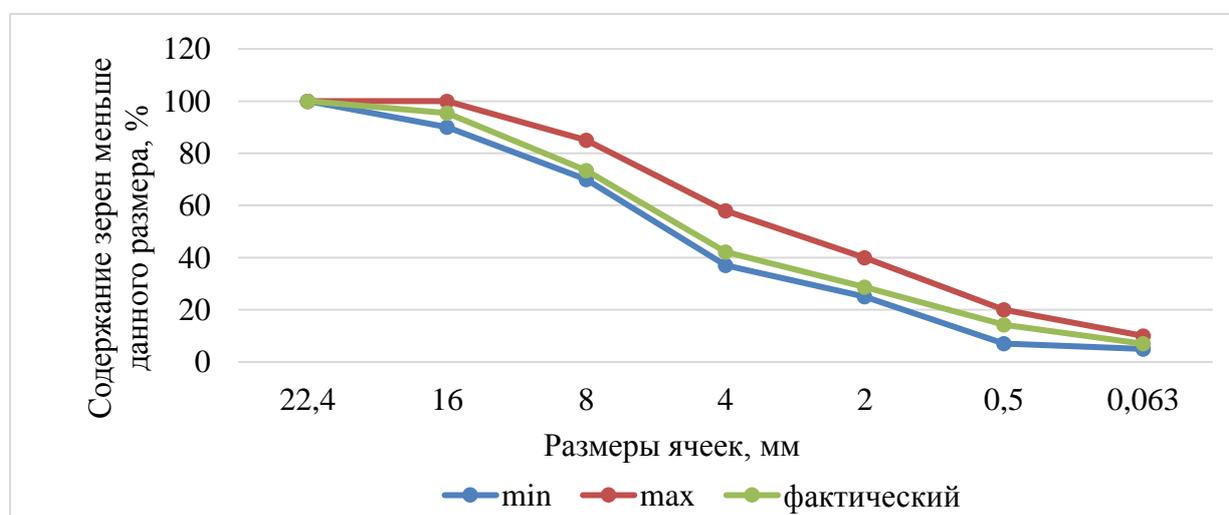


Рисунок 5.1 – График зернового состава минеральной части смеси

Таблица 5.1 – Состав асфальтобетонной смеси А16Вн

Наименование компонента смеси	Состав смеси		Количество, кг, на 1000 кг смеси
	битумное вяжущее сверх 100%	битумное вяжущее в 100%	
Щебень фр. 8–16 мм	37,51	35,45	354,5
Щебень фр. 4–8 мм	18,75	17,72	177,2
Отсев дробления фр. 4–8 мм	40,00	37,81	378,1
Минеральный порошок МП-2	3,74	3,54	35,4
Битумное вяжущее: (БНД 70/100 для А16Вн; БНД 70/100+2% Вискодор ПВ-2 для А16Вн теплая)	5,80	5,48	54,8

Асфальтобетонная смесь была произведена на заводе Benninghoven TBA 2000. Результаты испытаний физико-механических и эксплуатационных характеристик исследуемого и контрольного образцов асфальтобетонной смеси представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты испытаний характеристик асфальтобетонной смеси

Показатели	Требования ГОСТ Р 58406.2 – 2020 к А16Вн	Состав А16Вн без добавки (контрольный участок)	Требования ГОСТ Р 70396 – 2022 к А16Вн теплой	Состав А16Вн теплой с Вискодор ПВ-2 (опытный участок)
Объемная плотность, г/см ³	не нормируется	2,424	не нормируется	2,420
Максимальная плотность, г/см ³	не нормируется	2,467	не нормируется	2,459
Содержание воздушных пустот, %	2,5-4,5	2,9	2,5-4,5	2,7
Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ), %	≥ 12,0	14,2	≥ 12,0	14,2
Коэффициент водостойкости	≥ 0,85	0,90	≥ 0,85	0,95
Разрушающая нагрузка по Маршаллу, Н	≥ 5340	9250	≥ 4300	10940
Деформация по Маршаллу, мм	2,0-4,0	3,1	2,0-4,5	2,2
Средняя глубина колеи, мм	≤ 4,5	3,6	≤ 5,5	2,1

Согласно приведенным результатам, все определенные показатели асфальтобетонной смеси соответствуют нормативным требованиям, что свидетельствует о правильном подборе состава. Объемная плотность и содержание воздушных пустот теплой асфальтобетонной смеси с исследуемой добавкой незначительно отличается от контрольной горячей смеси без добавок. Это указывает на то, что снижение температуры приготовления и укладки не ухудшает уплотняемость теплой асфальтобетонной смеси, содержащей в составе добавку Вискодор ПВ-2. Кроме того, наблюдается улучшение таких показателей, как коэффициент водостойкости, разрушающая нагрузка и деформация по Маршаллу, средняя глубина колеи.

Укладка асфальтобетонной смеси была осуществлена на участке автомобильной дороги в микрорайоне «Шишино-84» ул. 70 лет Победы км 0+30 по км 0+230.

Физико-механические характеристики отобранных из асфальтобетонного покрытия кернов представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты испытаний кернов, отобранных с опытного и контрольного участка

Показатели	Вырубки							
	БНД 70/100			Требования ГОСТ Р 58406.2- 2020 к А16Вн	БНД 70/100+ 2% Вискодор ПВ-2			Требования ГОСТ Р 70396- 2022 к А16Вн теплой
	км 0+030, право	км 0+130, ось	км 0+230, лево		км 0+330, право	км 0+430, ось	км 0+530, лево	
Объемная плотность, г/см ³	2,420	2,422	2,427	не норм.	2,425	2,423	2,422	не норм.
Содержание воздушных пустот, %	3,0	2,9	2,9	1,0 – 6,0	2,9	2,8	2,9	2,0 – 6,0

Представленные результаты испытаний лабораторных испытаний свидетельствуют, что физико-химические свойства отобранных образцов асфальтобетонного покрытия соответствуют требованиям ГОСТ Р 58406.2-2020 и ГОСТ Р 70396-2022.

За опытным участком было установлено наблюдение. Через год был произведен отбор вырубок дорожного покрытия для мониторинга свойств асфальтобетона и асфальтобетонной смеси. Результаты исследования представлены в таблицах 5.4. и 5.5.

Таблица 5.4 – Результаты испытаний кернов, отобранных с опытного и контрольного участка асфальтобетонного покрытия через год после укладки

Показатели	Вырубки							
	БНД 70/100			Требования ГОСТ Р 58406.2-2020 к А16Вн	БНД 70/100+ 2% Вискодор ПВ-2			Требования ГОСТ Р 70396-2022 к А16Вн теплая
	км 0+030, право	км 0+130, ось	км 0+230, лево		км 0+330, право	км 0+430, ось	км 0+530, лево	
Объемная плотность, г/см ³	2,418	2,415	2,420	не норм.	2,421	2,425	2,426	не норм.
Содержание воздушных пустот, %	2,7	2,9	3,1	1,0 – 6,0	3,0	2,8	2,7	2,0 – 6,0

Таблица 5.5 – Результаты испытаний свойств асфальтобетона через год эксплуатации дорожного покрытия

Показатели	Точка отбора			
	Контрольный участок	Требования ГОСТ Р 58406.2 – 2020 к А16Вн	Опытный участок	Требования ГОСТ Р 70396 – 2022 к А16Вн теплой
Объемная плотность, г/см ³	2,415	не нормируется	2,418	не нормируется
Содержание воздушных пустот, %	3,0	2,0-6,0	2,8	2,0-6,0
Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ), %	14,3	≥ 12,0	14,4	≥ 12,0
Коэффициент водостойкости	0,88	≥ 0,85	0,94	≥ 0,85
Разрушающая нагрузка по Маршаллу, Н	9140	≥ 5340	10420	≥ 4300
Деформация по Маршаллу, мм	3,1	2,0 – 4,0	2,2	2,0 – 4,5

Приведенные данные свидетельствуют, что через 1 год эксплуатации характеристики асфальтобетона как на контрольном, так и на опытном участке соответствуют требованиям ГОСТ Р 58406.2-2020. При этом асфальтобетон, отобранный на опытном участке, обладает большей водостойкостью и лучшими показателями разрушающей нагрузки и деформации по Маршаллу, чем на контрольном, что указывает на большую устойчивость асфальтобетона, приготовленного с разработанной добавкой, к воздействию атмосферных осадков и транспортных нагрузок.

Также разработанная добавка была успешно протестирована на предприятиях:

- ООО «ДСУ-Инж-Строй» при производстве щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси ЩМА-16 на АБЗ-1 п. Мстихино, Калужская обл.;

- ТОО «СITIC Construction Co LTD» (Республика Казахстан, г. Актау) при производстве полимерно-щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси ПЩМА-16 для реконструкции автомобильной дороги на участке автодороги Центр-Юг Астана-Караганда-Балхаш-Алматы км 1666-1713;

- ООО «CAPITAL ROAD CONSTRUCTION» (Республика Узбекистан, г. Ташкент), при производстве полимерно-щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси ПЩМА-20 и укладке ее на автодороге ул. Фароби, Малая кольцевая дорога города Ташкента.

По результатам испытаний приготовленная на ООО «ДСУ-Инж-Строй» (АБЗ - 1 п. Мстихино, Калужская область), щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь ЩМА-16 обладала следующими физико-механическими показателями: объемная плотность – 2,431 г/см³; максимальная плотность – 2,520 г/см³; содержание воздушных пустот – 3,5%; показатель стекания вяжущего – 0,04% и соответствовала требованиям ГОСТ Р 59406.1 – 2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси щебеночно-мастичные асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия».

При использовании добавки Вискодор ПВ-2 на ТОО «СITIC Construction Co LTD» приготовленная смесь ПЩМА 16

соответствовала требованиям СТ РК 2373-2019 «Смеси щебёночно-мастичные полимерасфальтобетонные дорожные, аэродромные и щебёночно-мастичный полимерасфальтобетон. Технические условия», действующему на территории Республики Казахстан.

На предприятии ООО «CAPITAL ROAD CONSTRUCTION» была получена полимерно-щебёночно-мастичная смесь ПЩМА-20, с показателями: водонасыщение – 3,0 – 3,9%; остаточная пористость – 3,5 – 4,2%; средняя плотность – 2,38 – 2,42 г/см³; глубина колеобразования – 2,5 – 2,9 мм; прочность на сжатие при 50°C – 2,5 – 2,9 МПа; прочность на сжатие при 20°C – 6,9 МПа; водостойкость после длительного водонасыщения – 0,86 – 0,89. Физико-механические свойства полимерно-щебёночно-мастичной асфальтобетонной смеси ПЩМА-20 соответствовали требованиям УзДСт 3610-2022 «Щебёночно-мастичные полимерасфальтобетонные смеси и щебёночно-мастичные полимерасфальтобетоны для дорог и аэродромов. Технические условия», действующему на территории Республики Узбекистан.

5.2 Экономическая эффективность использования добавки Вискодор ПВ-2 в составе асфальтобетонных смесей

Оценка экономической эффективности применения Вискодор ПВ-2 производилась путем сравнения себестоимости выпуска асфальтобетонных смесей с разработанной добавкой в сравнении с использованием в составе импортной добавки Licomont BS-100.

Произведен расчет себестоимости асфальтобетонной смеси типа А16Вн трех вариантов: без применения температуропонижающих добавок (таблица 5.6) и с применением добавок Вискодор ПВ-2 (таблица 5.7) и Licomont BS-100 (таблица 5.8). Согласно исследований [44, 45], снижение температуры приготовления асфальтобетонной смеси на 30°C позволяет экономить 22% газа, что учтено при расчетах в таблицах 5.7 и 5.8.

Таблица 5.6 – Расчет стоимости затрат производства 100 т горячей асфальтобетонной смеси А16Вн без применения добавок

Статья затрат	Количество элементов затрат	Цена единицы измерения, руб	Итого стоимость, руб
Труд рабочих, чел.-ч	22,58	297,60	6719,81
Труд машинистов	56,34	357,10	20119,01
АБЗ, маш.-ч.	1,2	4020,50	4824,60
Автопогрузчики 5т, маш.-ч	3,70	1442,55	5337,44
Расход газа, м3	10500	9,09	95445,00
Щебень, т	53,17	1550,00	82413,50
Песок из отсевов дробления, т	37,81	650,00	24576,50
Порошок минеральный, т	3,54	2300,00	8142,00
Битум, т	5,48	28000,00	153440,00
Итого			401017,86

Таблица 5.7 – Расчет стоимости затрат производства 100 т теплой асфальтобетонной смеси А16Вн с Вискодор ПВ-2

Статья затрат	Количество элементов затрат	Цена единицы измерения, руб	Итого стоимость, руб
Труд рабочих, чел.-ч	22,58	297,60	6719,81
Труд машинистов	56,34	357,10	20119,01
АБЗ, маш.-ч.	1,2	4020,50	4824,60
Автопогрузчики 5т, маш.-ч	3,70	1442,55	5337,44
Расход газа, м3	8190	9,09	74447,10
Щебень, т	53,17	1550,00	82413,50
Песок из отсевов дробления, т	37,81	650,00	24576,50
Порошок минеральный, т	3,54	2300,00	8142,00
Битум, т	5,37	28000,00	150360,00
Вискодор ПВ-2	0,11	340000	37400,00
Итого			414339,96

Таблица 5.8 – Расчет стоимости затрат производства 100 т тепловой асфальтобетонной смеси А16Вн с Licomont BS-100

Статья затрат	Количество элементов затрат	Цена единицы измерения, руб	Итого стоимость, руб
Труд рабочих, чел.-ч	22,58	297,60	6719,81
Труд машинистов	56,34	357,10	20119,01
АБЗ, маш.-ч.	1,2	4020,50	4824,60
Автопогрузчики 5т, маш.-ч	3,70	1442,55	5337,44
Расход газа, м ³	8190	9,09	74447,10
Щебень, т	53,17	1550,00	82413,50
Песок из отсевов дробления, т	37,81	650,00	24576,50
Порошок минеральный, т	3,54	2300,00	8142,00
Битум, т	5,37	28000,00	150360,00
Licomont BS-100	0,11	550000	60500,00
		Итого	437439,96

Из приведенных расчетов стоимость производства 100 т асфальтобетонной смеси составляет 401017,86 рублей.

Применение температуропонижающих добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 позволяют снизить расход газа на нагрев асфальтобетонной смеси до температуры приготовления на 22%, но это не компенсирует стоимость применяемой добавки. Так, стоимость 100 т асфальтобетонной смеси с Вискодор ПВ-2 – 414339,96 рублей, а с Licomont BS-100 составляет 437439,96 рублей. Следовательно, применение добавки Вискодор ПВ-2 повышает стоимость производства асфальтобетонной смеси на 3,3 %, а Licomont BS-100 – на 9,1 %. Однако, учитывая рассчитанное в главе 4 повышение срока службы дорожного покрытия с Вискодор ПВ-2 в 2,2 раза, а с Licomont BS-100 – т в 1,6 раза, экономия от применения этих добавок становится очевидной.

Анализ себестоимостей асфальтобетонной смеси типа А16Вн, приготовленной с использованием температуропонижающих добавок, показывает, что экономия от замены импортной добавки Licomont BS-100 на отечественную добавку Вискодор ПВ-2 составляет 5,3%, что также не учитывает дополнительную экономию от большего увеличения срока службы при использовании последней.

Согласно норматива ГЭСН 81-02-27-2022 [207], а также на основании полученных показателей стоимости асфальтобетонных смесей с использованием исходного битума, а также модифицированного добавками Licomont BS-100 и Вискодор ПВ-2 без добавок БНД 70/100, рассчитана стоимость устройства 1000 м² дорожного покрытия из асфальтобетонной смеси А16Вн (таблица 5.9).

Таблица 5.9 – Расчет стоимости укладки 1000 м² дорожного покрытия из асфальтобетонной смеси типа А16Вн

Статья затрат	Количество элементов затрат	Цена единицы измерения, руб	Итого стоимость покрытия с использованием асфальтобетонной смеси на вяжущем, руб		
			без добавки	с Licomont BS-100	с Вискодор ПВ-2
ЗАТРАТЫ ТРУДА РАБОЧИХ					
Затраты труда рабочих-строителей, чел.-ч средний разряд работы -3,7	16,63	297,60		4949,09	
Затраты труда машинистов, чел.-ч	7,86	357,10		2806,81	
МАШИНЫ И МЕХАНИЗМЫ					
Асфальтоукладчики гусеничные, маш.-ч	1,42	4443,27		6309,44	
Автоудронаторы, маш.-ч	0,33	1324,58		437,11	
Гудронаторы ручные, маш.-ч	0,1	8,22		0,82	
Катки самоходные комбинированные, маш.-ч	2,05	132,38		271,38	
Катки самоходные гладкие, маш.-ч	1,6	913,28		1461,25	
Перегрузатели асфальтовой смеси, маш.-ч	1,42	8883,76		12614,94	
Машины поливомоечные, маш.-ч	0,71	1043,14		740,63	
МАТЕРИАЛЫ					
Битумы нефтяные дорожные, т	0,7	2800,00		1960,00	
Керосин для технических целей, т	0,0028	83000,00		232,40	
Смесь асфальтобетонная А16Вн, т	120,03	4010,17	481340,71	-	-
- на БНД без добавок					
- с Вискодор ПВ-2		4143,40	-	497332,30	-
- с Licomont BS-100		4374,40	-	-	525059,23
		ИТОГО	513124,58	529116,17	556843,10

Калькуляция стоимости устройства покрытия показала, что применение добавок Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100 приводят к удорожанию устройства дорожного полотна на 3,1 и 8,4% соответственно. При этом экономия от замены импортной добавки Licomont BS-100 на Вискодор ПВ-2 составила 5,2%.

Приведенный расчет не учитывает значительного повышения срока службы асфальтобетонного покрытия с применением исследуемых добавок, что позволит снизить затраты при проведении ремонтных работ.

При расчете экономической эффективности, согласно «Методическим рекомендациям по оценке эффективности строительства, реконструкции, капитального ремонта и ремонта автомобильных дорог» [208], одним из основных показателей оценки экономической эффективности применения инновационных технологий является чистый дисконтированный доход (ЧДД), который определяется по формуле:

$$\text{ЧДД} = \text{ДЗ}_{\text{бс}} - \text{ДЗ}_{\text{ис}} ; \quad (5.1)$$

где: $\text{ДЗ}_{\text{бс}}$ – интегральные дисконтируемые затраты на устройство и содержание дорожного полотна согласно традиционных технологий;

$\text{ДЗ}_{\text{ис}}$ – интегральные дисконтируемые затраты на устройство и содержание дорожного полотна согласно инновационных технологий;

Формулы расчета интегральных дисконтированных затрат от устройства и эксплуатации традиционных ($\text{ДЗ}_{\text{бс}}$) / инновационных технологий ($\text{ДЗ}_{\text{ис}}$) на объектах транспортной инфраструктуры рассчитываются следующим образом:

$$\text{ДЗ}_{\text{бс}} = \sum_{i=1}^n \frac{\text{КР}_i^{\text{бс}}}{\prod_{t=1}^{t_i} (1+E_t)} + \sum_{j=1}^m \frac{\text{Р}_j^{\text{бс}}}{\prod_{t=1}^{t_j} (1+E_t)} ; \quad (5.2)$$

$$\text{ДЗ}_{\text{ис}} = \sum_{i=1}^n \frac{\text{КР}_i^{\text{ис}}}{\prod_{t=1}^{t_i} (1+E_t)} + \sum_{j=1}^m \frac{\text{Р}_j^{\text{ис}}}{\prod_{t=1}^{t_j} (1+E_t)} ; \quad (5.3)$$

где, $\text{КР}_i^{\text{бс}}$ – затраты на проведение i -го капитального ремонта дорожного полотна по традиционной технологии;

$KP_i^{ис}$ – затраты на проведение i -го капитального ремонта по инновационной технологии;

$P_j^{бс}$ – затраты на проведение j -го ремонта дорожного полотна по традиционной технологии;

$P_j^{ис}$ – затраты на проведение j -го ремонта дорожного полотна по инновационной технологии;

n – количество капитальных ремонтов за расчетный период T ;

m – количество ремонтов за расчетный период T ;

E_t – общественная норма дисконта в относительных единицах измерения в году t , в долях;

$1/(1+E_t)$ – коэффициент дисконтирования в году t , в долях.

Норма дисконта рассчитывается по формуле:

$$E_t = \left(\frac{(100+r_c)}{(100+i)} + \frac{P}{100} - 1 \right) \times 100, \quad (5.4)$$

Где: r_c – не дисконтированная общественная норма дисконта, % (принимается в виде средней ставки долгосрочной доходности Государственных казначейских обязательств по данным Центробанка РФ на дату выполнения расчета, %. (в 2025 г – составляет 14,99%);

i – годовой темп инфляции, % (значение i устанавливается по строке «Инфляция (ИПЦ) среднегодовая» в соответствии с прогнозом социально-экономического развития Российской Федерации на соответствующий период. Для 2025 года составляет 9,8%).

P – поправка на риск, (в соответствии с ОДМ «Руководство по оценке экономической эффективности использования в дорожном хозяйстве инноваций и достижений научно-технического прогресса [208] для низкого риска равен 3).

Расчет стоимостей затрат на капитальный ремонт и ремонт дорожного полотна представлен в таблицах 5.10 – 5.11.

Таблица 5.10 – Расчет стоимости капитального ремонта 1000 м² дорожного полотна

Наименование работ	Ед. изм.	Кол-во	Цена за единицу с НДС, руб.			Стоимость с НДС, руб.		
			на БНД 70/100	с Вискодор ПВ-2	с Licomont BS-100	на БНД 70/100	с Вискодор ПВ-2	с Licomont BS-100
Устройство подстилающего слоя из песка толщиной 35 см.	м ³	388,5	1376,84			534902,34		
Устройство нижнего слоя основания из щебня фр. 40-70 мм, толщиной 15 см.	м ³	162,0	4296,20			695984,40		
Устройство нижнего слоя основания из щебня фр. 40-70 мм, толщиной 9 см.	м ³	97,2	5151,00			500677,20		
Устройство слоя основания из черного щебня фр. 20-40 мм, толщиной 8 см.	м ³	88,0	7442,25			654918,00		
Устройство нижнего слоя покрытия из асфальтобетона SP-22 толщ. 5 см	м ²	1000	1353,76			1353760,00		
Укладка мастичной ленты на стыках	м ²	7,0	2554,54			17881,78		
Устройство верхнего слоя покрытия из асфальтобетона А16Вн толщ. 5 см,	м ²	1000	513,12	529,12	556,84	513124,58	529116,17	556843,10
ИТОГО стоимость капитального ремонта дорожного покрытия:						4271248,30	4287239,89	4314966,82

Таблица 5.11– Расчет стоимости ремонта 1000 м² дорожного полотна

Наименование работ	Ед. изм.	Кол-во	Цена за единицу с НДС, руб.			Стоимость с НДС, руб.		
			на БНД 70/100	с Вискодор ПВ-2	с Licomont BS-100	на БНД 70/100	с Вискодор ПВ-2	с Licomont BS-100
Фрезерование асфальтобетонного покрытия	м ³	1000	134,49			134490,00		
Устройство нижнего слоя покрытия из асфальтобетона SP-22 , толщиной 5 см	м ³	1000	971,83			971830,00		
Укладка мастичной ленты на стыках а/б покрытия	м ³	6,4	2554,54			16349,06		
Устройство верхнего слоя покрытия из асфальтобетона А16Вн, толщиной 5см	м ³	1000	513,12	529,12	556,84	513124,58	529116,17	556843,10
Укрепление обочин щебнем	м ²	1000	432,08			432080,00		
ИТОГО стоимость ремонта дорожного покрытия:						2067873,64	2083865,23	2111592,16

Для сравнения вариантов затрат на ремонт дорожного покрытия в качестве расчетного периода приняли срок между проведением капитального ремонта, установленный в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 30 мая 2017 года № 658 «О нормативах финансовых затрат и Правилах расчета размера бюджетных ассигнований федерального бюджета на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог федерального значения» - 24 года.

Согласно расчетам, представленным в главе 4, срок ремонта асфальтобетонного покрытия без добавок составлял 4,9 (~5 лет), с добавкой Вискодор ПВ-2 – 10,9 (~11 лет), а с Licomont BS-100 – 7,8 (~8 лет).

На основании рассчитанных межремонтных сроков и стоимостей капитального ремонта и ремонта дорожного покрытия, устроенного с использованием асфальтобетона на немодифицированном и модифицированном исследуемыми добавками битумного вяжущего, произведен расчет экономической эффективности применения Вискодор ПВ-2 и Licomont BS-100, представленный в таблице 5.12.

Таблица 5.12– Расчет экономической эффективности применения исследуемых органических добавок

Годы	Кап. i, руб			Рем. j (руб.		
	Без добавки	с Вискодор ПВ-2	с Licomont BS-100	Без добавки	с Вискодор ПВ-2	с Licomont BS-100
	КР _{бс}	КР _{ис}	КР _{ис}	Р _{бс}	Р _{ис}	Р _{ис}
1	4271248,30	4287239,89	4314966,82			
6				2067873,64		
9						2111592,16
11				2067873,64		
12					2083865,23	
16				2067873,64		
17						2111592,16
21				2067873,64		
25	4271248,30	4287239,89	4314966,82			
Дисконтируемые затраты (ДЗ), руб				15637011,78	9912260,86	11953399,70
ЧДД при использовании Вискодор ПВ-2, руб				5724750,92		
ЧДД при использовании Licomont BS-100, руб				2041138,84		

Приведенные расчеты показывают, что чистый дисконтированный доход (ЧДД) от применения добавки Вискодор ПВ-2 для модифицирования битума за счет снижения затрат на ремонтные работы за период 24 года, составит 5724750,92 рублей, таким образом позволяет получить экономию в 36,6%. Экономическая эффективность от применения импортной добавки значительно ниже: ЧДД составляет 2041138,84 рублей, т.е. экономия составляет 13,1%.

5.2 Экологическая эффективность применения разработанной многофункциональной добавки

В настоящее время во всем мире уделяется большое внимание уделяется задачам сохранения окружающей среды и рационального использования природных ресурсов. В индустрии дорожного строительства эти проблемы особенно актуальны. Производство традиционных горячих асфальтобетонных смесей сопровождается рядом серьезных экологических проблем. Высокие температуры приготовления смесей приводят к значительным выбросам парниковых газов и загрязнению воздуха вредными веществами, такими как оксид углерода, диоксид серы и взвешенные частицы [209]. Кроме того, энергоемкость процесса приводит к высокому потреблению природных ресурсов. Применение температуропонижающих добавок направлено на минимизацию этих проблемы. Поэтому важно оценить экологическую эффективность разработанной многофункциональной добавки.

В качестве критериев оценки экологической эффективности применения температуропонижающей добавки для асфальтобетонных смесей, рассмотрены эмиссия компонентов битумного вяжущего при нагреве до температуры приготовления асфальтобетонной смеси, расход природного газа и эмиссия углекислого газа при получении энергии для нагрева асфальтобетонной смеси до температуры смешивания.

Эмиссия компонентов битумного вяжущего при нагреве до температуры приготовления асфальтобетонной смеси оценивалась посредством определения изменения массы после старения по методу ускоренного старения УСК при

температурах приготовления асфальтобетонной смеси. Результаты приведены в таблице 5.13.

Таблица 5.13 – Оценка эмиссии компонентов битумного вяжущего в процессе приготовления асфальтобетонной смеси

Битумное вяжущее	Температура термостатирования, °С	Потеря массы, %
Битум БНД 70/100	165	0,36
Битум БНД 70/100 модифицированный Вискодор ПВ-2	135	0,14

Снижение температуры приготовления асфальтобетонной смеси, а также ингибирующее действие компонентов добавки Вискодор ПВ-2 приводит к снижению старения битумного вяжущего, что показали также результаты исследования, представленные в главе 3. Это приводит к значительному снижению эмиссии летучих компонентов битумного вяжущего. Так, потеря массы после термостатирования образца вяжущего с Вискодор ПВ-2 в 2,6 раза ниже, чем для исходного битума, что в условиях масштабного производства позволит снизить количество вредных выбросов в окружающую среду.

Для оценки экономии расходуемого на нагрев асфальтобетонной смеси природного газа и эмиссии углекислого газа произведен расчет энергии, необходимой на нагрев асфальтобетонной смеси на вяжущем без добавки до 165°С и на вяжущем с Вискодор ПВ-2 – до 135°С, на основе литературных данных анализа энергозатрат на производство асфальтобетонной смеси [210]. Результаты расчета приведены в таблице 5.14.

Таблица 5.14 – Оценка эмиссии углекислого газа в процессе приготовления асфальтобетонной смеси

Асфальтобетонная смесь, на вяжущем	Температура приготовления, °С	Расход энергии на 1 т смеси, кВт*ч	Расход природного газа на 1 тонну смеси, м°С, м3	Эмиссия углекислого газа, кг
БНД 70/100	165	88,3	10,5	19,4
БНД 70/100 с Вискодор ПВ-2	135	69,9	8,2	15,2

Приведенные данные свидетельствуют, что снижение температуры приготовления асфальтобетонной смеси на 30°C позволяет снизить расход природного газа, затрачиваемого на приготовление смеси на 21,9%. Что приводит к значительному снижению эмиссии углекислого газа в окружающую среду – на 21,6%.

5.3 Выводы

1. Апробация технологии приготовления и укладки асфальтобетонной смеси с применением разработанной полифункциональной добавки показала, что полученный теплый асфальтобетон по своим физико-механическим и эксплуатационным характеристикам соответствует требованиям ГОСТ Р 58406.2 – 2020 и не только не уступает, но и превосходит контрольный асфальтобетон, приготовленный без использования добавок. Мониторинг качества дорожного покрытия через год эксплуатации показал, что асфальтобетонное покрытие с применением добавки обладает большей стабильностью показателей, чем асфальтобетон на немодифицированном битуме.

2. Калькуляция стоимости устройства покрытия с использованием асфальтобетонной смеси А16Вн показала, что экономия за счет замены импортной добавки Licomont на Вискодор ПВ-2 составила 5,2%. При этом, несмотря на то, что использование разработанной полифункциональной добавки повышает стоимость асфальтобетонной смеси на 3,3%, но за счет снижения затрат на ремонтные работы применение добавки позволяет получать экономию затрат на 36,6%. Экономическая эффективность разработанной полифункциональной добавки значительно выше, чем импортной добавки Licomont BS-100.

3. Благодаря снижению температуры приготовления асфальтобетонной смеси, значительно снижается эмиссия летучих компонентов битумного вяжущего. Использование полифункциональной добавки Вискодор ПВ-2 уменьшает энергетические затраты и позволяет снизить потребление энергоресурсов и уменьшить выбросы углекислого газа, связанные с расходом топлива на 21,6%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Дополнены теоретические сведения о механизме воздействия добавок, представляющих собой многокомпонентные системы на основе восков, модифицированных пластификаторами и ПАВ, на структуру и свойства битумного вяжущего и асфальтобетона, позволившие обосновать снижение температуры приготовления и уплотнения асфальтобетонной смеси, замедление интенсивности старения, повышение физико-механических и эксплуатационных характеристик асфальтобетона.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение по модифицированию битума полифункциональной добавкой на основе синтетических восков и его применению в рецептурах теплых асфальтобетонных смесей для производства асфальтобетона с улучшенными характеристиками и повышенной долговечностью дорожного покрытия. Благодаря рациональному соотношению восков, пластификатора растительного происхождения и ПАВ, добавка изменяет структуру и свойства битумного вяжущего, что позволяет: снизить температуру приготовления и укладки уплотнения асфальтобетонных смесей без потери качества асфальтобетона; повысить устойчивость к пластическим деформациям, прочность и долговечность, а также улучшить устойчивость асфальтобетона к воздействию низких температур. В отличие от импортных аналогов, разработанная добавка не снижает трещиностойкость асфальтобетона.

Обоснован механизм влияния компонентов полифункциональной добавки на структуру и характеристики модифицированного битумного вяжущего. При введении добавки в битумное вяжущее, содержащиеся в ней воски понижают вязкость битумного вяжущего при высоких технологических температурах и повышают ее при температурах эксплуатации. Воски создают однородную связнодисперсную структуру, обеспечивающую расширение температурного интервала пластичности вяжущего, повышение когезионных свойств. Пластификатор на основе растительных масел обеспечивает сохранение пластичности вяжущего при низких температурах. ПАВ на основе амидов и

имидазолинов улучшают адгезионные свойства битумного вяжущего и замедляют интенсивность его старения благодаря хемосорбционному взаимодействию с поверхностью минерального заполнителя.

Выявлены взаимосвязи между составом полифункциональной добавки и физико-химическими свойствами модифицированного битумного вяжущего, а также между концентрацией добавки в составе асфальтобетонной смеси и физико-механическими и эксплуатационными показателями теплого асфальтобетона. Это позволило подобрать рациональные рецептурно-технологические параметры получения добавки, разработать составы асфальтобетона с улучшенными характеристиками.

Предложен состав и технология производства многокомпонентной органической добавки в качестве модификатора асфальтобетонной смеси.

Подобраны составы асфальтобетонных смесей типа Б (в соответствии с ГОСТ 9128-2013) и типа А16Вн (ГОСТ Р 58406.2-2020) с пониженными на 25°C температурами приготовления и уплотнения с улучшенными показателями: типа Б с пределом прочности (R0; R20 и R50): 8,2 МПа, 4,5 МПа и 1,6 МПа соответственно; водостойкостью при длительном водонасыщении – 0,86; трещиностойкостью 3,8 МПа; типа А16Вн с разрушающей нагрузкой и деформацией по Маршаллу – 15040 Н и 2,2 мм соответственно; водостойкостью – 0,94; глубиной колеи 2,3 мм после 20 тысяч проходов нагруженного колеса, увеличенным расчетным сроком службы покрытия в 2,2 раза.

Разработан состав литого асфальтобетона типа ЛА16Вн(ПТ) (ГОСТ 54401-2020) с пониженной на 30°C температурой приготовления и укладки и повышенной устойчивостью к пластическим деформациям, обладающий следующими физико-механическими показателями: содержанием воздушных пустот 0,54%, глубиной вдавливания штампа – 2,45 мм и увеличением глубины вдавливания штампа через 30 минут – 0,35 мм.

Для обеспечения нормативной базы внедрения результатов исследований разработаны документы: стандарт организации СТО «Полифункциональная добавка для битума и асфальтобетона Вискодор ПВ-2. Технические условия»;

Технологический регламент производства полифункциональной добавки для битума и асфальтобетона Вискодор ПВ-2.

Теоретические и экспериментальные результаты исследования могут быть **рекомендованы** для внедрения при производстве теплых и литых асфальтобетонных смесей для верхних и нижних слоев дорожного покрытия.

Перспективы дальнейших исследований включают в себя исследования по использованию многофункциональной комплексной добавки Вискодор ПВ-2 для получения различных марок битумных вяжущих по классификации ГОСТ 58400 и ГОСТ Р 52056 для расширения применения добавки в различных типах асфальтобетонных смесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение теплой асфальтобетонной смеси в дорожном строительстве / Б. А. Бондарев, А. Б. Бондарев, К. В. Веселова, П. В. Борков // Вестник Липецкого государственного технического университета. – 2022. – № 1(47). – С. 48-55. – DOI 10.53015/23049235_2022_1_48. – EDN CBDDII.
2. Добавка в асфальтобетонные смеси для продления сезона дорожного строительства / В. В. Ядыкина, А. М. Гридчин, В. С. Холопов, А. И. Траутвайн // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-11. – С. 2395-2399. – EDN TARFQH.
3. Общие сведения об асфальтобетонной смеси / Е. А. Васильченко, И. С. Рязанова, А. Р. Сысоев [и др.] // Вестник науки и образования. – 2022. – № 5-1(125). – С. 66-69. – EDN BQGTZH.
4. Ястремский, Д. А. Проблема повышения долговечности асфальтобетонного покрытия и пути её решения / Д. А. Ястремский, Т. Н. Абайдуллина, П. В. Чепур // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 3-2. – С. 307-310. – EDN VSYBFZ.
5. Калгин, Ю. И. Структурно-механические свойства модифицированного горячего и теплого дорожного асфальтобетона / Ю.И. Калгин, А. Алшахван, Н.И. Паневин // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2022. – № 3(67). – С. 124-129.
6. Силкин В.В. Приготовление теплых асфальтобетонных смесей / В. В. Силкин, А. П. Лупанов, Ю. Э. Васильев // Строительная техника и технологии. – 2013. – № 7. – С. 62-64.
7. Полонов, Н.М. Низкотемпературные асфальтобетонные смеси типов А, Б, В I (первой) дорожно-климатической зоне (опыт применения) / Н.М. Полонов, С. С. Шабуров // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2018. – Т. 8, № 1(24). – С. 175-186.

8. Теплый асфальтобетон на основе цеолита / О. Н. Ильина, И. Б. Ильин, Б. К. Хусаенов, В. В. Силкин // Транспортное строительство. – 2022. – № 2. – С. 21-23. – EDN HCCSJP.
9. Ядыкина, В. В. Теплый асфальтобетон с энергосберегающей добавкой ДАД-ТА / В. В. Ядыкина, А. И. Траутвайн, В. С. Холопов // Мир дорог. – 2021. – № 141. – С. 131-133. – EDN UHFXNU.
10. Шабуров, С. С. Технология производства теплой асфальтобетонной смеси на вязком битуме / С. С. Шабуров, В. Ю. Кибирев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 1(54). – С. 173-179. – EDN VLONRN.
11. Влияние асфальтового гранулята и дефлегматоров на подвижность литых асфальтобетонных смесей / И. О. Козиков, А. П. Лупанов, В. В. Силкин, А. С. Суханов // Транспортное строительство. – 2023. – № 2. – С. 27 - 29. – EDN CTZWUD.
12. Выбор полимерно-битумных вяжущих для литых асфальтобетонных смесей / С. В. Воронцов, Н. В. Майданова, А. М. Сыроежко, С. Н. Иванов // Журнал прикладной химии. – 2012. – Т. 85, № 2. – С. 323-330. – EDN TVIDBN.
13. Расширение производства и применения литых асфальтобетонов / А. П. Лупанов, Ю. Э. Васильев, В. В. Силкин [и др.] // Автомобильные дороги. – 2023. – № 11(1104). – С. 132-137. – EDN SDELWT.
14. Полимерная добавка для модификации битума / К. Р. Губа, Д. В. Гуляк, А. А. Стукалов [и др.] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2023. – № 1(159). – С. 60-66. – EDN WMBYHV.
15. Фомин, А. Ю. Литой серный бетон дорожного назначения / А. Ю. Фомин, А. А. Кайскайс // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. – 2023. – № 3(3). – С. 28-34. – EDN YUQSW.
16. Гурова, О. С. Исследование процесса загрязнения атмосферного воздуха выбросами загрязняющих веществ асфальтобетонных заводов / О. С. Гурова, Д. П. Гурт, Д. А. Чмерев // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ "Нацразвитие", Санкт-Петербург, 27–31 октября

2018 года– Санкт-Петербург: ГНИИ «Нацразвитие». – 2018. – Т.1. – С. 155-156. – EDN VPSRRX

17. Экологические аспекты производства литых асфальтобетонных и сероасфальтобетонных смесей / Б. Г. Зумбадзе, У. О. Менькина, А. А. Ермилова [и др.] // Транспортное строительство. – 2024. – № 1. – С. 6-10. – EDN PSLDXL.

18. Тазетдинов, А. А. Применение литого полимерного асфальтобетона для устройства дорожных одежд на мостах: преимущества, недостатки, особенности приготовления, транспортировки, укладки. Опыт применения / А. А. Тазетдинов // Техника и технология транспорта. – 2019. – № 11. – С. 41-43. – EDN UAGDVC.

19. Кузнецов, Д. А. Исследование реологических свойств битумных вяжущих для литых асфальтобетонов / Д. А. Кузнецов, М. А. Высоцкая, А. В. Курлыкина // Актуальные проблемы науки и техники. 2022: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 16–18 марта 2022 года: Донской государственный технический университет. – 2022. – С. 826-827. – EDN FYDBKS.

20. Фейзер, Е. В. Перспективы применения литых асфальтобетонов с добавками на основе синтетических восков / Е. В. Фейзер, О. А. Михайлова // Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XV Международного молодежного форума, Белгород, 23–24 октября 2023 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2023. – С. 117-122. – EDN MSHORT.

21. Бурлака, С. Д. Анализ проблем экологической безопасности технологических процессов на асфальтобетонных заводах / С. Д. Бурлака, И. А. Белая // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2020. – № 1. – С. 75-82. – EDN GXAJWR.

22. Экологическая безопасность производства литых асфальтополимерсеробетонных смесей / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, Э. Л. Радюкова [и др.] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2023. – № 1(159). – С. 12-20. – EDN CMLPCQ.

23. Закономерности технологического старения нефтяных дорожных битумов и асфальтобетонных смесей / М. К. Пактер, В. И. Братчун, А. А. Стукалов [и др.] // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2014. – Т. 10, № 4. – С. 225-235. – EDN TWLNNB.

24. Мардиросова, И. В. Добавки для асфальтобетонных смесей с пониженной температурой приготовления / И. В. Мардиросова, Н. А. Проценко, С. А. Чернов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2016. – № 8(692). – С. 36-43. – EDN XAGTZV.

25. Ушаков, В. В. Рекомендации по устройству асфальтобетонных покрытий при пониженной температуре воздуха / В. В. Ушаков, В. А. Ярмолинский, Т. А. Ларина // Транспортное строительство. – 2018. – № 6. – С. 14-16. – EDN YNHKNF.

26. Лессинч, В. П. Расширение строительного сезона при устройстве асфальтобетонного покрытия за счет использования теплого асфальтобетона на ОСНОВЕ твердых углеводородов / В. П. Лессинч, А. А. Бегей // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2023. – № 1(67). – С. 101-106. – EDN OZNHDQ.

27. Халиулина, Л. Э. Применение нефтяных битумов / Л. Э. Халиулина // Научный журнал. – 2018. – № 11(34). – С. 12-13. – EDN MVYLCQ.

28. Джабраилов, Х. А. Экспериментальное исследование характера остывания асфальтобетонных смесей, с целью компенсации потерь тепла при их транспортировке от асфальтобетонного завода к объекту устройства дорожного полотна / Х. А. Джабраилов, М. Э. А. Солтамурадов, С. С. Газиев // Транспортные сооружения. – 2018. – Т. 5, № 4. – С. 16. – DOI 10.15862/18SATS418. – EDN YURQZV.

29. Собянин, Н. М. Использование теплого асфальтобетона для строительства дорог в отдаленных районах / Н. М. Собянин, А. С. Сергеев // Химия. Экология. Урбанистика. – 2024. – Т. 3. – С. 195-198. – EDN HDCJGC.

30. Чудинов, С. А. Современные технологии получения теплых асфальтобетонных смесей / С. А. Чудинов, Д. В. Репников // Лесная наука в

реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики: материалы XII Международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 21 мая 2019 года / Министерство науки и высшего образования РФ, Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уральский государственный лесотехнический университет". – 2019. – С. 124-127. – EDN HRFNJW.

31. Алшахан, А. Преимущества применения технологии теплых асфальтобетонных смесей по сравнению с другими технологиями асфальтобетонных смесей / А. Алшахан, Ю. И. Калгин // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2019. – № 2. – С. 19-25. – EDN NGNICM.

32. Радовский, Б. С. Технология нового теплого асфальтобетона в США / Б. С. Радовский // Автомобильные дороги. – 2008. – № 11. – С. 10.

33. Алшахан, А. Улучшение структурно-механических свойств теплого асфальтобетона методом полимерно-дисперсного армирования / А. Алшахан, Ю. И. Калгин // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2021. – № 1(61). – С. 53-61. – EDN SRHMRR.

34. EAPA. The Use of Warm Mix Asphalt // European Asphalt Pavement Association. — Brussels, Belgium, 2010. —23 p.

35. Хвоинский, А. В. Инновации пробивают путь / А. В. Хвоинский // Транспортная стратегия - XXI век. – 2014. – № 25. – С. 38-39. – EDN VBIXTR.

36. Свиначев, М. А. Энергосберегающие технологии производства дорожных смесей на основе термопластичных вяжущих / М. А. Свиначев // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2010. – № 48. – С. 85-88. – EDN MVOVND.

37. Kenneth, A. Warm-Mix Asphalt and Pavement Sustainability: A Review /A. T. Kenneth, A. T. Yaw// Open Journal of Civil Engineering. – 2016. – № 6. – P. 84 - 93. – DOI:10.4236/ojce.2016.62008

38. Рудакова, В. В. Экологическое обеспечение производства асфальтобетонных смесей на АБЗ / В. В. Рудакова // Проектирование автомобильных дорог: Сборник докладов 78-й международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, подсекции «Изыскания и проектирование дорог», Москва, 27–31 января 2020 года. – М.: Общество с ограниченной ответственностью "А-проджект". – 2020. – С. 154-160–EDN RZXXZG.

39. Обеспечение экологической безопасности при производстве асфальтобетонных смесей на АБЗ / А. П. Лупанов, В. В. Силкин, Б. Дулмаа, О. Н. Ильина // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 4(42). – С. 424-431 – EDN ZTSUXT.

40. Alshahwan, A. Improving the structural and mechanical properties of warm asphalt concrete by the method of polymer-disperse reinforcement / A. Alshahwan, Yu.I. Kalgin // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2021. – No. 2(50). – P. 53-61. – DOI 10.36622/VSTU.2021.50.2.004. – EDN ORQTNN.

41. Хардукаш, А. Ю. Производство теплых асфальтобетонных смесей для расширения рабочего сезона в дорожном строительстве / А.Ю. Хардукаш // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России: Материалы XVII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции, Екатеринбург, 05–17 апреля 2021 года. – Екатеринбург: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уральский государственный лесотехнический университет". – 2021. – С. 140-143. – EDN HFJHEZ.

42. Исследование эксплуатационных свойств покрытий из литых асфальтобетонных смесей с добавлением асфальтового гранулята / И.О. Козиков, А.П. Лупанов, В.В. Силкин, А.С. Суханов // Транспортное строительство. – 2021. – № 4. – С. 5-8. – EDN XLABNJ.

43. Савичев, А. О. Совершенствование технологии производства теплых асфальтобетонных смесей с использованием вспененного битума, уменьшение вредного влияния на окружающую природную среду / А. О. Савичев // Потаповские

чтения: Сборник материалов Всероссийской научной конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Александра Дмитриевича Потапова, Москва, 18 мая 2021 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. – 2021. – С. 135-140. – DOI 10.22227/978-5-7264-2875-8.2021.135-140. – EDN GWYGUF.

44. Васильев, В. П. Тепленькая пошла / В. П. Васильев // Автомобильные дороги. – 2024. – № 8(1113). – С. 86-90. – EDN ISFQTB.

45. Повышение энергоэффективности производства асфальтобетонных смесей / А. П. Лупанов, В. В. Силкин, В. В. Рудакова [и др.] // Транспортное строительство. – 2021. – № 2. – С. 8-11. – EDN VINJRC.

46. Almeida-Costa, A. Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt / A. Almeida-Costa, A. Benta // J. Cleaner Prod. – 2016. – №. 112. – P. 2308-2317. – DOI:10.1016/j.jclepro.2015.10.077

47. Влияние асфальтового гранулята на выбросы загрязняющих веществ при производстве асфальтобетонных смесей / А. П. Лупанов, Н. В. Гладышев, А. С. Суханов [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2020. – № 12. – С. 12-16. – EDN QKQQQM.

48. Study on use of various type of warm mix asphalt (WMA) additive's in asphalt binder/ K.S. Mahavir, P.A. Vinayak, C.S. Kumar [et. al] // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). – 2023. – Vol.11. – P.2479-2489.

49. Печенкин, И. Э. Современные способы производства теплого асфальтобетона / И. Э. Печенкин, И. В. Овчинкин // Научные исследования и современное образование: сборник материалов V Международной научно-практической конференции, Чебоксары, 29 декабря 2018 года. – Чебоксары: Общество с ограниченной ответственностью "Центр научного сотрудничества "Интерактив плюс". – 2018. – С. 193-195 – EDN YUNQSL.

50. Веселова, К. В. Проектирование теплой асфальтобетонной смеси на вспененном битуме на основе методологии «Supergrove» / К. В. Веселова // Актуальные проблемы науки и техники: Сборник научных статей по материалам

VII Международной научно-практической конференции, Уфа, 14 января 2022 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр «Вестник науки». – 2022. – С. 24-32. – EDN XQLKFU.

51. Влияние температуропонижающей добавки на старение битума и асфальтобетона / В. В. Ядыкина, А. М. Гридчин, В. С. Холопов, А. И. Траутвайн // Региональная научно-техническая конференция по итогам ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области: сборник докладов, Белгород, 25–26 февраля 2016 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. – С. 334-342. – EDN XDYTEB.

52. Чебанов, М. В. Энерго- и экологически эффективные асфальтобетоны / М. В. Чебанов, А. А. Яковлева // Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства : Сборник докладов международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Валерия Станиславовича Лесовика : В 3 частях, Белгород, 15–16 марта 2016 года / Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2016. – С. 304 - 308. – EDN WJFCZB.

53. Ельшибаев, А. О. Определение низкотемпературного трещинообразования теплых и ресайклированных асфальтобетонов / А. О. Ельшибаев, Г. Г. Измаилова, Н. Н. Сарыбаев // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2018. – № 2(105). – С. 175 - 181. – EDN USNRWE.

54. Зюрин, Б. К. Теплые асфальтобетонные смеси: особенности технологии и потенциальные направления развития / Б. К. Зюрин // Молодежь и научно-технический прогресс: Сборник докладов XIV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 2 т., Губкин, 08–09 апреля 2021 года. – Губкин: Белгородский государственный

технологический университет им. В.Г. Шухова. – 2021. – С. 330-332. – EDN AMLVWY.

55. Татаринский, В. Б. Комбинированная технология производства теплых асфальтобетонных смесей / В. Б. Татаринский, Р. И. Рыбалко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2017. – № 79. – С. 107-111. – EDN ZSWKGN.

56. Патент № 2671271 С1 Российская Федерация, МПК С04В 26/26, Е01С 19/10. Способ получения теплой асфальтобетонной смеси и устройство для его осуществления : № 2018120705 : заявл. 05.06.2018 : опубл. 30.10.2018 / Ю. В. Кибирев, С. С. Шабуров, Н. М. Полонов, А. В. Тараненко ; заявитель Акционерное общество «Труд».

57. Теплые асфальтобетоны на основе механического вспенивания битума: очевидное решение актуального запроса // Автомобильные дороги. – 2023. – № 8(1101). – С. 44-45. – EDN BZRBVJ.

58. Котлярский, Э. В. Строительно-технические свойства дорожного асфальтового бетона: учеб. пособие / Э. В. Котлярский // - М.: МАДИ (ГТУ). – 2004. – 192 с.

59. Шеховцова, С. Ю. Особенности технологии теплого асфальтобетона / С. Ю. Шеховцова, М. А. Высоцкая, В. С. Холопов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 2. – С. 43-48. – DOI 10.12737/24131. – EDN ХТВМЛН.

60. Ермак, А. А. Влияние продукта взаимодействия рапсового масла с диэтилентриамином на свойства дорожного битума / А. А. Ермак, Е. В. Михайловский, И. А. Мандрика // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2012. – № 11. – С. 117-121. – EDN ТТВДКВ.

61. Влияние энергосберегающих добавок на свойства щебеночно-мастичного асфальтобетона на примере Evotherm, Азол 1007 и Адгезол 3-ТД / В. В. Ядыкина, А. М. Гридчин, А. И. Траутвайн, Ю. П. Чистяков // Вестник

Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 6. – С. 149-153. – EDN ULFTUT.

62. Ядыкина, В. В. Эффективность использования добавок ДАД-ТА для приготовления теплого асфальтобетона / В. В. Ядыкина, А. И. Траутвайн, В. С. Холопов // Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области, Белгород, 20–21 апреля 2017 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – 2017. – С. 316 – 322. – EDN YZANTN.

63. Влияние добавки ДАД ТА-2 на свойства битума и асфальтобетона / В. В. Ядыкина, А. М. Гридчин, В. С. Холопов, А. И. Траутвайн // Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области, Белгород, 09–10 апреля 2015 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – 2015. – С. 485-490. – EDN TZYXXF.

64. Теплый асфальтобетон - перспективный материал для дорожного строительства / В. В. Ядыкина, А. М. Гридчин, В. С. Холопов, В. Э. Василевский // Эффективные строительные композиты: Научно-практическая конференция к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора технических наук Баженова Юрия Михайловича, Белгород, 02–03 апреля 2015 года / Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – 2015. – С. 775-779. – EDN UDAUVF.

65. Соломенцев, А. Б. Уплотняемость щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей с различными добавками при пониженных температурах

/ А. Б. Соломенцев, А. В. Куликова // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 6. – С.102-107. – EDN PVFY5B.

66. Соломенцев, А. Б. Уплотняемость асфальтовяжущего с добавками для теплого асфальтобетона и добавкой УНИРЕМ-001 / А. Б. Соломенцев, А. В. Куликова // Строительство и реконструкция. – 2013. – № 6. – С.102-107. – EDN SAJLQF.

67. Вербкин, В. И. Энергосберегающая щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь для строительства и ремонта асфальтобетонных покрытий / В. И. Вербкин, Ю. П. Чистяков // Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства: международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Валерия Станиславовича Лесовика, Белгород, 15–16 марта 2016 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – 2016. – С. 143-148. – EDN WHQSNN.

68. Шеховцова, С. Ю. Исследование принципа работы пверхностно-активных добавок для теплого асфальтобетона / С. Ю. Шеховцова, Е. В. Королев, О. А. Михайлова / Дороги: Инновации в строительстве. – 2021. - № 94. – С 64.- 71.

69. Соломенцев, А. Б. Оценка уплотняемости горячих асфальтобетонных смесей с низкотемпературными добавками / А. Б. Соломенцев // Строительство и реконструкция. – 2018. – № 4(78). – С. 97- 107. – EDN YVKIUX.

70. Колесник, Д. А. Выбор модификатора асфальтобетона для расширения строительного сезона / Д. А. Колесник // Мир дорог. – 2013. – № 71. – С 47-49.

71. Патент № 2524081 С1 Российская Федерация, МПК С04В 26/26, С08L 95/00, С04В 111/20. Ресурсосберегающая щебеночно-мастичная смесь для строительства и ремонта дорожных покрытий: № 2013132069/03: заявл. 10.07.2013: опубл. 27.07.2014 / И. В. Мардиросова, С. А. Чернов, А. В. Каклюгин [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ростовский государственный строительный университет", РГСУ.

72. Изменение свойств битума и асфальтобетона под влиянием добавок для теплого асфальтобетона / В. В. Ядыкина, А. М. Гридчин, В. С. Холопов, А. И. Траутвайн // Научные технологии и инновации, Белгород, 09–10 октября 2014 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2014. – С. 124-128. – EDN TJKBMD.

73. Ядыкина, В. В. Изменение свойств битума, модифицированного температуропонижающими добавками / В. В. Ядыкина, В. С. Холопов, О. А. Михайлова // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2022. – № 3(155). – С. 100-104. – EDN CFWPLM.

74. Ильина, О. Н. Анализ опыта применения теплых асфальтобетонных смесей / О. Н. Ильина, В. Е. Броднева // Техника и технология транспорта. – 2019. – № 5(11). – С. 29. – EDN GKFUOX.

75. Чебанов, М. В. Перспективы использования теплого асфальтобетона / М. В. Чебанов, В. С. Холопов // Образование, наука, производство. Белгород, 20–22 октября 2015 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 869-873. – EDN VNPDJX.

76. Ельшибаев, А. О. Оценка устойчивости колееобразования теплых и традиционных асфальтобетонов / А. О. Ельшибаев, Г. Г. Измаилова // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2018. – № 2(105). – С. 205-210. – EDN XRLYEN.

77. Михайлова, О. А. Перспективы применения органических добавок для производства теплых асфальтобетонных смесей / О. А. Михайлова // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук : Сборник докладов Национальной конференции с международным участием, Белгород, 18–20 мая 2022 года. Том Часть 9. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 222-226. – EDN CRPEDF.

78. Михайлова, О. А. Перспективы применения синтетических восков как структурирующих и температуропонижающих добавок для асфальтобетонов / О. А. Михайлова, Е. В. Фейзер. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2024. — № 18 (517). — С. 96 – 100. – EDN MFLPLH.

79. Effects of wax molecular weight distribution and branching on moisture sensitivity of asphalt binders / W. Wang, A. Nili, A. Rahman, Xu. Chen // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, – No. 12. – P. 4206. – DOI:10.3390/ma15124206

80. Rheological properties of model wax doped asphalt binders / H. Liu, Q. Xie, H. Ding [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 350. – P. 128. – 135. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.128865

81. Thermal stress calculation of wax-based warm mix asphalt considering thermorheologically complex behavior / H. Zhang, H. Zhang, H. Ding [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 368. – P. 130488. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.130488

82. Evaluation of mechanical properties of warm-mix asphalt mixtures prepared with Sasobit and zeolite additives/ M. H. Wshyar, A. Y. Rana, S. Hesami [et al.] // *Journal of Engineering and Technological Sciences*. – 2024. – Vol.56. – No. 6. – P. 716-726. – DOI:10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.6.4

83. Viscosity-temperature characteristics of warm mix asphalt binder with Sasobit/ Z. Jiupeng, Y. Fenghua, P. Jianzhong, X. Shicui, A. Fengwei / *Construction and Building Materials*. – 2015. – Vol.78. – P. 34-39. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.123

84. The use of wax-based additives in bitumen modification: A systematic quantitative literature review / N. Şahan, A. Kumandaş, E. Kabadayı [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2023. – Vol. 407. – P. 133 - 142 – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133423

85. Основные способы модификации битумов различными добавками /Х. Х. Ахмадова, Ж. Т. Хадисова, Л. Ш. Махмудова [и др.] // *Вестник ГГНТУ. Технические науки*. – 2019. – Т. 15, № 3(17). – С. 42 - 56. – EDN LHHMRT.

86. Алшахван, А. Обзор технологий приготовления тёплых асфальтобетонных смесей / А. Алшахван, Ю. И. Калгин // Молодой ученый. – 2019. – № 32(270). – С. 102-107. – EDN GMJKRE.
87. Пугин, К. Г. Повышение эксплуатационных показателей асфальтобетона, используемого для транспортного строительства / К. Г. Пугин, О. В. Яконцева // Химия. Экология. Урбанистика. – 2021. – Т. 3. – С. 141-145. – EDN AMDJPZ.
88. Jamshidi, A. Performance of warm mix asphalt containing Sasobit: State-of-the-art / A. Jamshidi, M.O. Hamzah, Z. You // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 38. – P. 530-553. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.08.015
89. Brosseaud, Y. Will bituminous mixes be made differently tomorrow: state of the art for warm mix asphalt in France / Y. Brosseaud, M. Saint-Jacques // European roads. – 2007. – № 10. – P. 42-53.
90. Каменчуков, А. В. Эффективность применения добавок для модификации асфальтобетона / А. В. Каменчуков, А. Б. Павликов, М. Д. Селенок // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2024. – № 1. – С. 1-12. – EDN LCVVVB.
91. Zhao, G. Workability of Sasobit warm mixture asphalt // 2012 International Conference on Future Energy, Environment and Materials. – 2012. – № 16. – P. 1230-1236. – DOI:10.1016/j.egypro.2012.01.196
92. Experimental study on bituminous concrete pavement using low density polyethylene and Sasobit / G. D. Singh, V. K. Sharma, B. Sangma [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 52. – P. 2109-2114. – DOI:10.1016/j.matpr.2021.12.387.
93. Stienss, M., Szydowski, C. Influence of selected warm mix asphalt additives on cracking susceptibility of asphalt mixtures // Materials. – 2020. – Vol 13. – P 202-217. – DOI:10.3390/ma13010202.
94. Improving effects of warm-mix additive Sasobit on performance of short-term aged sbr modified asphalt / D. Wu, X. Zhao, Yu. Peng [et al.] // International journal

of pavement research and technology. – 2023. – Vol. 16, No. 4. – P. 983-991. – DOI:10.1007/s42947-022-00174-x.

95. Kolapkar, S. Effect of Sasobit as a WMA additive on mix design parameters / S. Kolapkar, S. Sathe // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323012968>. (accessed: 24.11. 2024)

96. Влияние природных угольных и синтезированных методом Фишера-Тропша добавок на свойства нефтяных битумов и качество литых асфальтобетонов / А. М. Сыроежко, М. А. Баранов, С. Н. Иванов, Н. В. Майданова // *Кокс и химия*. – 2011. – № 1. – С. 30-37. – EDN LUDPBG.

97. Моор, Е. В. Реологические свойства битумного вяжущего для пористо-мастичных асфальтобетонных смесей с добавлением воска Фишера Тропша / Е. В. Моор, М. В. Бормотов, С. И. Булдаков // *Научное творчество молодежи - лесному комплексу России: материалы XVIII Всероссийской (национальной) научно-технической конференции, Екатеринбург, 04–15 апреля 2022 года*. – Екатеринбург: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский государственный лесотехнический университет". – 2022. – С. 437-442. – EDN OJHUPP.

98. Опарина, Д. В. Оценка адгезионных свойств битума, модифицированного добавкой «Honeywell Titan 7686» / Д. В. Опарина, Е. С. Широкова // *Общество. Наука. Инновации. (НПК-2023): Сборник материалов XXIII Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, приуроченной к 60-летию ВятГУ. В 2-х томах, Киров: Вятский государственный университет*. – 2023. – Т. 2. – С. 199-202. – EDN LLATSB.

99. Балабанов, В. Б. Опыт применения полимера Honeywell Titan 7686 для получения вяжущего с высокими физико-механическими показателями / В. Б. Балабанов, А. Р. Джураев // *Молодежный вестник ИрГТУ*. – 2022. – Т. 12. – № 2. – С. 300-305. – EDN ZWDAGY.

100. Жданов, К. А. Теплые технологии при производстве асфальтобетонных смесей для устройства дорожных покрытий / К. А. Жданов, Ю. И. Калгин //

Научный журнал строительства и архитектуры. – 2023. – № 2(70). – С. 84-93. – EDN NRXDBJ.

101. Сарбасов, М.Б. Влияние полимерной добавки сасобит на свойства битума и асфальтобетона / М.Б. Сарбасов, О.А. Мирюк // Научный аспект. – 2024. – Т. 6, № 5. – С. 706-713. – EDN GMOOBW.

102. Соломенцев, А. Б. Сравнительная оценка некоторых свойств дорожного битума с различными полимерными добавками и асфальтовязующего на его основе / А. Б. Соломенцев, А. В. Куликова, С. В. Бухтияров // Строительство и реконструкция. – 2014. – № 2. – С. 69-78. – EDN TJKBTU.

103. Соломенцев, А. Б. Функциональные значения полимерных добавок / А. Б. Соломенцев, А. В. Куликова // Автомобильные дороги. – 2015. – №11 – С. 64-69.

104. Пыриг, Я. И. Сравнительная оценка влияния энергосберегающих добавок на свойства битума / Я. И. Пыриг, А. В. Галкин // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2020. – № 90. – С. 114 - 124. – EDN SLZZXX.

105. Смирнов, Д. С. Анализ опыта применения теплых асфальтобетонных смесей / Д. С. Смирнов, В. Е. Броднева, А. С. Лобанова // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – № 4(50). – С. 455-461. – EDN GKFUOX.

106. Вдовин, Е. А. Модифицирующая добавка на основе синтетического окисленного воска для щебеночно-мастичных асфальтобетонов / Е. А. Вдовин, А. Ю. Фомин, Н. В. Коновалов // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. – 2023. – № 3(3). – С. 4-11. – EDN GZDJYL.

107. Михайлова О.А. Сравнительные испытания свойств битума, модифицированного российским модификатором «Вискодор ПВ-2» и импортными восковыми модификаторами/ О.А. Михайлова// Дорожная держава. – 2022. – №111. – С.73-75.

108. Михайлова, О. А. Эффективность использования комплексной добавки на основе синтетических восков для приготовления битумного вяжущего с

улучшенными физико-химическими показателями / О. А. Михайлова, Р. С. Колесников // Мир дорог. — 2023. — №152. — С.82-85

109. Михайлова, О. А. Применение модификатора реологии на основе растительного сырья для повышения качества битумного вяжущего / О. А. Михайлова, Е. В. Фейзер. // Вестник КаздорНИИ. — 2024. — № 1. — С. 42-47.

110. Влияние добавок на основе синтетических восков на адгезионные свойства битумного вяжущего / В. В. Ядыкина, О. А. Михайлова, М. С. Лебедев, Е. В. Фомина // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. — 2024. — Т. 21, № 6(100). — С. 984-1001. — DOI 10.26518/2071-7296-2024-21-6-984-1001. — EDN QVKREJ.

111. Ядыкина, В. В. Интенсивность термоокислительного старения битума, модифицированного добавками на основе синтетических восков / В. В. Ядыкина, О. А. Михайлова, М. С. Лебедев // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2024. — № 8(788). — С. 44-56. — DOI 10.32683/0536-1052-2024-788-8-44-56.

112. Ядыкина, В. В. Влияние температуропонижающих добавок на основе синтетических восков на свойства битума / В. В. Ядыкина, О. А. Михайлова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2023. — № 3. — С. 8-18. — DOI 10.34031/2071-7318-2022-8-3-8-18.

113. Михайлова, О. А. Исследование влияния добавок на основе синтетических восков на физико-механические свойства асфальтобетонной смеси / О. А. Михайлова, Р. С. Колесников // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В. Г. Шухова : Сборник докладов, Белгород, 16–17 мая 2023 года. Том Часть 9. — Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2023. — С. 234-239. — EDN LJYBLE

114. Куликова, А. В. Реологические свойства дорожного битума с добавками для теплого асфальтобетона / А. В. Куликова, А. Б. Соломенцев // Строительство и реконструкция. — 2013. — № 2(46). — С. 104-111. — EDN RCHKZX.

115. Жданюк В. К. Исследование влияния технологических режимов перемешивания на свойства битумов с добавкой «Licomont BS 100» / В. К. Жданюк, Р. Б. Шрестха, Д. Ю. Костин, В. А. Яшин // ХНАДУ Научно-технический сборник. – 2009. – №90. – С. 238–242.

116. Лукина, В. И. Трансформация нефтяных дисперсных систем при вовлечении синтетических восков / В. И. Лукина, С. Г. Дьячкова, Р. Г. Житов // Теоретические основы химической технологии. – 2023. – Т. 57, № 6. – С. 731 - 735. – EDN IGVPYX.

117. Шорин, В. А. Исследование реологических свойств нефтяного дорожного битума Московского НПЗ с модифицированной бифункциональной добавкой Honeywell / В. А. Шорин, А. Ю. Вельсовский // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2021. – № 4(14). – С. 45-49. – EDN DGJDUB.

118. Hadithon, K.A. The properties of cuplump-modified bitumen with wax / K.A. Hadithon, M.M. Kamal, M.Kh. Mansor, N. Ahmad // Journal of Rubber Research.– 2022.–Vol.25, No.4.– P. 367-373. – DOI:10.1007/s42464-022-00174-3

119. Effect of Sasobit/waste cooking oil composite on the physical, rheological, and aging properties of styrene–butadiene rubber (SBR)-modified bitumen binders / X. Zhao, Zh. Lu, H. Su [et al.] // Materials. – 2023. – Vol. 16. – No. 23. – P. 736-742. – DOI:10.3390/ma16237368.

120. Laukkanen, O.V. Rheological characterization of wax modified bituminous binders: Effect of specimen preparation and thermal history / O.V. Laukkanen, H. Soenen // Construction and Building Materials, – 2015. – Vol. 95. – P. 269-278.

121. Gokalp, İ. Investigation the Physical and Rheological Properties of Bitumen Modified with Warm Mix Asphalt Additive / İ. Gokalp // European Journal of Technique (EJT), – 2021. – No 11(2), – P. 182-189. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.065.

122. Королев, И.В. Дорожный теплый асфальтобетон / И.В. Королев. – Киев: Вища школа, 1975. – 156 с.

123. Королев, И.В. Пути экономии битума в дорожном строительстве / И.В. Королев. – М.: Транспорт, 1986. –149 с.

124. Пермяков, В. Б. Некоторые аспекты уплотнения асфальтобетонных смесей / В. Б. Пермяков // Дорожно-транспортный комплекс, экономика, экология, строительство и архитектура : Материалы Международной научно-практической конференции, Омск, 21–23 мая 2003 года / Министерство образования Российской Федерации; Министерство транспорта Российской Федерации; Российская академия архитектуры и строительных наук; Администрация Омской области; Администрация г. Омска; Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ); Der Fakultat Verkehrswissenschaften der Technischen Universitat Dresden (Bundesrepublik Deutschland). Том Книга 2. – Омск: Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ), 2003. – С. 155-157. – EDN UJARBH.

125. Пермяков, В. Б. К вопросу повышения эффективности уплотнения горячих асфальтобетонных смесей / В. Б. Пермяков // Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования - основа модернизации и инновационного развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплексов России: материалы международной 66-й научно-практической конференции, Омск, 18–19 октября 2012 года. Том Книга 1. – Омск: Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ), 2012. – С. 477-482. – EDN XFENTZ.

126. Белицкий, В. Д. Тезаурус математических моделей процесса уплотнения асфальтобетонной смеси / В. Д. Белицкий, А. В. Катунин // Омский научный вестник. – 2013. – № 3(123). – С. 18-21. – EDN RSSITT.

127. Абубакиров, Д. А. Асфальтобетон на основе модифицированной добавки Evotherm J1 / Д. А. Абубакиров, Э. Р. Хафизов // Техника и технология транспорта. – 2019. – № 5 (11). – С. 44. – EDN TQSDDED.

128. Influence of DAD-TA temperature-reducing additive on physical and mechanical properties of bitumen and compaction of asphalt concrete / V.V. Yadykina, A. E. Akimov, A. I. Trautvain, V. S. Kholopov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – №. 327. – P. 1-5. – DOI 10.1088/1757-899X/327/3/032006. – EDN UXNGVP.

129. Холопов, В. С. Тёплый асфальтобетон - "зеленый" продукт для дорожного строительства / В. С. Холопов, Н. Г. Горшкова // Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства: Сборник докладов международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Валерия Станиславовича Лесовика : В 3 частях, Белгород, 15–16 марта 2016 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. - 2016. – С. 268-275. – EDN WJFCUV.

130. Подольский, В. П. Причины колееобразования на асфальтобетонных покрытиях и методы повышения их деформативной устойчивости в условиях Южного Вьетнама / В. П. Подольский, В. Л. Нгуен, Д. И. Черноусов // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 1(29). – С. 57-65. – EDN PVOSUV.

131. Поздняков, М. К. Исследование сопротивляемости асфальтобетона колееобразованию / М. К. Поздняков // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2009. – № 3. – С. 16-20. – EDN KWCYNX.

132. Ольховий, Б. Ю. Стойкость теплых асфальтобетонов к накоплению пластичных деформаций / Б. Ю. Ольховий, С. А. Баран // Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений, Белгород, 08–10 октября 2013 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – 2013. – С. 283-288. – EDN SIQFON.

133. Данильян, Е. А. Физико-механические свойства литых асфальтобетонов на битумно-полимерном вяжущем / Е. А. Данильян // Строительные материалы. – 2009. – № 5. – С. 33-35. – EDN KMKRKZ.

134. Комплексно-модифицированные дорожные горячие и литые асфальтополимерсеробетоны повышенной долговечности / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, Е. А. Ромасюк [и др.] // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2021. – Т. 17, № 3. – С. 157-174. – EDN SVDWNV.

135. Калгин, Ю. И. Разработка и исследование литого асфальтобетона на битумно-каучуковом вяжущем / Ю. И. Калгин, В. Т. Ерофеев // Строительные материалы. – 2007. – № 1. – С. 60-63. – EDN HZFWTV.

136. Прогнозирование сдвигоустойчивости покрытий из литого асфальтобетона / И. О. Козиков, А. П. Лупанов, В. В. Силкин [и др.] // Транспортное строительство. – 2023. – № 3. – С. 10-13. – EDN HXIQDN.

137. Патент № 2733749 С2 Российская Федерация, МПК С08L 95/00, С08L 91/08. Битумная композиция, содержащая смесь восков, состоящую из нефтяного сырого парафина и воска Фишера-Тропша, применение смеси восков в битумных композициях, применение битумной композиции в асфальтовых композициях, асфальтовые композиции, содержащие битумную композицию, и способ изготовления асфальтовых покрытий из них : № 2018144706 : заявл. 26.05.2017: опубл. 06.10.2020 / Т. Буц, К. Элькерс, С. Стридом, У. Хониболл; заявитель САСОЛ ВАКС ГМБХ.

138. Макатова, Ж. М. Результаты обследования и испытания участков автодорог, построенных с применением новых материалов и технологий, с целью уточнения расчетных показателей и сроков службы в натуральных условиях / Ж. М. Макатова // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2019. – № 3(110). – С. 10-20. – EDN MRAFFG.

139. Полякова, С. В. Исследование возможности применения пластиковых отходов в дорожном хозяйстве с учетом зарубежного опыта / С. В. Полякова, Ю. Э. Васильев // Дороги и мосты. – 2024. – № 1(51). – С. 241-267. – EDN FHUQQP.

140. Алшахван, А. Моделирование эксплуатации теплого асфальтобетона в условиях теплого и влажного климата районов Сирийской Арабской Республики / А. Алшахван, Ю. И. Калгин // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2023. – № 3(71). – С. 68-73. – DOI 10.36622/VSTU.2023.3.71.007. – EDN VJMAZE.

141. Алшахван, А. Влияние климатического старения на механические свойства теплого асфальтобетона в условиях Сирийской Арабской Республики / А. Алшахван // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2022. – № 2. – С. 157-160. – EDN VCFCRO.

142. Алшахван, А. Обоснование способа модификации тёплого асфальтобетона для условий Сирийской Арабской Республики / А. Алшахван, Ю. И. Калгин // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2021. – № 1. – С. 21-25. – EDN MDYZIL.

143. Self-healing properties of asphalt concrete with calcium alginate capsules containing different healing agents / H. Wang, M. Yuan, J. Wu [et al.] // Materials. – 2022. – Vol. 15. - No. 16. – P. 5555. – DOI:10.3390/ma15165555.

144. Luo, Ya. Review on performance of asphalt and asphalt mixture with waste cooking oil / Ya. Luo, Ke. Zhang // Materials. – 2023. – Vol. 16, No. 4. – P. 1341. – DOI:10.3390/ma16041341.

145. Suo, Zh. Laboratory Performance Evaluation on the Recovering of Aged Bitumen With Vegetable Oil Rejuvenator / Zh. Suo, H. Chen, Q. Yan // Frontiers in Materials. – 2021. – Vol. 8. – DOI 10.3389/fmats.2021.650809.

146. Соломенцев, А. Б. Оценка технологических температур асфальтобетонных смесей для улично-дорожной сети с использованием различных пластификаторов полимерно-битумных вяжущих / А. Б. Соломенцев, М. Режист, Ш. М. Жозеф // Наукосфера. – 2023. – № 2-1. – С. 196-205. – DOI 10.5281/zenodo.7619999. – EDN LEAINK.

147. Исследование свойств пластификаторов и их влияние на битум, модифицированный полимером СБС / О. В. Самсонова, Е. В. Сухарева, Е. Н. Алексеева [и др.] // Автомобильные дороги. – 2023. – № 3(1096). – С. 72-76. – EDN CSHKWE.

148. Peng, Ch. Investigation of adhesion performance of wax based warm mix asphalt with molecular dynamics simulation // Ch. Peng, H. Yang, Zh. You / Materials. – 2022. – Vol. 15. – No. 17. – P. 5930. DOI:10.3390/ma15175930.

149. Структурно-реологические показатели и биостойкость нефтяных битумов, модифицированных добавкой «Олазол» / В. Т. Ерофеев, А. И. Сальникова, Ю. И. Калгин, В. А. Лазарев // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2017. – № 3. – С. 7-21. – EDN CSHKWE.

150. Михайлова, О. А. Влияние добавок Licomont BS-100 и Вискодор ПВ-2 на скорость технологического старения асфальтобетонной смеси / О. А. Михайлова, В. В. Ядыкина // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры – 2025. – № 3(173). – С. 76-86. – DOI 10.71536/vd.2025.3c173.8. – EDN FNOLTJ.

151. Менькина, У. О. Применение ИК-спектроскопии для испытания битумных вяжущих / У. О. Менькина, Ю. Э. Васильев // Транспортное строительство. – 2024. – № 4. – С. 32-36. – EDN JKWIJS.

152. Yue, M. Evaluating the fatigue characteristics and healing potential of asphalt binder modified with Sasobit and polymers using linear amplitude sweep test / M. Yue, J. Yue, R. Wang, Y. Xiong // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 289. – P. 123054. – DOI 10.1016/j.conbuildmat. 123054.

153. Шарафиева, Р.Р. Применение методов ИК-спектроскопии и хемометрики в анализе имидазолинов / Р.Р. Шарафиева, Н.Н. Умарова, В.Ф. Сопин // Вестник Технологического университета. – 2023. – Т. 26, – № 6. – С. 62–65. – DOI 10.55421/1998-7072 2023 26 6 62.

154. Исследование составов дорожных поверхностно-активных веществ /Л. И. Аюпов, Р. И. Потапова, Д. А. Казакулов, Ю. Н. Хакимуллин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. № 3(45). – С. 178–188. – EDN VJMNNC.

155. Alteration of intermolecular interactions between units of asphaltene dimers exposed to an amide-enriched modifier /M. Mousavi, F. Pahlavan, D. Oldham [et al.] //RSC Advances. – 2016. – Vol. 6. – P 53477-53492. – DOI 10.1039/C6RA07506A.

156. Урчева, Ю. А. Модифицирование литых асфальтобетонных смесей твердыми парафинами, полученными по технологии Фишера - Тропша

газификацией углей, и различными полимерами / Ю. А. Урчева, А. М. Сыроежко, В. М. Страхов // Кокс и химия. – 2015. – № 3. – С. 40-44. – EDN TLCZDJ.

157. Оверин, Д. И. Разработка комплекса межгосударственных стандартов ГОСТ, регламентирующих требования и методы испытания битумов нефтяных дорожных вязких / Д. И. Оверин // Мир дорог. – 2015. – №9. – С. 53- 55

158. Евдокимова, Н. Г. К вопросу о модифицировании нефтяных битумов и определении их адгезионных свойств / Н. Г. Евдокимова, А. В. Ким, Н. А. Егорова // Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 14, № 4. – С. 91-96.

159. Евдокимова, Н. Г. Регулирование свойств полимерно-битумных вяжущих подбором состава пластификатора / Н. Г. Евдокимова, А. Р. Махмутова, А. А. Горбачева // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – № 5(115). – С. 115-123. – DOI 10.17122/ntj-oil-2018-5-115-123.

160. Алюк, С. С. Исследование влияния адгезионной добавки "Адгезол-6" на показатель сцепления битума с поверхностью щебня / С. С. Алюк, Я. Д. Хранцев, Д. И. Бородай // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2017. – № 2(124). – С. 107-110. – EDN ZBAZFD.

161. Особенности использования адгезионных добавок «АМДОР» для модификации битумных вяжущих / М. Е. Бокова, Д. В. Данилов, П. А. Дужий, Д. Ю. Небрятенко // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. – 2023. – № 2(18). – С. 73-84. – DOI 10.46573/2658-7459-2023-2-73-84.

162. Ананьева, Е. А. Оценка эффективности влияния адгезионных добавок различных производителей на адгезионные свойства битумных вяжущих / Е. А. Ананьева, Л. Х. Гареева, О. Н. Войтенко // Проектирование автомобильных дорог: Сборник докладов 78-й международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, подсекции «Изыскания и проектирование дорог», Москва, 27–31 января 2020 года / Под научной редакцией П.И. Поспелова. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "А-проджект", 2020. – С. 39-47. – EDN ZUDZQG.

163. ИК-спектроскопическое определение упорядоченности в каркасных алюмосиликатах / И. В. Александров, Е. С. Астапова, Е. В. Богомазова, Е. Б. Кожин // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2010. – № 49. – С. 39-42. – EDN PZMJRL.
164. Объемно-функциональное проектирование дорожных асфальтобетонных смесей / В. И. Братчун, Д. И. Бородай, Э. Л. Радюкова [и др.] // Строитель Донбасса. – 2024. – № 2(27). – С. 39-43. – EDN EYQLBA.
165. Устойчивость модифицированных вяжущих на основе окисленных и остаточных битумов к термодеструкции / Высоцкая, М. А., С. Ю. Шеховцова, А. Г. Обухов, Ю. Ю. Есипова Ю. Ю. // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2017. – № 6(58). – С. 140-147. – EDN YNHANAN.
166. Изучение коллоидно-дисперсной структуры дорожного битума при термоокислительном старении / М. К. Пактер, В. И. Братчун, О. Н. Нарижная [и др.] // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2018. – Т. 14, № 3. – С. 133-141. – EDN YLVFKH.
167. Effects of adhesion promoters on the contact angle of bitumen–aggregate interface / С. О. Rossi, P. Caputo, N. Baldino [et al.] // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2016. – Vol. 70. – P. 297 – 303. – DOI:10.1016/j.ijadhadh.2016.07.013
168. Prosperi, E. Review on bitumen aging and rejuvenation chemistry: Processes, materials and analyses / E. Prosperi, E. Bocci // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, No. 12. – P 6523 – DOI 10.3390/su13126523
169. Братчун, В. И. Старение асфальтобетонных смесей, асфальтобетонов и способы повышения их термоокислительной стойкости / В. И. Братчун, М. К. Пактер, А. А. Стукалов // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2015. – Т. 11, № 3. – С. 105-117. – EDN VOIEEN.
170. Fischer, H. R. On the interfacial interaction between bituminous binders and mineral surfaces as present in asphalt mixtures / H. R. Fischer, E. C. Dillingh, C. G. M. Hermse // Applied Surface Science. – 2013. – No 265. – P. 495–499. – DOI:10.1016/j.apsusc.2012.11.034.

171. Лепеха, С. В. Изучение природного битума методом инфракрасной Фурье спектроскопии / С. В. Лепеха, С. В. Берзин // XXX Зимняя Школа по химии твердого тела: материалы, Екатеринбург, 09–10 февраля 2021 года / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Уральский федеральный университет, Институт естественных наук и математики; Уральское отделение Российской академии наук. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2021. – С. 58-61. – EDN KNRKGV.

172. Исследование особенностей взаимодействия битумов с полимерами / Д. А. Аюпов, Л. И. Потапова, А. В. Мурафа [и др.] // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – № 1(15). – С. 140-146. – EDN NWDGGJ.

173. Tong, B. Effect of Sasobit warm mix on micro properties of asphalt with different degrees of regeneration / B. Tong, X. Song, Ju. Shen [et al.] // *Frontiers in Materials*. – 2022. – Vol. 9. – URL: <https://www.frontiersin.org/journals/materials/articles/10.3389/fmats.2022.950550>. (accessed: 16.08.2023)

174. Патент № 2130954 С1 Российская Федерация, МПК C08L 95/00, C08K 5/3415. Адгезионная добавка для битумов полифункционального действия: № 97100884/04: заявл. 28.01.1997: опубл. 27.05.1999 / В. В. Круть, А. Б. Соломенцев, В. П. Колодезный [и др.]; заявитель Открытое акционерное общество "Орелдорстрой".

175. Траутвайн, А. И. Выбор адгезионных добавок для повышения термостабильности битума / А. И. Траутвайн, В. В. Ядыкина, Д. В. Землякова // *Дороги и мосты*. – 2014. – № 1(31). – С. 225-240. – EDN SMVCKL.

176. Ярцев, В. П. Эксплуатационные свойства и долговечность битумно-полимерных композитов : Учебное пособие для студентов, обучающихся по специальностям 270102, 270105, 270205 / В. П. Ярцев, А. В. Ерофеев ; Издательство ФГБОУ ВПО "ТГТУ", редактор Л. В. Комбарова. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, 2014. – 80 с.

177. Ястремский, Д. А. Исследование битумного вяжущего со стабилизирующими добавками методами инфракрасной спектроскопии и рентгеноспектрального анализа / Д. А. Ястремский // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 11. – С. 24-31. – DOI 10.34031/2071-7318-2020-5-11-24-31.

178. Симчук, Е. Н. Современные подходы к моделированию старения битумных вяжущих материалов в лабораторных условиях /Е. Н. Симчук, А. В. Харпаев, И. М. Рожков // Дороги и мосты. – 2022. – № 2(48). – С. 274-306. – EDN HUWSYA.

179. Салахова, В. К. Оценка влияния полиэтилена низкого давления на процесс старения асфальтобетона / В. К. Салахова, Л. В. Рудакова, К. Г. Пугин // Управление техносферой. – 2023. – Т. 6, № 2. С. – 142-157. – DOI 10.34828/UdSU.2023.86.23.002.

180. Стукалов, А. А. Особенности технологического старения нефтяного дорожного битума в составе асфальтовяжущего вещества / А. А. Стукалов, А. А. Бугаец, В. В. Шабля // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2022. – № 1(153). – С. 104-107. – EDN IWHGBB.

181. Братчун, В. И. Прогнозирование изменения группового состава при технологическом старении дорожного битума / В. И. Братчун, М. К. Пактер, А. А. Стукалов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2015. – № 1(111). – С. 12-20. – EDN ZRFALV.

182. 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.

183. Study on use of various type of warm mix asphalt (WMA) additive's in asphalt binder / K.S. Mahavir, P. Vinayak, C.S. Kumar [et al.] // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). – 2023. – Vol.11. – P.2479-2489. – DOI: 10.22214/ijraset.2023.54051

184. Remisova, E. Effect of additives on reducing temperature during asphalt mixtures production / E. Remisova // 17th international multidisciplinary scientific

geoconference SGEM 2017, Albena, Bulgaria, 29 июня – 05 2017 года. Vol. 17. – Albena, Bulgaria: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2017. – Р. 123-130. – DOI 10.5593/sgem2017/62/S26.016. – EDN BDGGIW.

185. Исследования технологических аспектов проектирования теплых асфальтобетонных смесей с учетом определения оптимальных температурных интервалов / К. А. Жданов, Е. Н. Симчук, И. А. Дедковский [и др.] // Дороги и мосты. – 2024. – № 1(51). – С. 175-192. – EDN ЕНТФДС.

186. Яромко, В. Н. О совершенствовании методов оценки качества уплотнения асфальтобетона / В. Н. Яромко // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2015. – № 2(72). – С. 3-5. – EDN TWNCZN.

187. Братчун, В. И. Литые асфальтобетоны повышенной долговечности, скоростной ямочный ремонт дорожных покрытий / В. И. Братчун, О. А. Пшеничных, В. В. Ремнев // Технологии бетонов. – 2024. – № 5(196). – С. 41-46. – EDN TMBKNF.

188. Курлыкина, А. В. Модификация битумных вяжущих для литого асфальтобетона / А. В. Курлыкина, А. И. Ткачева, Е. А. Власова // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова: Материалы конференции, Белгород, 30 апреля 2021 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – 2021. – С. 2122-2130. – EDN ОТЕИКК.

189. Технологичные горячие и литые дорожные асфальтобетонные смеси / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, О. А. Пшеничных [и др.] // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2022. – Т. 18, № 3. – С. 95-108. – EDN BHSZYW.

190. Мамонтов, А. С. Литые асфальтобетоны для мостовых сооружений / А. С. Мамонтов, О. В. Маковецкая-Абрамова, И. В. Цыплакова // Роль молодых ученых и исследователей в решении актуальных задач АПК: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и обучающихся, Санкт-Петербург-Пушкин, 26–28 марта 2020 года. – Санкт-

Петербург-Пушкин: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. – 2020. – Т. 1 – С. 289-295. – EDN YILSIO.

191. Литые асфальтополимерсеробетоны повышенной долговечности / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, А. Г. Доля [и др.] // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2020. – № 8. – С. 603-622. – EDN TVRVXE.

192. Егорычев, А. С. Обоснование применения битумного вяжущего в литых асфальтобетонных смесях при устройстве и ремонте покрытия проезжей части автодорожного моста / А. С. Егорычев, Ю. И. Калгин // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2018. – № 1(49). – С. 72-79. – EDN YREWQN.

193. Сатов, А. Г. Литой асфальтобетон дорожный / А. Г. Сатов, Н. А. Гриневиц // Научное творчество молодежи - лесному комплексу России: Материалы XX Всероссийской (национальной) научно-технической конференции, Екатеринбург, 01–14 апреля 2024 года. – Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет. – 2024. – С. 946-950. – EDN JLPUCN.

194. Переработка и применение асфальтового гранулята / А. П. Лупанов, В. В. Силкин, А. С. Суханов [и др.]. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Техполиграфцентр", 2024. – 184 с. – ISBN 978-5-94385-217-6. – EDN SIUDCY.

195. Thermal behavior and energy efficiency of modified concretes in the tropical climate: A systemic review / Y. H. Lee, M. Amran, Y. Y. Lee [et al.] // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, No. 21. – DOI 10.3390/su132111957. – EDN CRHQWJ.

196. Дорожное покрытие под воздействием ошипованных шин / Ю. Э. Васильев, М. М. Болгак, Г. А. Понарин, А. А. Бутринов // Мир дорог. – 2020. – № 128. – С. 71-74. – EDN MOTFTA.

197. Дорожные асфальтополимерсеробетоны повышенной долговечности / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, Е. А. Ромасюк [и др.] // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. – 2023. – № 2(2). – С. 11-19. – EDN ZUFJVG.

198. Угланов, Ю. А. Исследование колеиности и определение риска возникновения ДТП на дорогах, подверженных образованию колеи / Ю. А. Угланов // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2022. – № 1(52). – С. 33-39. – EDN BVEEGW.

199. ДМД 02191.2.051–2012. Рекомендации по подбору составов асфальтобетонных смесей по асфальтовяжущему. Дорожный методический документ. Введ. 01.03.2012. Минск: Государственное предприятие «БелдорНИИ», – 2012. – 23 с.

200. Эксплуатационное и технологическое старение органических вяжущих / Ю. Э. Васильев, У. О. Менькина, К. А. Селезнев, А. Л. Рамос // Научные технологии и инновации : Электронный сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 29 апреля 2019 года. Том Часть 4. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 58-68. – DOI 10.12737/conferencearticle_5cecedc16585e4.49941232. – EDN WGJXOO.

201. Губа, В. В. Изменение состава, структуры и текстуры асфальтобетона в процессе эксплуатации / В. В. Губа, К. Р. Губа, Л. Н. Третьякова // Вести Автомобильно-дорожного института. – 2023. – № 3(46). – С. 17-24. – EDN QLGXDH.

202. Кузнецов, Д. А. Устойчивость к образованию трещин при старении асфальтобетона с пористыми минеральными порошками / Д. А. Кузнецов, Б. С. Агамян, Т. Р. Баранов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 6. – С. 43-45. – EDN RPJPJJ.

203. Старение асфальтовых вяжущих в асфальтобетонах для покрытий автомобильных дорог / М. Г. Салихов, Е. В. Веюков, Л. И. Малянова, А. З. Гайфуллина // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2020. – Т. 1. – С. 341-346. – EDN MUSWHE.

204. Атмосферостойкость модифицированных асфальтополимербетонов / В. Л. Беспалов, О. Н. Нарижная, А. А. Олейник [и др.] // Вестник Донбасской

национальной академии строительства и архитектуры. – 2023. – № 1(159). – С. 52-59. – EDN STFNFV.

205. Изменение состава и свойств дорожного битума при его термостабилизации / Н. И. Шестаков, Н. В. Хохлова, Ю. Э. Васильев, У. О. Менькина // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 12. – С. 1926-1936. – DOI 10.22227/1997-0935.2023.12.1926-1936. – EDN RFJXES.

206. Патент № 2654954 С1 Российская Федерация, МПК G01N 17/00, G01N 33/42. Способ определения скорости и интенсивности старения асфальтобетонов: № 2017104604 : заявл. 13.02.2017 : опубл. 23.05.2018 / М. Г. Салихов, Е. В. Веюков, Л. Р. Сабиров, Л. И. Малянова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет».

207. ГЭСН 81-02-27-2022. Сметные нормы на строительные работы. Сборник 27. «Автомобильные дороги» (утв. Приказом Минстроя России от 30.12.2021 №1046/пр) (ред. от 07.02.2025).

208. ОДМ 218.4.023-2015. Методические рекомендации по оценке эффективности строительства, реконструкции, капитального ремонта и ремонта автомобильных дорог. М.: РОСАВТОДОР, 2014. – 180 с.

209. Евгеньев, Г. И. Автомобильные дороги: перспективы снижения углеродного следа / Г. И. Евгеньев // Автомобильные дороги. – 2021. – № 7(1076). – С. 150-153. – EDN UCQAXM.

210. Шестаков, В. Н. Аналитический расчет теплофизических коэффициентов асфальтобетонных смесей в технологическом процессе / В. Н. Шестаков, А. Н. Шестаков // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2008. – № 1(7). – С. 46-50. – EDN PBPZXP.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Стандарт организации на полифункциональную добавку Вискодор ПВ-2

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СОГЛАСОВАНО:

Проректор по научной и
инновационной деятельности
д-р пед. наук, профессор

Т.М. Давыденко
«25» 09 2023 г.



УТВЕРЖДАЮ:

Ректор БГТУ им. В.Г. Шухова,
д-р экон. наук, профессор

С.Н. Глаголев
«25» 09 2023 г.

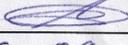


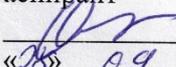
**ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ДОБАВКА
ДЛЯ БИТУМА И АСФАЛЬТОБЕТОНА
«ВИСКОДОР ПВ-2»
Технические условия
СТО 02066339-058-2023**

РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель:
профессор кафедры АЖД
им. А.М. Гридчина
доктор технических наук

В.В. Ядыкина
«25» 09 2023 г.

ведущий инженер кафедры АЖД
им. А.М. Гридчина
кандидат технических наук

А.Е. Акимов
«25» 09 2023 г.

аспирант

О.А. Михайлова
«25» 09 2023 г.

Белгород 2023 г.

Регламент производства полифункциональной добавки Вискодор ПВ-2

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В.Г. ШУХОВА**



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной
и инновационной деятельности,
Т.М. Давыденко

«25» 09 2023 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ

на производство полифункциональной добавки для битума и асфальтобетона
«Вискодор ПВ-2»

СОГЛАСОВАНО

Генеральный директор
ООО «Селена»
А.А. Гонтарев

«25» 09 2023 г.



РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель:
профессор кафедры АЖД
им. А.М. Гридчина
доктор технических наук
В.В. Ядыкина

«25» 09 2023 г.

ведущий инженер кафедры АЖД
им. А.М. Гридчина
кандидат технических наук

А.Е. Акимов
«25» 09 2023 г.

аспирант

О.А. Михайлова
«25» 09 2023 г.

Белгород 2023 г.

Акт апробации результатов работы

ООО «Автодорстрой-подрядчик»
г.Белгород
Михайловское шоссе, 2
27-84-33

УТВЕРЖДАЮ
Директор
ООО «Автодорстрой-Подрядчик»
Ефимов В.Ф.



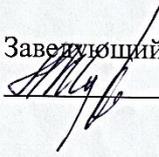
Акт

апробации результатов научно-исследовательской работы

Мы, нижеподписавшиеся: директор ООО «Автодорстрой-Подрядчик» Ефимов В.Ф., заведующий лабораторией Жданов А.В., с одной стороны, и представители БГТУ им. В.Г. Шухова: д-р технических наук, профессор Ядыкина В.В., ведущий инженер кафедры АЖД имени А.М. Гридчина Акимов А.Е., аспирант кафедры АЖД имени А.М. Гридчина Михайлова О.А., с другой стороны, составили акт о том, что результаты научно-исследовательской работы Михайловой О.А. апробированы в ООО «Автодорстрой-Подрядчик».

Опытная партия асфальтобетонной смеси А16Вн теплая на основе битумного вяжущего, модифицированного добавкой Вискодор ПВ-2 на основе синтетических восков, была выпущена в июне 2024 года. Асфальтобетонная смесь была уложена в верхний слой покрытия экспериментального участка автомобильной дороги в мкр. «Шишино-84» ул. 70 лет Победы км 0+030 по км 0+230. За опытным участком установлено наблюдение.

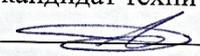
От ООО «Автодорстрой-Подрядчик»:

Заведующий лабораторией

А.В. Жданов

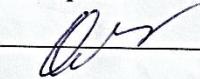
От БГТУ им. В.Г. Шухова:

профессор кафедры АЖД
им. А.М. Гридчина
доктор технических наук

В.В. Ядыкина

ведущий инженер кафедры АЖД
им. А.М. Гридчина
кандидат технических наук

А.Е. Акимов

Аспирант


О.А. Михайлова

Акт апробации результатов работы

ООО «Автодорстрой-подрядчик»
г.Белгород
Михайловское шоссе, 2
27-84-33

УТВЕРЖДАЮ
Директор
ООО «Автодорстрой-Подрядчик»
Ефимов В.Ф.

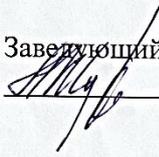


Акт
апробации результатов научно-исследовательской работы

Мы, нижеподписавшиеся: директор ООО «Автодорстрой-Подрядчик» Ефимов В.Ф., заведующий лабораторией Жданов А.В., с одной стороны, и представители БГТУ им. В.Г. Шухова: д-р технических наук, профессор Ядыкина В.В., ведущий инженер кафедры АЖД имени А.М. Гридчина Акимов А.Е., аспирант кафедры АЖД имени А.М. Гридчина Михайлова О.А., с другой стороны, составили акт о том, что результаты научно-исследовательской работы Михайловой О.А. апробированы в ООО «Автодорстрой-Подрядчик».

Опытная партия асфальтобетонной смеси А16Вн теплая на основе битумного вяжущего, модифицированного добавкой Вискодор ПВ-2 на основе синтетических восков, была выпущена в июне 2024 года. Асфальтобетонная смесь была уложена в верхний слой покрытия экспериментального участка автомобильной дороги в мкр. «Шишино-84» ул. 70 лет Победы км 0+030 по км 0+230. За опытным участком установлено наблюдение.

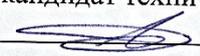
От ООО «Автодорстрой-Подрядчик»:

Заведующий лабораторией

А.В. Жданов

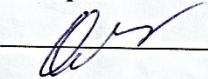
От БГТУ им. В.Г. Шухова:

профессор кафедры АЖД
им. А.М. Гридчина
доктор технических наук

В.В. Ядыкина

ведущий инженер кафедры АЖД
им. А.М. Гридчина
кандидат технических наук

А.Е. Акимов

Аспирант


О.А. Михайлова

Результаты испытаний асфальтобетонной смеси

Результаты испытаний асфальтобетонной смеси А16Вн

Дата производства асфальтобетонной смеси: 20.06.2024 г.

1) Состав асфальтобетонной смеси А16Вн:

Состав №1 (А16Вн):

– щебень фр. 8-16 мм РУП «Гранит»	35,45 %
– щебень фр. 4-8 мм РУП «Гранит»	17,72 %
– отсев дробления фр. 0-4 мм АО «Павловск Неруд»	37,81 %
– минеральный порошок МП-2 ООО «ВЗПМ»	3,54 %
– Битум БНД 70/100	5,48 %

Состав №2 (А16Вн теплая):

– щебень фр. 8-16 мм РУП «Гранит»	35,45 %
– щебень фр. 4-8 мм РУП «Гранит»	17,72 %
– отсев дробления фр. 0-4 мм АО «Павловск Неруд»	37,81 %
– минеральный порошок МП-2 ООО «ВЗПМ»	3,54 %
– Битум БНД 70/100+2% Вискодор ПВ-2	5,48 %

2) Показатели физико-механических свойств

Наименование показателя	Требования ГОСТ Р 58406.2- 2020 к А16Вн	Состав № 1	Требования ГОСТ Р 70396 – 2022 к А16Вн теплой	Состав №2
Объемная плотность, г/см ³	не норм.	2,424	не норм.	2,420
Максимальная плотность, г/см ³	не норм.	2,467	не норм.	2,459
Содержание воздушных пустот, %	2,5-4,5	2,9	2,5-4,5	2,7
Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ), %	не менее 12,0	14,2	не менее 12,0	14,2
Коэффициент водостойкости	не менее 0,85	0,90	не менее 0,85	0,95
Разрушающая нагрузка по Маршаллу, Н	не менее 5340	9250	не менее 4300	10940
Деформация по Маршаллу, мм	2,0-4,0	3,1	2,0-4,5	2,12
Средняя глубина колеи, мм	не более 4,5	3,6	не более 4,5	2,1

Заведующий кафедрой
АЖД им. А.М. Гридчина

Ведущий инженер кафедры
АЖД им. А.М. Гридчина



Е.А. Яковлев



А.Е. Акимов

Протокол испытаний ОГКПУ «УпрДорТранс»

**ОГКУ «Управление дорожного хозяйства и транспорта
Белгородской области»**

Отдел лабораторного контроля
 Аттестат подтверждения компетентности
 Испытательной лаборатории
 №РОСДОП RU.0202 ПК 00384
 Зарегистрирован в реестре 01.12.2016 г.
 Действителен до 01.04.2026 г.

ПРОТОКОЛ

лабораторных испытаний вырубки из асфальтобетонного покрытия

Место отбора пробы – вырубка из асфальтобетонного покрытия
 автомобильной дороги в мкр. «Шишино-84»
 ул. 70 лет Победы км 0+030 по км 0+230

Дата отбора вырубок: 02.07.2024 г.

Производитель работ: ООО «Автодорстрой-Подрядчик»

Показатели	Вырубки							
	БНД 70/100			Требования ГОСТ Р 58406.2- 2020 к А 16 Вн	БНД 70/100+ 2% Вискодор ПВ-2			Требования ГОСТ Р 70396- 2022 к А 16 Вн теплой
	км 0+030, право	км 0+130, ось	км 0+230, лево		км 0+330, право	км 0+430, ось	км 0+530, лево	
Объемная плотность, г/см ³	2,420	2,420	2,420	не норм.	2,425	2,423	2,422	не норм.
Содержание воздушных пустот,%	3,0	2,9	2,9	1,0-6,0	2,9	2,8	2,9	2,0-6,0

Заключение: По физико-механическим свойствам вырубки соответствуют требованиям ГОСТ Р 58406.2-2020 и ГОСТ Р 70396-2022.

Начальник отдела лабораторного контроля
 ОГКУ «УпрДорТранс Белгородской области»



Н.П. Куцына

Результаты испытаний асфальтобетона через год после укладки

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
 ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
 «БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
 УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»

Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46



УТВЕРЖДАЮ

Директор по научной и инновационной
 деятельности БГТУ им. В.Г. Шухова

Т. М. Давыденко

«30» 07 2025 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 30/07

от 30 июля 2025 года

Наименование и юридический адрес заказчика: ООО «Автодорстрой-Подрядчик»,
 308009, Белгородская область, г. Белгород, ул. Михайловское шоссе, д. 2.

Наименование продукции: асфальтобетонное покрытие.

Дата отбора проб: 23.07.2025

Место отбора проб: автомобильная дорога в мкр. «Шишино-84» ул. 70 лет Победы с км
 0+030 по км 0+230

Сведения об образцах, их идентификация: керны из верхнего слоя асфальтобетонного
 покрытия А16Вн точка отбора №1 с применением БНД 70/100, точка отбора №2 – с
 применением БНД 70/100, модифицированного 2% Вискодор ПВ-2.

*Нормативные документы, в которых установлены требования к испытываемой
 продукции:* ГОСТ 58406.2-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси горячие
 асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия и ГОСТ Р 70396-2022 Дороги
 автомобильные общего пользования. Смеси теплые асфальтобетонные и асфальтобетон.
 Общие технические условия.

Методика испытаний: ГОСТ Р 58401.10, ГОСТ Р 58401.8, ГОСТ Р 58401.18, ГОСТ Р
 58406.8.

Результаты испытаний приведены в приложении на одном листе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Все определенные физико-механические показатели кернов
 покрытия соответствуют техническим требованиям ГОСТ Р 58406.2-2020 и ГОСТ Р
 70396-2022

Заведующий кафедрой
 АЖД им. А.М. Гридчина

Ведущий инженер кафедры
 АЖД им. А.М. Гридчина

Е.А. Яковлев

А.Е. Акимов

Приложение №1
к протоколу испытаний 30/07 от 30 июля 2025 года

Таблица. Физико-механические характеристики кернов асфальтобетонного покрытия

Показатели	Точка отбора			
	№1	Требования ГОСТ Р 70396 – 2022 к А16Вн теплой	№2	Требования ГОСТ Р 58406.2 – 2020 к А16Вн
Объемная плотность, г/см ³	2,415	не нормируется	2,418	не нормируется
Содержание воздушных пустот, %	3,0	2,0-6,0	2,8	2,0-6,0
Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ), %	14,3	≥ 12,0	14,4	≥ 12,0
Коэффициент водостойкости	0,88	≥ 0,85	0,94	≥ 0,85
Разрушающая нагрузка по Маршаллу, Н	9140	≥ 4300	10420	≥ 5340
Деформация по Маршаллу, мм	3,1	2,0 – 4,5	2,2	2,0 – 4,0

Ведущий инженер кафедры
АЖД им. А.М. Гридчина



А.Е. Акимов

**Протокол испытаний асфальтобетона через год эксплуатации
ОГКПУ «УпрДорТранс»**

**ОГКУ «Управление дорожного хозяйства и транспорта
Белгородской области»**

Отдел лабораторного контроля
Аттестат подтверждения компетентности
Испытательной лаборатории
№РОСДОП RU.0202 ПК 00384
Зарегистрирован в реестре 01.12.2016 г.
Действителен до 01.04.2026 г.

**ПРОТОКОЛ
лабораторных испытаний вырубки из асфальтобетонного покрытия**

Место отбора пробы – вырубка из асфальтобетонного покрытия
автомобильной дороги в мкр. «Шишино-84»
ул. 70 лет Победы км 0+030 по км 0+230

Дата отбора вырубок: 23.07.2025 г.

Производитель работ: ООО «Автоморстрой-Подрядчик»

Показатели	Вырубки							
	БНД 70/100			Требования ГОСТ Р 58406.2- 2020 к А 16 Вн	БНД 70/100+ 2% Вискодор ПВ-2			Требования ГОСТ Р 70396- 2022 к А 16 Вн теплой
	км 0+030, право	км 0+130, ось	км 0+230, лево		км 0+330, право	км 0+430, ось	км 0+530, лево	
Объемная плотность, г/см ³	2,418	2,415	2,420	не норм.	2,421	2,425	2,426	не норм.
Содержание воздушных пустот, %	2,7	2,9	3,1	1,0-6,0	3,0	2,8	2,7	2,0-6,0

Заключение: По физико-механическим свойствам вырубки соответствуют требованиям ГОСТ Р 58406.2-2020 и ГОСТ Р 70396-2022.

Начальник отдела лабораторного контроля
ОГКУ «УпрДорТранс Белгородской области»



Н.П. Куцына

Протокол испытаний ГКУ Калужской области «Калугадорзаказчик»

Государственное казенное учреждение
Калужской области
"Калугадорзаказчик"
отдел производственной испытательной лаборатории
Сертификат соответствия № РОСС RU.И1617.04ДБ02.ИЛ0012.02 срок действия с 28.11.2022 по 28.11.2025
2023 г.

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ
Производственная испытательная лаборатория ГКУ Калужской области «Калугадорзаказчик»
№ РОСС RU.И1617.04ДБ02.ИЛ0012.02 срок действия с 28.11.2022 по 28.11.2025

ПРОТОКОЛ №68

Результаты определения физических показателей асфальтобетонной смеси ЦМА-16 пробный замес

Дата отбора: 04.10.2023г.
Дата испытания: 10-11.10.2023г.
Подрядная организация: ООО «ДСУ-ИнжСтрой»
Место отбора: АБЗ-1 п. Мстихино

Стабилизирующая добавка: стабилизатор гранулированный «Нанобит-СД» 0,3%
Адгезионная добавка: «Вискодор ПВ-2» (порошок) 2% от битума (улучшает сцепление дорожных битумов с минеральными материалами, повышает показатель устойчивости к колееобразованию)

№ п/п	Наименование показателей	Требования ГОСТ Р 58406.1-2020	Фактические показатели
1	Объемная плотность, г/см ³	не нормируется	2,431
2	Максимальная плотность, г/см ³	не нормируется	2,520
3	Содержание воздушных пустот, %	от 2,0 до 4,0	3,5
4	Стекание вяжущего, %, не более	0,20	0,04

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Данная проба смеси ЦМА-16 соответствует требованиям ГОСТ Р 58406.1-2020.

Настоящий протокол относится только к образцам подвергнутым испытанию.

Начальник лаборатории

Л.А. Кулакова

Испытание произвел
главный специалист

О.В. Колпакова

**Отзыв об испытаниях добавки от ТОО «CITIC Construction Co LTD»
(Казахстан)**

**ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ
«CITIC CONSTRUCTION CO.,
LTD» ФИЛИАЛЫ
"ҚАРАҒАНДЫ-БАЛҚАШ"
АВТОЖОЛЫН ҚАЙТА
ЖАҢАРТУ ЖОБАСЫ»
КМ 1666-1713 УЧАСКЕСІ**
Қазақстан Республикасы, 130000
Мангистау обласы, Ақтау қаласы,
15 мкр., тұрғын үй алабы «Самал», 61 ұй, 1 п.
тел.: 8 7172 40-18-33
Email: kb-ccc1@citic.com



**ФИЛИАЛ «CITIC
CONSTRUCTION CO., LTD» В
КАЗАХСТАНЕ
ПРОЕКТ РЕКОНСТРУКЦИИ
А/Д «ҚАРАҒАНДА –
БАЛХАШ»
УЧАСТОК КМ 1666-1713**
Республика Казахстан, 130000
Мангистауская область, город Ақтау,
15 мкр., ЖМ «Самал», 61 ұй, 1 п.
тел.: 8 7172 40-18-33
Email: kb-ccc1@citic.com

Исх.№:KZ-KB-CCC1-ZJ6-ОРТ-20231204-093

Кому:
Руководителю
ТОО «Optimus KZ»
г-ну Оспанову С.К

Отзыв о применении добавок от «ООО Селена»

В ТОО «CITIC Construction Co LTD в Казахстане»

в 2023 году для модификации битума при производстве асфальтобетонных смесей применялась адгезионная добавка «ДАД К премиум» стабилизирующая добавка «Нанобит Сд», Полимерная добавка «Вискодор Пв-2» (ООО «Селена»)

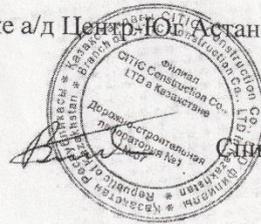
Технологических трудностей с введением в битум добавок, а так же с укладкой асфальтобетонных смесей приготовленных с их применением, за весь период использования, не отмечалось.

Результаты контрольных проб асфальтобетонных покрытий уложенных с применением присадки «ДАД- К премиум » стабилизирующей добавкой «Нанобит СД» и Полимер добавкой «Вискодор ПВ-2» отвечают всем требованиям и стандартам.

Устройство асфальтобетонных покрытий с применением выше перечисленных добавок производилось на следующих объектах:

- «Реконструкция автомобильной дороги на участке а/д Центр-Юг Астана-Караганда-Балхаш-Алматы км 1666-1713

Начальник Лаборатории
ТОО «CITIC Construction Co LTD в Казахстане»



Щириденков В.И

**Акт о внедрении результатов работы в ООО «CAPITAL ROAD
CONSTRUCTION» (Узбекистан)**

"Утверждаю"



Директор «Инженерная компания по
ремонту многоквартирных домов» при
Хакимияте города Ташкента
Ахунов У.

евваря 2025 год

Акт № _____

по внедрению научно-исследовательской работы в практику

г. Ташкент

27 января 2025 год

1. Наименование научно-исследовательской продукции: Полимерно-щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь (ПЩМА-20) изготовленная на основе модифицированный битума с полимерной добавки Вискадор-ПВ-2, адгезионный добавки ДАД-1, стабилизирующий добавки Нанобит-СД и местных армированный добавки

2. Результат, вид производства: Производство

3. Заказчик научно-технической продукции: Ташкентский хакимият

4. Исполнители: Научный руководитель – Курбонов С.З. (Начальник лаборатории ГУ АДНИИ), Оразов Б. (Директор ООО «CAPITAL ROAD CONSTRUCTION»), Толочко А. (Директор ИП ООО «Optimus SA» (Компания «Селена» Россия), Усманов М. (Менеджер по проектам ИП ООО «Optimus SA» (Компания «Селена» Россия), Моргунов И. (Технолог ТОО «Optimus KZ» (Компания «Селена» Россия), Абдулабиев О.А. (Директор ООО «ТРАНСТЕХБУТЛАШ»)

5. Основы проведения научно-исследовательской работы (НИР): Постановление Президента Республики Узбекистан от 06 июля 2022 года № ПП-307 «Об организационных мерах по реализации стратегии инновационного развития Республики Узбекистан в 2022-2026 годах»

6. Дата ввода и информация о результатах научно-исследовательской работы (НИР): Комитет автомобильных дорог Республики Узбекистан.

7. Информация о выполнении научно-исследовательской работы (НИР): Автомобильная дорога улица Фароби, Малая кольцевая дорога, города Ташкента. Площадь опытно-экспериментального участка – 4300 м². Для строительство опытно-экспериментального участка использовались нижеследующие машины и механизмы, таблице 1.

Ген. подрядчик: ООО «CAPITAL ROAD CONSTRUCTION»

Условия для строительства: температура воздуха 6-8 °С. Дата и время начала работы с 26.01.2025г - 14:00, окончания работы до 27.01.2025г. 01:00

Наименование машин и механизмов

Таблица 1

№	Тип работы	Машина-название механизмов	Марка	Количество Ед.	Отработанное время, ч-мин
1	Очистка подкладочного слоя	Водовоз	ISUZU	1	2 ч 45 мин
2	Распыление битумной эмульсии	Гудронатор	ISUZU	1	55 мин
3	Изготовление смеси ПЩМА	Асфальтобетонный завод	TTM LB-1200	1	7 ч 15 мин
4	Транспортировка смеси ПЩМА	Автосамосвалы	MAN, 20т	12	7 ч 40 мин
5	Укладка смеси ПЩМА	Асфальтоукладчик	FOGEL SUPER1900	2	8 ч 10 мин
6	Уплотнение смеси ПЩМА	Легкий каток 4 t	XMG	2	9 ч 15 мин
		Средний каток 8,5t	XMG	2	9 ч 45 мин

Конструкция дорожного покрытия: Полимерно-щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь (ПЩМА-20) изготовленная на основе модифицированный битума с полимерной добавки Вискадор-ПВ-2, адгезионный добавки ДАД-1, стабилизирующий добавки Нанобит-СД и местных армированный добавки, толщина конструкции составляет 50 мм

Технология производства смеси: щебень фракции 15-20 мм – 38,8 %, щебень фракции 10-15 мм – 19,9 %, щебень фракции 5-10 мм - 11 %, песок отсево из дробления фракции 0-5 мм – 11,9 %, минеральный порошок - 11 %, пыль – 2 %, битум марки БНД 60/90 (с Вискадор ПВ-2 -0,9 %, ДАД-1 -0,4 %) - 5,0 %, стабилизирующая добавка Нанобит-СД - 0,4 % (с 10 % местная стабилизирующая добавка на основе модифицированная базальтового волокна), стекания вяжущего - 0,15 %. Полимерная-щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь (ПЩМА-20) изготовленная на основе местных минеральных материалов, температура приготовления 170-180 °С. Минеральные материалы нагревали до 175-185 °С.

Технология укладки смеси - нижний слой ремонтируемого дорожного покрытия срезали с помощью фрезы, а верхнюю часть тщательно очищали от пыли. Промыли водой и высушили. После этого поверхности обработали битумной эмульсией марки ЭБК-3 с помощью автогудронатора для обеспечения сцепления между слоями, приготовленную на основе ГОСТа 18659-2005, в количестве 0,25-0,30 л/м². Смесь разрешалось укладывать через 4 часа после обработки поверхности битумной эмульсией. Асфальтобетонная смесь ПЩМА-20 приготовлена на основе местный стабилизирующий добавки, толщина уплотненного слоя составляет 60-70 мм. Степень уплотнения асфальтобетона составляет 50-60 %. Скорость асфальтоукладчика 2 км/ч. Смесь ПЩМА-20 укладывали тщательным перемешиванием.

Технология уплотнения смеси - для уплотнения каждого слоя использовались вальцовые катки среднего и тяжелого веса. Работы по уплотнению смеси начиная с температуры 165-175 °С и завершая при температуре 80-90 °С. Работы по уплотнению сначала легкими катками весом 4 т 3-4 прохода по одной линии, после средних катки весом 8-9 т прохода по одной линии.

Результаты работ по опытно-экспериментальному участку: Полимерно-щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь (ПЩМА-20) изготовленная на основе модифицированный битума с полимерной добавки Вискадор-ПВ-2, адгезионный добавки

ДАД-1, стабилизирующий добавки Нанобит-СД и местных армированный добавки, водонасыщение - 3,0 - 3,9 %, остаточная пористость - 3,5 - 4,2 %, средняя плотность - 2,38 - 2,42 г/см³, глубина колеса - 2,5 - 2,9 мм, прочность на сжатие при 50 °С - 2,5 - 2,9 МПа, прочность на сжатие при 20 °С - 6,9 МПа, водостойкость после длительного хранения равна - 0,86 - 0,89. Физико-механические свойства дорожной одежды из полимерно-щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси (ПЩМА-20) соответствуют требованиям УзДСт 3610-2022.

8. Результаты технико-экономической эффективности от реализации НИОКР: при применении полимерно-щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь (ПЩМА-20) изготовленная на основе модифицированный битума с полимерной добавки Вискадор-ПВ-2, адгезионный добавки ДАД-1, стабилизирующий добавки Нанобит-СД и местных армированный добавки образование колеи в сухих жарких климатических условиях автомобильных дорог в 5-6 раз меньше, термостойкость на 40-60% выше. Из-за низкой стоимости в период эксплуатации автомобильных дорог экономическое эффективность составляет 20-30%.

Рекомендуется внедрение полимерно-щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь (ПЩМА-20) изготовленная на основе модифицированный битума с полимерной добавки Вискадор-ПВ-2, адгезионный добавки ДАД-1, стабилизирующий добавки Нанобит-СД и местных армированный добавки при строительстве, реконструкции и ремонте автомобильных дорог.

Подписи: Акта внедрения данной НИР в практику

«27» января 2025 г.

Подписавшие:

Исполнители:

Научный руководитель, начальник
лаборатории ГУ АДНИИ:

Курбонов С.З.

Директор ИП ООО «Optimus CA»:

Голошко А.

Менеджер по проектам ИП ООО «Optimus
CA»:

Усманов М.

Получатели:

Технадзор «Инжиниринговая компания по
ремонту многоквартирных домов» при
хакимате города Ташкента:

Технолог ТОО «Optimus KZ» (Компания
«Селена» Россия):

Моргунов И.

Директор ООО «CAPITAL ROAD
CONSTRUCTION»:

Оразов Б.

Директор ООО «ТРАНСТЕХБУТЛАШ»:

Абдунабиев О.А.