

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»

На правах рукописи



Чудайкин Анатолий Дмитриевич

**ЗАМЕДЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО
ОБРАБОТКОЙ ЗАЩИТНЫМИ ГАЗАМИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ
АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ**

Специальность 2.1.8. Проектирование и строительство дорог,
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук,
профессор
Рябова Ольга Викторовна

Воронеж – 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ БИТУМА И АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ	12
1.1. Международная и отечественная практика производства и применения дорожных битумов.....	12
1.2. Основные способы получения битума, состав и факторы старения.....	19
1.3. Старение битумов с точки зрения его состава и протекающих химических процессов	23
1.4. Технология производства асфальтобетонной смеси и факторы старения битума на этапе приготовления асфальтобетонной смеси	27
1.5. Обзор способов предотвращения старения битумов	37
1.6 . Выводы по Главе 1	40
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ДОРОЖНЫХ БИТУМОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕДАХ	41
2.1. Теоретическое обоснование применения защитных газов для замедления термоокислительных реакций в битумном вяжущем	41
2.2. Алгоритм проведения исследований при изучении закономерностей термоокислительного старения нефтяных дорожных битумов в кислородосодержащей и инертной среде	43
2.3. Физико-математическое моделирование процессов производства асфальтобетонной смеси с применением защитных газов	49
2.4. Базовые показатели, определяемые в лабораторных условиях при старении битума и асфальтобетона.....	57
2.5. Выводы по Главе 2	65
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ.....	66

3.1. Реологические характеристики битумов, термостатируемых в кислородной и инертной среде	66
3.2. Деформационная устойчивость асфальтобетона в зависимости от условий старения вяжущего	94
3.3. Технологическая схема производства асфальтобетонной смеси с возможностью модифицирования окружающей газовой среды	105
3.4. Проведение производственных испытаний.....	107
3.5. Испытания полученных образцов на пределы прочности и сопротивление динамическим сдвигам	113
3.6. Оптимизация технологических параметров с применением регрессионного анализа	115
3.7. Испытания образцов в климатической камере.....	122
3.8. Выводы по Главе 3.....	126
ГЛАВА 4. ОБОСНОВАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	129
4.1. Техничко-экономическое обоснование применения обработки асфальтобетонной смеси защитными газами	129
4.2. Рекомендации по прогнозированию долговечности асфальтобетона при применении инертной газовой среды	139
4.3. Выводы по Главе 4.....	147
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	149
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	154
ПРИЛОЖЕНИЕ А Исходные данные для расчета технико-экономического обоснования.....	172
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Расчет технико-экономической эффективности технологии (сравнение вариантов приобретения газов и собственное производство азота)..	188
ПРИЛОЖЕНИЕ В Свидетельство на Секрет производства (ноу-хау).....	196
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акты о внедрении	197

ВВЕДЕНИЕ

Битум применялся для строительства дорог еще в глубокой древности. Так, в Вавилоне это вяжущее стали применять в качестве гидроизоляции, шумеры изготавливали из него кирпич, вылавливая материал в природных асфальто-битумных озерах. Наконец, древние ассирийцы стали строить с помощью природной смолы свои дороги. Однако, эти прекрасные сооружения со временем разрушались и трескались на открытом воздухе. Таким образом, еще 5 тысяч лет назад люди узнали, что битум – это не только прекрасный строительный материал, но еще и то, что он подвержен старению, растрескиванию и разрушению.

Долгие века дороги мостились булыжниками, но когда примерно 100 лет назад во всем мире началось массовое асфальтирование дорог, люди снова оценили битум с точки зрения его качества, но и опять столкнулись с проблемой старения битумного вяжущего.

Анализируя основные научные труды и материалы конференций нефтепромышленников по проблеме старения битума, можно сделать общий вывод, что в качестве базовой причины старения рассматривается сам факт окисления на этапе производства битума. Новые ГОСТы и передовые технологии лабораторного контроля подталкивают к внедрению новых технологий, но в российских реалиях практически невозможно отказаться от окисленных битумов, что взято за основную отправную точку. Если объективно рассмотреть данный вопрос, то факторы старения, которые возникают на этапе приготовления асфальтобетонной смеси, играют гораздо более заметную роль в старении битума, чем проблема его окисления при получении вяжущего. Есть множество научных работ, а также различные пути решения данной проблемы. Крупные ученые и в нашей стране, и за рубежом занимались вопросом старения битума, однако проблема актуальна и на сегодняшний день.

Многие технологии слишком удорожают готовый асфальтобетон, требуют введения дополнительных модифицирующих добавок, однако даже в

«Методических рекомендациях», выпущенных «Росавтодором», где предлагаются различные методы борьбы со старением битума, в качестве метода предотвращения окислительных процессов при производстве асфальтобетонной смеси предлагается введение безоксидных газов. Кроме того, видные представители автодорожной отрасли считают, что введение модификаторов и изменение химсостава асфальтобетона не являются выходом из ситуации. Любая добавка может непредсказуемо изменить конечное качество асфальтобетонной смеси, что приведет к выбраковке всей партии.

Кроме того, методы исследования битумного вяжущего нельзя назвать совершенными. Даже метод ускоренного старения битума в тонкой пленке в специальных печах, индекс пенетрации и другие методы нельзя назвать абсолютно точными и совершенными, так отмечено, что подобные методы далеко не всегда совпадают со скоростью окисления и показателями старения при реальной эксплуатации дорожного покрытия.

Актуальность темы.

Производство асфальтобетонных смесей для строительства транспортных сооружений – исторически сложившаяся парадигма. Тысячи организаций на протяжении многих десятилетий и вплоть до настоящего времени используют горячие технологии, при которых в процессе производства применяются окисленные битумы, что вызывает проблему старения органического вяжущего еще на этапе приготовления и хранения смесей на АБЗ. Получение пригодных смесей происходит при физическом процессе энтропийного смешения с подводом достаточного количества теплоты, необходимой для фазового превращения исходных компонентов асфальтобетонной смеси в материал, способный после его технологической укладки в дорожное покрытие сформировать конструктивный слой, требуемый для восприятия различных воздействий, включая транспортную нагрузку от потока транспортных средств. В то же время процессы нагрева, термостатирования и смешивания компонентов вызывают деструкцию органического вяжущего. Прежде всего это процесс термоокисления. Очевидно, что на смену «горячей технологии» производства асфальтобетона придут новые,

но для замены существующей базы производства строительных материалов требуются новые технологии, материалы и инвестиции.

Поиск новых методов производства строительных материалов идет прогрессивными методами и в силу экономических и физических ограничений вращается вокруг совершенствования качества вяжущего путем модификации его свойств. Совершенствование технологий, позволяющих улучшить свойства асфальтобетонных смесей, является актуальным направлением исследования. Изучение термоокисления битумного вяжущего и управление им в процессе приготовления асфальтобетонной смеси в присутствии защитных газов при нагреве, термостатировании и смешивании её компонентов было выбрано в качестве области исследований как новое направление научной работы.

Степень разработанности темы.

С момента использования битума в качестве вяжущего и применения асфальтобетона для устройства дорожного покрытия в нашей стране и за рубежом проводились многочисленные исследования в данной области. Свойства битума и асфальтобетона достаточно хорошо изучены. Этой проблемой занимались крупнейшие ученые. В их числе известный советский нефтехимик Черножуков Н.И., доктора технических наук Колбановская А. С., Печеный Б. Г. и Гезенцевей Л. Б., канд. техн. наук Бахрах Г. С. [34, 44, 52, 53, 78, 110]; зарубежные специалисты с мировым именем: Morgan P., Petersen J. и др. [128, 129]. Однако влияние защитных газов на свойства битумного вяжущего при производстве готовых асфальтобетонных смесей никем ранее не изучалось.

Объект исследования – технология производства асфальтобетонной смеси.

Предмет исследования – процессы термоокислительного старения битумного вяжущего при производстве горячей асфальтобетонной смеси.

Цель диссертационной работы – совершенствование технологии производства горячих асфальтобетонных смесей с применением защитных газов для снижения процессов термоокислительного старения битумного вяжущего.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Осуществить обзор научно-исследовательских работ в области защиты битумного вяжущего от термоокисления. Проанализировать отечественный и зарубежный опыт в применении защитных газов и инертной среды для замедления процессов термоокисления битумного вяжущего на этапах смешивания и хранения в процессе производства горячей асфальтобетонной смеси.

2. Используя физико-математическое моделирование изменения свойств асфальтобетонной смеси в технологических процессах смешивания, хранения и распределения, определить основные показатели для оценки и прогнозирования процессов старения битумного вяжущего в защитной газовой среде.

3. На основе лабораторных и производственных испытаний разработать технологию защиты асфальтобетонной смеси в процессе ее приготовления и хранения использованием защитного газа, созданием протектора окислительного процесса битумного вяжущего.

4. Обосновать целесообразный режим работы технологического оборудования в процессе обработки защитным газом при производстве горячей асфальтобетонной смеси и ее бункеровке.

5. Выполнить технико-экономическое обоснование применения защитных газов при производстве горячей асфальтобетонной смеси.

Научная новизна.

1. Выполнено усовершенствование технологии защиты асфальтобетонной смеси при ее производстве, которое заключается в применении защитных газов с целью замедления старения битумного вяжущего.

2. Разработана физико-математическая модель, которая учитывает влияние защитных газов на термоокислительную устойчивость битумного вяжущего для получения качественных дорожных покрытий и позволяет моделировать изменение свойств горячей асфальтобетонной смеси при смешивании и хранении в инертной среде.

3. Впервые установлено, что наличие инертной среды при обычной температуре приготовления смеси ($160^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$) замедляет процессы старения в

пределах 8-9 %. При температуре 180°C влияние инертной среды уже незначительно (не превышает 1-2%). Процесс разрушения образцов при нагружении происходит тем скорее, чем выше температура приготовления смеси. Разница этого показателя для всех испытанных образцов невелика.

4. На основе проведенных исследований разработан технологический режим применения защитных газов в агрегатах смешивания и хранения горячих асфальтобетонных смесей.

5. Получены регрессионные зависимости прочностных свойств горячего асфальтобетона в зависимости от используемого температурного режима и количества прокачиваемого газа.

6. Подтверждено повышение эксплуатационных характеристик и срока службы дорожных асфальтобетонных покрытий за счет совершенствования процесса производства горячих асфальтобетонных смесей.

Основные результаты, достигнутые в диссертационном исследовании, соответствуют паспорту научной специальности **2.1.8 Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей**, по направлениям исследований:

- п.12. Разработка, организация производства и технология изготовления эффективных материалов, изделий и конструкций для транспортного строительства.

- п.15. Организация производства, механизация и автоматизация технологических процессов производственных предприятий, обеспечивающих строительство, реконструкцию и эксплуатацию транспортных сооружений материалами, полуфабрикатами и изделиями.

Теоретическая значимость диссертации заключается в:

- исследовании влияния защитных газов на битумное вяжущее в процессе технологии приготовления, хранения и доставки горячей асфальтобетонной смеси для строительства дорожных асфальтобетонных покрытий, определено что инертная среда положительно влияет на структурно-групповой состав смеси,

уменьшая концентрацию окисленных высокомолекулярных соединений, улучшая микроструктуру битума, повышая его адгезионные свойства;

– в разработке физико-математической модели влияния защитного газа на старение битумного вяжущего, связывая изменение свойств горячей асфальтобетонной смеси в технологических процессах смешивания и хранения, обеспечивая прогноз для технологических операций, в которых влияние защитных газов на термоокислительную устойчивость битумного вяжущего важно для получения качественных дорожных покрытий.

Практическая значимость диссертации заключается в:

– усовершенствовании технологии защиты горячей асфальтобетонной смеси в технологическом процессе ее приготовления и хранения путем использования защитного газа и замедлении окислительного процесса битумного вяжущего;

– обосновании целесообразного режима работы технологического оборудования в процессе получения горячей асфальтобетонной смеси и ее бункеровке в среде защитного газа;

– разработке рекомендаций по применению защитных газов в промышленном производстве горячих асфальтобетонных смесей.

Все предлагаемые разработки и рекомендации позволяют обеспечить повышение долговечности дорожных покрытий и экономию затрат на ремонтные работы.

Методология и методы исследования

Для достижения поставленной цели и решения научных задач диссертационного исследования использовались как общенаучные, так и специальные методы: системный анализ, синтез, сопоставление, методы математического моделирования и планирования эксперимента. Для исследования процессов старения битумного вяжущего и горячих асфальтобетонных смесей легли в основу разработки зарубежных и отечественных исследователей в области технологии асфальтобетонов и битумных вяжущих, применялись различные стандартизованные методы и

поверенные приборы. Обработка результатов экспериментальных данных выполнялась с применением методов математической статистики.

Положения, выносимые на защиту

- результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов состаривания нефтяных дорожных битумов в кислородосодержащей и инертной средах;
- способ замедления термоокислительного старения асфальтобетонных смесей в присутствии защитных газов;
- технология производства асфальтобетонных смесей с применением обработки защитными газами;
- рекомендации по прогнозированию долговечности асфальтобетона при применении инертной газовой среды.

Апробация результатов исследования

Основные положения и результаты диссертационной работы презентованы и обсуждены на следующих научно-практических мероприятиях: XX Международной научно-практической конференции «Актуальные научные исследования» (г. Пенза, 2024 г.), конкурс-выставка научно-технических достижений студентов, аспирантов и молодых ученых ВГТУ (г. Воронеж, 2024 г.), заседаниях кафедры строительства и эксплуатации автомобильных дорог и конференциях профессорско-преподавательского состава ВГТУ (г. Воронеж, 2023-2024 гг.).

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждается сходимостью данных, полученных в результате лабораторных и производственных экспериментов, которые проводились с использованием современного оборудования, а также соответствием полученных опытных данных теоретическим научным положениям и предпосылкам.

Внедрение результатов

Результаты диссертационного исследования внедрены в производственную деятельность ООО «Дорожник», связанную с ремонтом дорожного покрытия

(автомобильная дорога Семилуки – Латное, Семилукский район Воронежской области в 2023 г.), а также в образовательный процесс ФГБОУ ВО «ВГТУ». Получены акты о внедрении (Приложение Г), свидетельство на секрет производства «Способ обеспечения инертной среды для замедления термоокислительного старения битумного вяжущего при производстве асфальтобетонных смесей» (Приложение В).

Лабораторные испытания проводились на базе ЦКП ВГТУ им. проф. Б.М. Борисова и научно-образовательной лаборатории «ДорНИИ ВГТУ» ВГТУ.

Личный вклад состоит в непосредственном участии во всех этапах диссертационного исследования, включая разработку методики исследования, постановку целей и задач, проведение лабораторных и опытно-производственных экспериментов, а также разработку инновационной технологии обработки асфальтобетонной смеси защитными газами и рекомендаций по ее применению.

Публикации

Основные результаты исследования опубликованы в 9 печатных работах, в том числе 5 опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 198 страницах, содержит 71 рисунок, 21 таблицу. Список литературы включает 147 наименования.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ БИТУМА И АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

1.1. Международная и отечественная практика производства и применения дорожных битумов

Мировой объем рынка битумного вяжущего составляет 113 миллионов тонн в год. Причем наблюдается постоянный рост потребления, прежде всего в дорожном строительстве. Главными потребителями являются страны Азиатско-Тихоокеанского региона и Северной Америки (62 % от всего объема). Крупнейшим поставщиком являются США (четверть мирового объема). Отечественная «Газпромнефть» с недавних лет стала стремиться занять свою долю рынка, в результате Российская Федерация вошла в мировую десятку экспортеров, отправляя за рубеж 10% от всего производимого в стране битумного вяжущего [93]. К сожалению, только эта десятая часть битума производится с учетом высоких зарубежных стандартов и даже по специальным рецептурам под конкретного заказчика. Тот битум, который остается в стране и направляется в качестве сырья для производства асфальтобетонной смеси, зачастую не соответствует не только иностранным требованиям, но даже отечественным ГОСТам.

Проанализируем ситуацию в России и в мире по качеству автодорожного покрытия, а также по производству и применению битума в дорожном строительстве. Прежде всего отметим, что российские нефтепромышленники оценивают динамику увеличения мощностей битумных терминалов с 0,7 млн тонн в 2010 году до 1,4 млн тонн в 2021 году, то есть вдвое, таким образом налицо бурный рост дорожного строительства, что вполне подтверждается статистическими данными: за последние 10 лет протяженность федеральных автодорог выросла на 0,3 млн. километров. К сожалению, показатели нормативного состояния выросли всего на 9%. На рисунке структура расходов из

средств федерального бюджета на содержание дорог. Простой анализ диаграммы на рис. 1.1. показывает, что из 738, 4 млрд руб., выделенных в 2020 году из бюджета на содержание дорог, 324 млрд. руб., то есть 44% израсходовано на ремонт уже существующей дорожной сети в то время, как на строительство новых дорог было потрачено всего лишь 17 %.

В 2021 году ситуация ухудшилась: расходы на ремонт выросли на 5%, а доля, потраченная на строительство новых дорожных покрытий, в общей структуре затрат не изменилась и составила так же чуть более 17% федерального бюджета на строительство, ремонт и содержание российских дорог силами компании «Росавтодор» [29, 30, 31]. Трансферы субъектам возросли, но если состояние федеральных трасс и дорог в Московской области можно оценить как хорошее, то дорожное покрытие в российских регионах хотя и постоянно ремонтируется, но все равно быстро разрушается. По нормативам асфальтобетонное покрытие должно служить 20 лет, но статистика показывает, что ремонт необходим уже через 5 лет. Для сравнения во многих странах этот показатель на практике составляет до 15 лет [122-127].



Рисунок 1.1 – Структура расходов из средств федерального бюджета на строительство, ремонт и содержание российских дорог силами компании «Росавтодор» за 2020-2021 гг., млрд руб.

Исследуем причины создавшейся ситуации с точки зрения технологических параметров и выявим узкие места производства. Прежде всего отметим, что битум применяется в 90% от общего объема промпроизводства асфальтобетонной смеси. Хотя доля битума в общей массе невелика (5-9% от общей массы готовой смеси), но именно битумное вяжущее отвечает за качество и долговечность покрытия, и при высоком качестве позволяет экономить не только сам битум, но и минеральную составляющую. Таким образом, можно сделать вывод, что даже незначительное изменение и внедрение новых технологий при производстве битума и асфальтобетонной смеси позволит сэкономить значительные средства федерального бюджета, расходуемые на ежегодный ремонт дорог.

Ситуация с дорогами и производством битума в нашей стране и за рубежом кардинально отличается по целому ряду причин. Прежде всего существует значительное отставание по мощностям производства дорожных битумов, которое, например, в 4 раза меньше, чем в США. Степень загруженности имеющихся производственных мощностей также вдвое ниже, чем в развитых странах.

Удельный вес потребления битумов в России в 7,2 раза меньше, чем в США и составляет всего 0,57 т/км². В целом, доля России в мировом производстве битумов составляет 7% от общего объема, по этому показателю мы находимся на 4 месте после США, Канады и Китая [77, 80, 134-137].

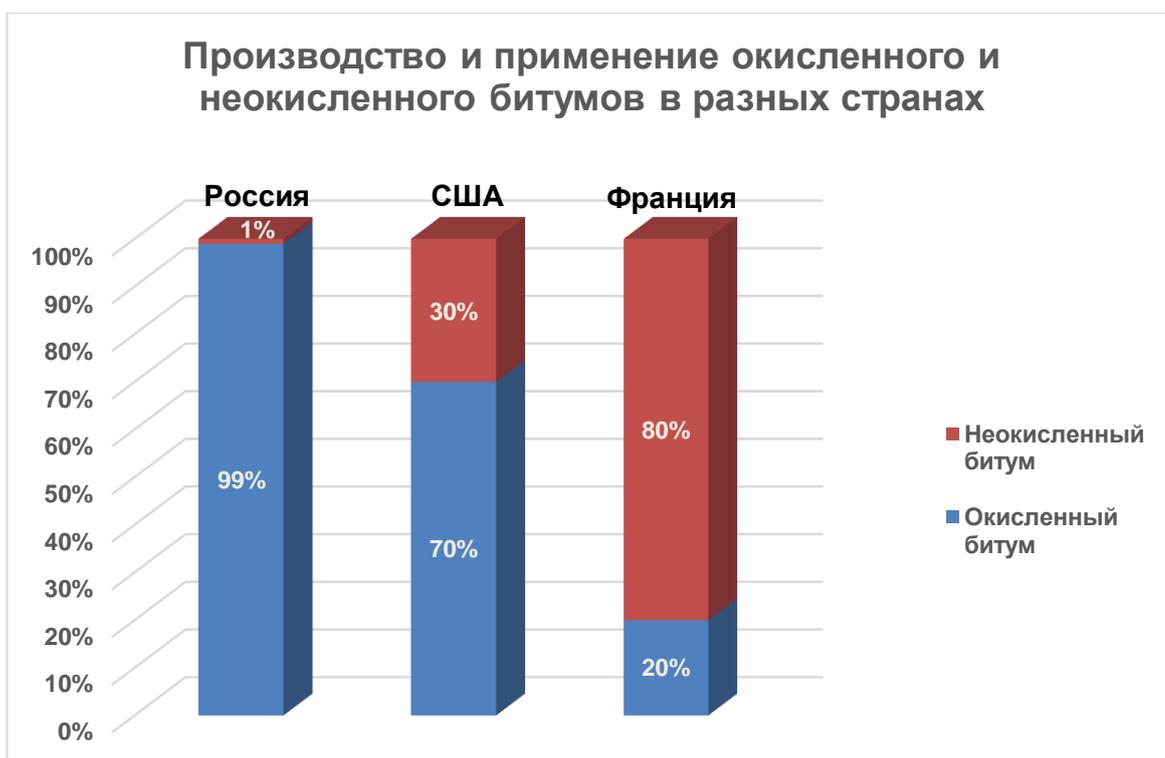


Рисунок 1.2 – Производство и применение окисленного и неокисленного битумов в разных странах.

Другое отличие связано с тем, что в развитых странах производится преимущественно неокисленный остаточный битум, вырабатываемый из тяжелых нефтей Венесуэлы, Колумбии или Ливии [130-133].

В России ситуация противоположна (рис. 1.2): для производства битума используются преимущественно западно-сибирские нефти, достаточно легкие, а само производство нефтеперерабатывающих заводов (далее – НПЗ) ориентировано на выпуск товарных светлых продуктов, то есть бензина и масел [89, 90].

С экономической точки зрения производителей это оправдано, так как битум по своей цене не сильно отличается от нефти, к тому же его транспортировка на большие расстояния крайне затратна. Таким образом, НПЗ невыгодно оборудовать свое производство системами охлаждения с целью снижения температуры битума до 150°C , что позволило бы улучшить его показатели. Однако ценой такого подхода является более низкое качество гудрона – основного битумного сырья, являющегося остатком сгонки нефти под

вакуумом [62]. Соответственно, хуже эксплуатационных показатели конечного асфальтобетонного покрытия дорог.

Кроме того, сама технология производства битума путем окисления нефтяных остатков весьма несовершенна. Многочисленные эксперименты показали, что дороги, выполненные на основе неокисленного битума, выдерживают большие нагрузки и более долговечны, чем те, где применялся традиционный для России окисленный битум. Причины этого заключаются в том, что хотя при окислении и появляются асфальтены – фракция, отвечающая за прочностные характеристики, но именно превращение смол в асфальтены приводят к ускоренному старению битума в процессе эксплуатации.

За рубежом исходный битум модифицируют природными битумами и асфальтитами. Наиболее известно асфальтовое озеро в Тринидаде, где более 100 лет добывают природный битум и асфальт [127]. Кроме того, добавляются албанские или иранские асфальтиты [130]. Подобная модификация очень существенно влияет на реологические характеристики вяжущего: в разы повышается устойчивость к деформациям, увеличивается прочность, снижается пористость. Особенно заметный практический эффект можно получить при производстве асфальтобетонных смесей, где доля вяжущего в смеси наибольшая. Строительство федеральных трасс, где нагрузка на дорожные одежды максимальна, с применением таких битумов было бы оправдано, так как затраты окупались за счет сокращения расходов на ремонт и уменьшения толщины покрытия. Запасы асфальтитов в России составляют около 4,5 млрд. тонн, однако практически не применяются, поскольку необходимо финансирование добычи и внедрения, поскольку введение природных модификаторов требует изменения технологии и более длительного перемешивания смеси [109].

В РФ месторождения асфальтитов были обнаружены попутно, при поиске месторождений нефти в р. Коми, Ивановской области. Запасы природных битумов на территории России составляют около 4,5 млрд. тонн и требуют отдельного финансирования для их целесообразной добычи.

Безусловно, подобные технологии приводят к удорожанию готовой асфальтобетонной смеси, требуют введения дополнительных модифицирующих добавок, однако даже в «Методических рекомендациях», выпущенных «Росавтодором», где предлагаются различные методы борьбы со старением битума, в качестве метода предотвращения окислительных процессов при производстве асфальтобетонных смесей предлагается введение безоксидных газов [118]. Кроме того, видные представители автодорожной отрасли считают, что введение модификаторов и изменение химсостава асфальтобетона не являются выходом из ситуации. Любая добавка может непредсказуемо изменить конечное качество асфальтобетонной смеси, что приведет к выбраковке всей партии.



Рисунок 1.3 – Соотношение качества выпускаемого в России битума

Еще одной точкой преткновения являются сами требования к битуму в России и за рубежом [82]. Климатические условия в нашей стране требуют акцентирования на прочностных и низкотемпературных характеристиках битума, в то время как в других странах важнейшей считается растяжимость этого материала [118]. Безусловно, нефтепромышленники постоянно развивают ГОСТы, идет большая научная работа, разработаны многочисленные технологии по улучшению эксплуатационных свойств битума и снижению скорости его старения.

Так, 01.09.2016 года был введен новый ГОСТ 33133-2014 «Битумы нефтяные дорожные вязкие», соответствие которому является преимущественным

требованием «Росавтодора» [10]. Однако анализ статистических данных говорит о том, что примерно 50% дорожного битума не соответствует требованиям данного ГОСТа (рис. 1.3).

Ярким примером успешных поисков выхода из ситуации является опыт и подход руководства нефтеперерабатывающего завода АО «ТАИФ-НК» (республика Татарстан), где успешно освоили производство полимерно-битумных вяжущих. Как заявил в своем интервью заместитель начальника Управления по нефтехимии и нефтепереработке данного НПЗ Марат Идрисов, обычный окисленный битум, производимый на предприятии, не обладает нужной эластичностью, быстро деформируется, поэтому на данном НПЗ активно производят полимерно-битумные вяжущие (далее – ПБВ). М. Идрисов отметил: «В окисленный битум добавляются бутадиен-стирольные каучуки, а также вакуумный газойль собственного производства, который служит в качестве пластификатора. Часть участка «Набережные Челны – Заинск – Альметьевск» была экспериментальная – из полимерно-битумного вяжущего марки ПБВ-60 по ГОСТ 52056-2003 производства ТАИФ-НК. И получается, вот уже 6 лет нет никакой колеи» [118]. Причем, как отмечает руководство НПЗ, добавляемые в битум полимеры выпускаются в Нижнекамске, а получаемый ПБВ обладает уникальными свойствами при небольшом росте цен. Объективно, с учетом сложных климатических условий в России подобное вяжущее идеально для производства отечественного асфальтобетона и, соответственно, российского дорожного строительства, но, к сожалению, производимые улучшенные продукты отправляются преимущественно на экспорт в Уругвай.

1.2. Основные способы получения битума, состав и факторы старения

Рассмотрим подробнее основные технологические способы получения нефтяных битумов. Их 3, и они представлены на рис. 1.4.



Рисунок 1.4 – Промышленные способы получения битума

1. Перегонка в вакууме нефтяных остатков (неокисленные битумы). Как уже говорилось, этот способ предполагает использование тяжелых высокосмолистых нефтей с высоким содержанием асфальтосмолистых веществ. Однако главная цель тут – получение качественных моторных масел, а не битума. В данной технологии происходит поэтапный нагрев нефти и ее остатков в печах – 1. Мазут образуется в ректификационной колонне – 2, откуда отводятся топливные дистилляты. Мазут разделяется в вакуумной колонне – 3 на гудрон и масляные дистилляты. Из нагретого гудрона в установке глубокого вакуума – 4 образуется битум (рис. 1.5) [83, 89].

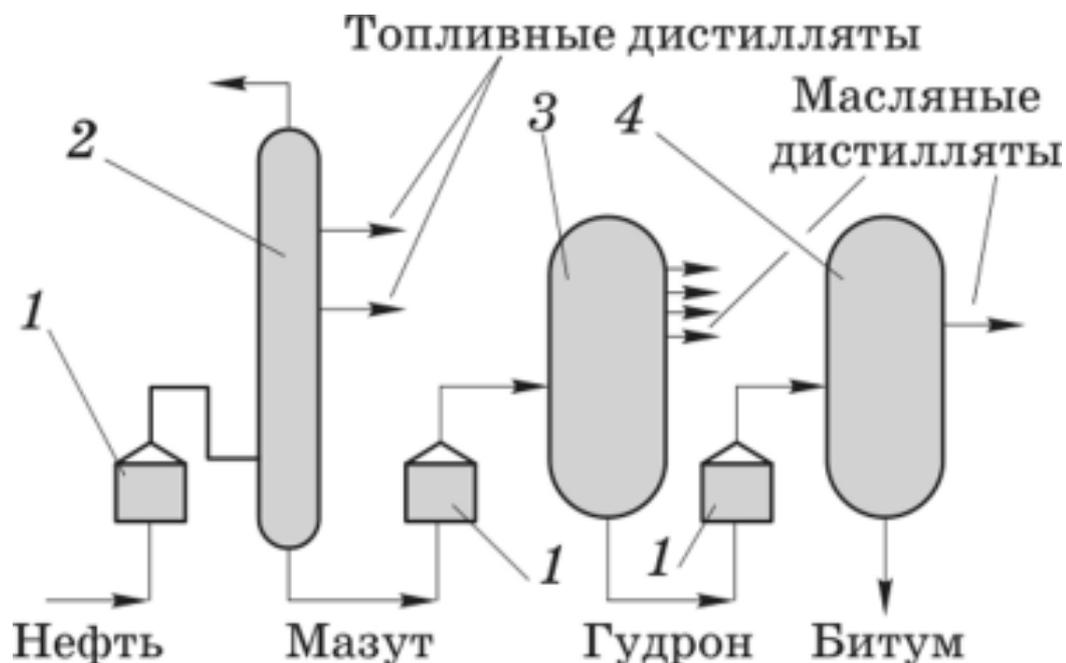


Рисунок 1.5 – Технологическая схема получения остаточного битума

2. Окисление нефтяных остатков кислородом воздуха при температуре 180 °С. Этот способ является основным при производстве битума и имеет целью увеличить содержание асфальтосмолистых веществ. Для чего гудрон окисляют кислородом воздуха. Для получения дорожного битума используют окислительные колонны. При этой технологии гудрон попадает в нагревательную печь – 1, а затем в реактор – 2, куда снизу подводится воздух. Результатом окисления гудрона воздушной смесью является гудрон и газы [79, 101].

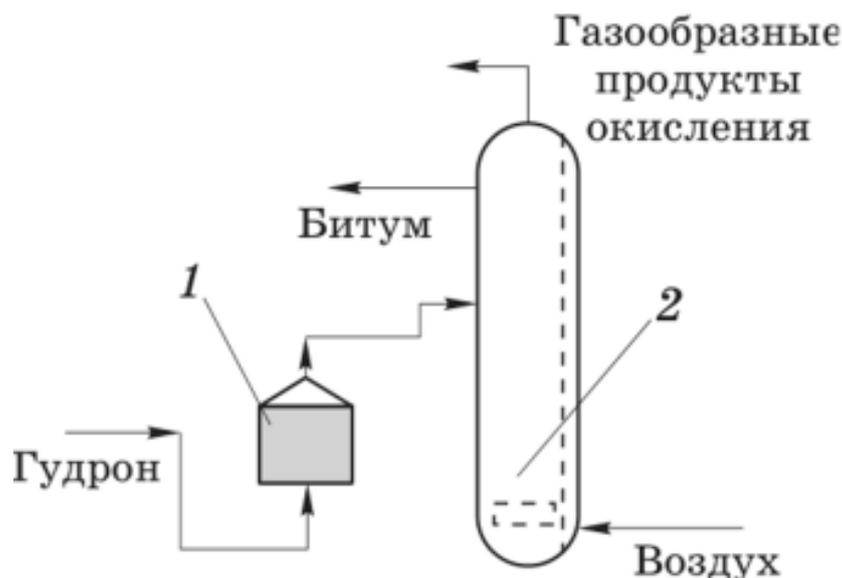


Рисунок 1.5 – Технологическая схема получения окисленного дорожного битума

3. Смешение окисленных и неокисленных битумов (компаудирование). Эта технология позволяет сократить объем газов окисления и с помощью регулирования состава выпускать конечную асфальтобетонную смесь улучшенного качества. Так по результатам экспериментов было установлено, что такой асфальтобетон более морозоустойчив, меньше трещинообразование, а срок эксплуатации более длительный [137-139].

Качество битума определяется прежде всего составом нефти, из которой он был произведен [113, 120, 121]. Классификация нефтей по их составу приведена на рис. 1.6.

Дорожный битум – это дисперсная система, где асфальтовая фаза распределена в дисперсной среде из масел и смол. Асфальтены – наиболее высокомолекулярные из компонентов нефти, плотные и тугоплавкие, отвечают за твердость и температурные свойства битума. Асфальтен отвечает за структурообразование битума в процессе его производства [64, 87].

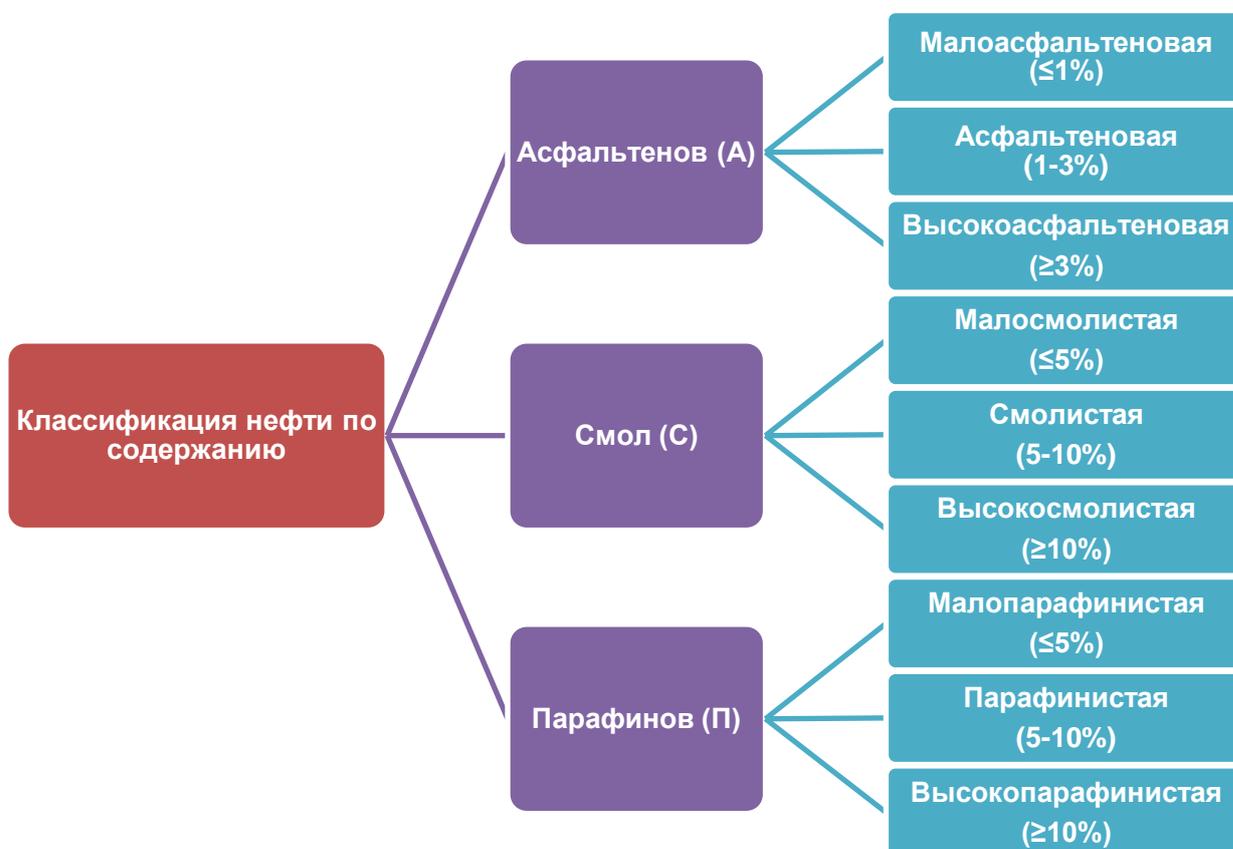


Рисунок 1.6 – Принятая классификация нефтей по их составу.

Смолы – вязкие, пластичные, растяжимые и легкоплавкие – определяют эластичность битумов. Кроме того, именно смолы определяют цементирующие свойства битума.

Жидкие и высококипящие масла определяют морозостойкость битумного вяжущего. Многие ученые считают, что осуществляется постепенный переход «масла → смолы → асфальтены» в процессе различных воздействий на углеводороды [117, 119]. Таким образом, смолы – это промежуточные вещества, которые нестабильны. Факторы, ускоряющие переход от смол к асфальтенам, ускоряют старение битума, что будет рассмотрено далее [106].



Рисунок 1.7 – Классификация битумов по составу

Таким образом, по своим структурно-реологическим типам битумы классифицируются на 3 типа (рис. 1.7):

1. I-й тип «гель», где асфальтеновые комплексы взаимодействуют и прочно соединены в жесткую сетку. Дисперсионная фаза значительно превышает дисперсионную среду. Неудовлетворительный по степени дисперсности окисленный битум можно отнести к типу «гель» [45].
2. II-й тип «золь», где асфальтены мало взаимодействуют между собой, поскольку разделены пленками дисперсионной среды. Примером таких материалов являются неокисленные остаточные битумы.
3. III-й тип «золь-гель» – это смешанный, переходный тип между I и II типами, в котором дисперсионная фаза меньше, чем в типе «гель», а дисперсионная среда больше, чем в типе «золь». К битумам такого типа

относится окисленный битум, преимущественно производимый в России.

Отметим, что недавно введенный ГОСТ 33134-2014 «Битумы нефтяные дорожные вязкие» хотя содержит новые технические требования к битумам, которые можно отнести к типу «золь-гель», но большинство выпускаемых битумов являются окисленными и соответствуют лишь типу «гель», то есть не отвечает ГОСТу по их качеству [8].

1.3. Старение битумов с точки зрения его состава и протекающих химических процессов

Очевидно, что процесс старения битума в асфальтобетоне заложен в его составе и основных свойствах.

Старение битума – это постепенное ухудшение его эксплуатационных характеристик под воздействием факторов внешней среды [69, 95, 98]. Длительные механические нагрузки, ультрафиолет, перепады температуры, воздействующие на дорожный асфальтобетон, приводят к необратимым изменениям битумного вяжущего и постепенному разрушению покрытия, снижению адгезии к минеральной части. Смолы являются неустойчивыми соединениями и постепенно превращаются в асфальтены, а те в свою очередь – в карбены. Битум подвергается дальнейшему неконтролируемому окислению окружающим воздухом [56, 57].

Теоретические данные говорят о том, что содержание асфальтенов в окисленных битумах должно быть в 3-4 выше, чем в остаточных, что в дальнейшем приводит к негативным последствиям. Для подтверждения этого были проведены практические исследования образцов битума, полученного из сверхвязкой нефти как остаточным, так и способом окисления гудрона. Далее проводились опыты по ГОСТ 33134-2014, которые позволили определить состав битумов. Результаты представлены на диаграмме (рис. 1.8). Как мы видим, содержание смол и масел, то есть дисперсной среды, гораздо ниже в окисленных битумах: количество смол сократилось в 1,4, а масел – в 1,3 раза, что

справедливо, поскольку смолы более подвержены окислению. Наконец, содержание асфальтовых комплексов возросло относительно исходного сырья в 4,5 раза, что соответствует теоретическим расчетам. Неокисленные битумы сохранили свою легкоплавкость и хорошие свойства растяжимости, поскольку дисперсная фаза асфальтенов увеличилась только в 2,6 раза, а количество обволакивающих смол и масел сократилось не так значительно, как после окисления воздухом, что позволяет сделать вывод о ключевой проблеме старения битума и, соответственно, асфальтобетона, состоящей в процессах окисления структурных компонентов битумного вяжущего.

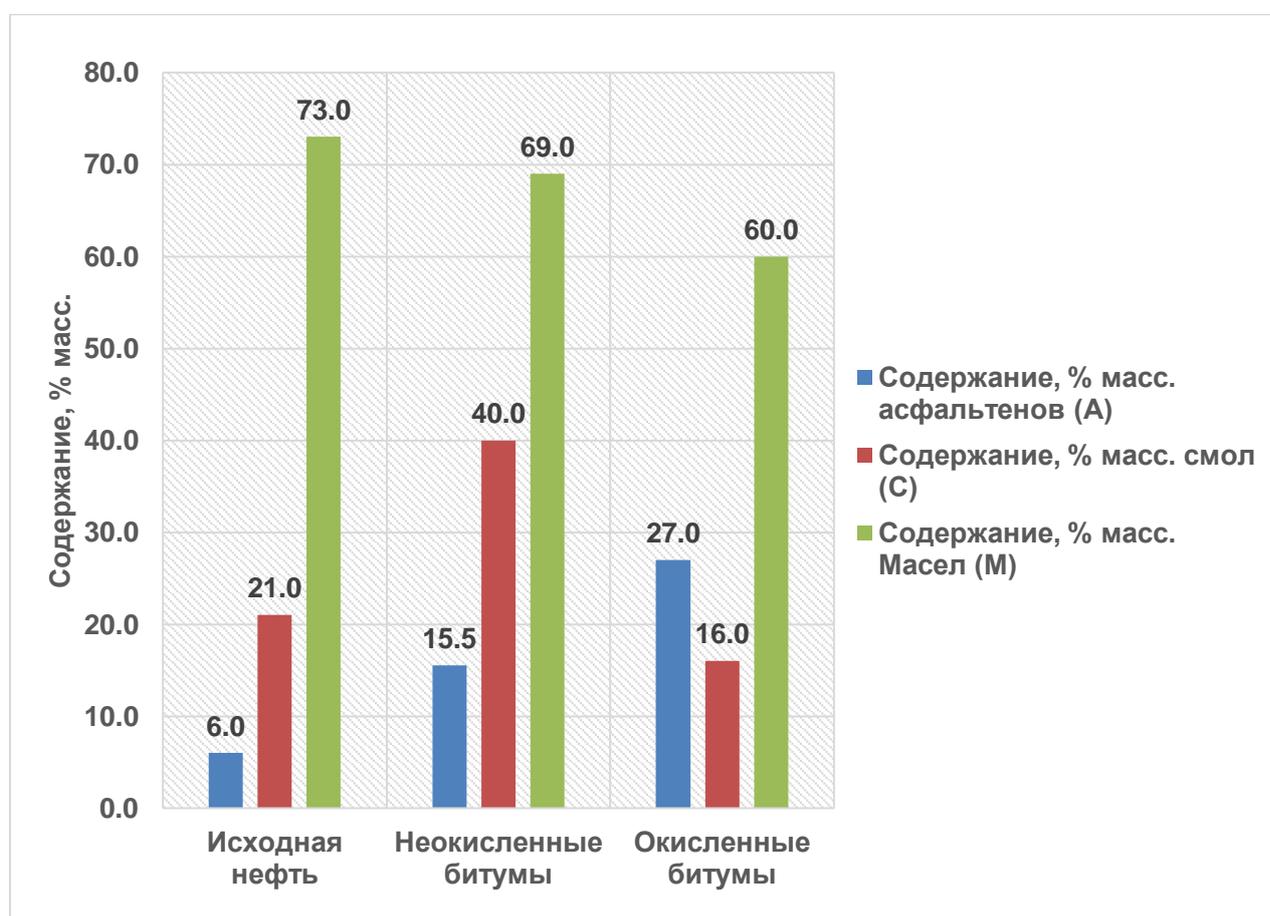


Рисунок 1.8 – Сравнительный состав нефти и битумов

С точки зрения физико-химических изменений, происходящих при старении битума, схему процесса старения можно представить в виде 3 стадий:



Рисунок 1.9 – Стадии процесса старения битума

Реакция первой стадии:



Реакция второй стадии:



Анализ протекающих реакций свидетельствует о том, что окисленный битум в силу своей повышенной кислотности способен более активно вступать в реакции с кислородом воздуха [63, 88, 105]. Это запускает цепную реакцию отрыва атома водорода, то есть дегидрирования с образованием активных перекисильных радикалов, активных центров $R \bullet$ и воды. Проблемой старения углеводородов нефти активно занимались уже в 50-х годах в Советском Союзе и определили, что окислительные процессы приводят к образованию вредных для асфальтобетона карбенов и других соединений, разрушительно сказывающихся на дорожном покрытии [36, 38]. Современные исследования подтверждают неуправляемую цепную реакцию в битуме, которая развивается постепенно от

поверхности вглубь примерно на 2 см в связи с проникновением кислорода в материал.

На диаграмме (рис.1.10) приведена степень влияния разных факторов внешней среды на старение битума в асфальтобетоне. Влиянием света тут можно пренебречь, так как световое излучение воздействует только на поверхностные пленки и не в значительной мере. Гораздо заметнее воздействие ультрафиолета, поскольку научно установлено, что это излучение разрушает асфальтобетонное покрытие со скоростью, сопоставимой с годичным влиянием света, а также ускоряет процессы окисления. Осадки, выпадающие на поверхность, замерзая или вымывая минеральную составляющую, оказывают механическое воздействие, способствующее увеличению пористости и старению. Перепады температур очень значительно влияют на дорожное покрытие, вызывая трещинообразование асфальтобетона. Наконец, окисление является основной причиной старения и на данный момент эта проблема не имеет принципиального решения.

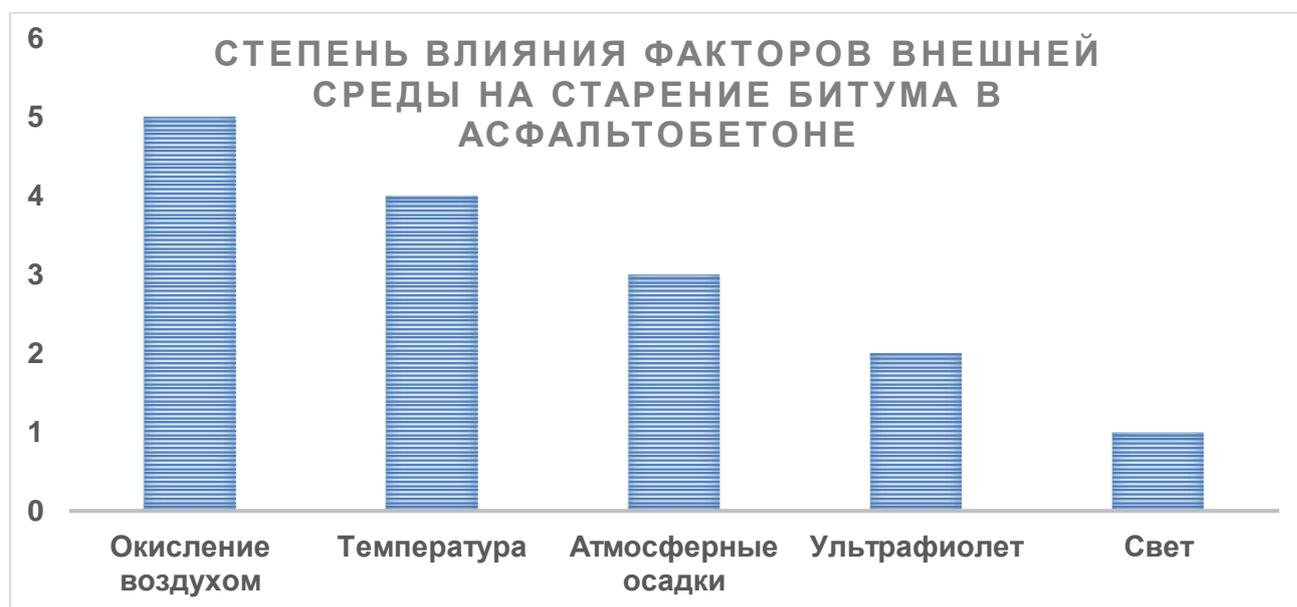


Рисунок 1.10 – Степень влияния разных факторов внешней среды на старение битума в асфальтобетоне

Для оценки степени старения битумного вяжущего используется так называемый индекс его старения [41]:

$$\text{Исб} = \text{Всб} / \text{Висх.б.}, \quad (1.6)$$

где Всб – вязкость вяжущего после старения,

Висх.б. – вязкость вяжущего в первоначальном состоянии.

1.4. Технология производства асфальтобетонной смеси и факторы старения битума на этапе приготовления асфальтобетонной смеси

Рассмотрим базовую технологию и принцип работы асфальтобетонного завода (далее – АБЗ).

Прежде всего опишем саму технологию приготовления асфальтобетонной смеси и определим, что существует 2 типа АБЗ – циклического и непрерывного действия [89]. Первые обычно размещаются в крупных городах и немобильны, зато такие АБЗ могут легко менять рецептуру, поскольку в состав такого завода входят специальные грохоты для фракционирования щебня, и компоненты асфальтобетонной смеси дозируются и смешиваются в смесительной башне. Заводы непрерывного действия мобильны, имеют более высокую производительность, зато всегда существует проблема проверки качества сырья, поскольку все составляющие в таких АБЗ смешиваются без дозирования. Процесс приготовления асфальтобетонной смеси может происходить холодным, теплым и горячим способом, которые различаются тем, что в первом и втором случае нагреву подвергается только битумное вяжущее, во второй, инновационной технологии теплого асфальтобетона (далее – ТАБ) готовая смесь имеет температуру на примерно 100 – 150 °С. В третьем случае – все нагретые компоненты смешиваются при 160 °С, и далее готовая смесь поступает в нагревательную камеру, где хранится при t до 180 °С. Основные этапы наиболее широко распространенной технологии приготовления асфальтобетонной смеси горячим способом представлены на рис. 1.11 [55].

Песок и щебень хранятся в преддозаторах и системой подачи холодного материала подаются в сушильный барабан, где разогреваются. С помощью

грохота – специального вибрационного агрегата – горячий минеральный материал разделяется на различные фракции, откуда они поступают в разные бункеры, а затем дозируются и взвешиваются. В производстве асфальтобетонной смеси используют минеральный порошок, который предназначен для повышения прочности, плотности и морозостойкости готовой смеси, а также в целях сокращения дорогостоящего битума [108].

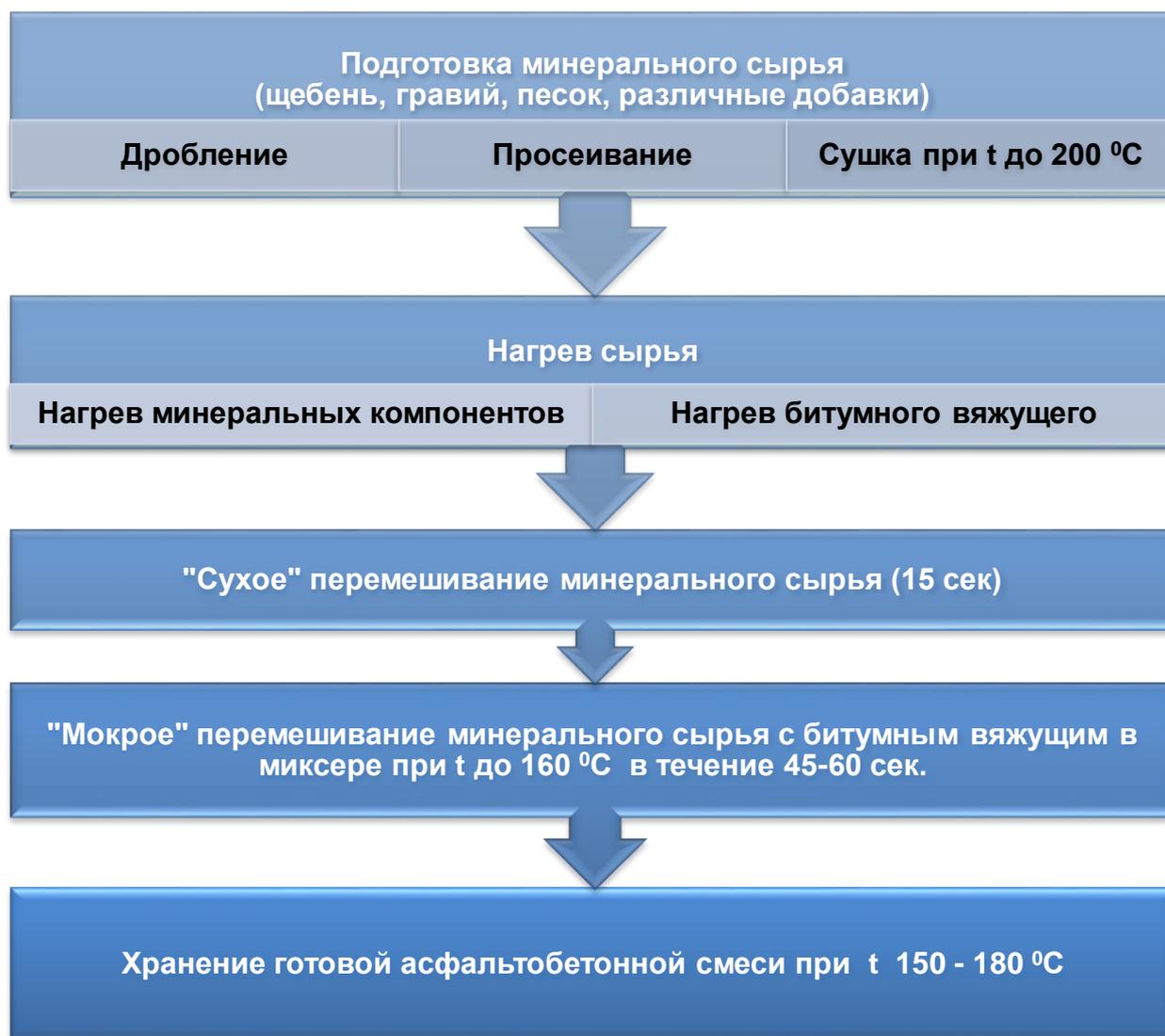


Рисунок 1.11 – Этапы производства асфальтобетонной смеси горячим способом

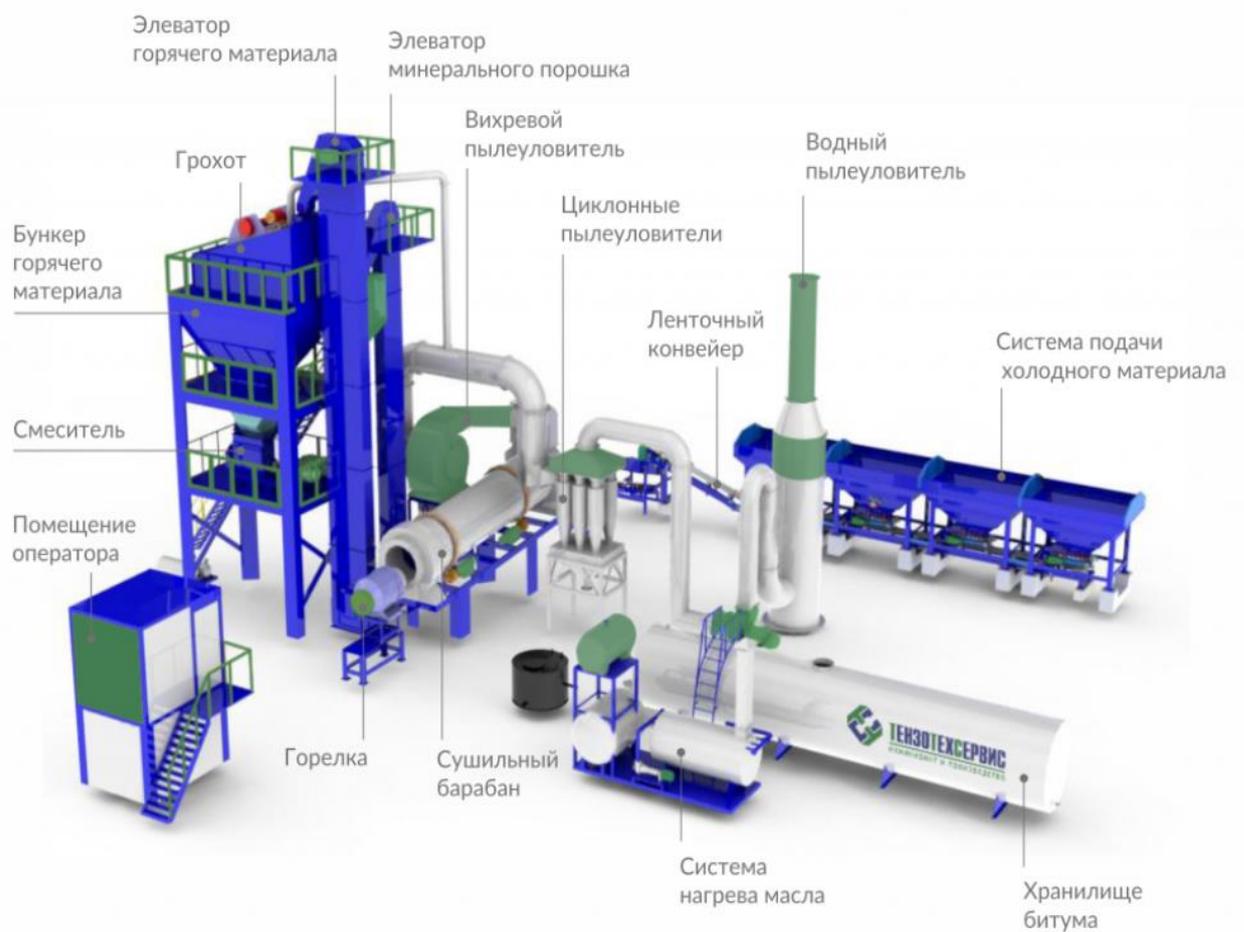


Рисунок 1.11 – Технологическая схема производства асфальтобетонной смеси горячим способом на АБЗ циклического типа



Рисунок 1.12 – Битумное хозяйство АБЗ

Минеральный порошок хранится в силосе (специальном хранилище), откуда поступает в смеситель-миксер, где смешивается с остальными минеральными фракциями, то есть осуществляется «сухое» перемешивание. Битумное хозяйство АБЗ (рис. 1.12) состоит из цистерн и специального нагревателя масляного типа. Битум разогревается постепенно для предотвращения старения вследствие перегрева, что предусматривают все современные конструкции битумных хозяйств. Нагретый битум при 180°C поступает в смеситель, где происходит «мокрое» смешивание. Под смесителем располагается площадка для въезда автомобиля-перевозчика, в чей кузов асфальтобетонная смесь выгружается либо непосредственно из смесителя, либо через бункер-накопитель в зависимости от комплектации АБЗ. Производство асфальтобетонной смеси крайне грязное, поэтому АБЗ комплектуются различными пылеуловителями [97].

Проанализируем различные факторы, влияющие на старение битума и, соответственно, асфальтобетонной смеси на этапе производства на АБЗ. Прежде всего отметим, что битумное вяжущее в асфальтобетонной смеси ведет себя почти так же, как в свободном состоянии, но есть некоторые отличия: молекулы битума, находясь в смеси с минеральным наполнителем, гораздо менее подвижны, что снижает способность вяжущего реагировать с химическими веществами.

Несмотря на то, что окисление битума в процессе его производства, влияет на старение, тем не менее различная термообработка и смешивание с минеральными материалами в процессе приготовления асфальтобетонной смеси оказывают гораздо более заметное влияние на процесс старения. Более того, экспериментальные данные, полученные компанией Shell Bitumen U.K., показывают, что если разложить весь процесс на 3 этапа, то основную роль в старении битума играет именно этап приготовления асфальтобетонной смеси, что доказано наибольшим изменением старения битума именно на этом этапе, тогда как на протяжении 8 лет эксплуатации индекс вырос лишь на единицу (рис. 1.13) [128].

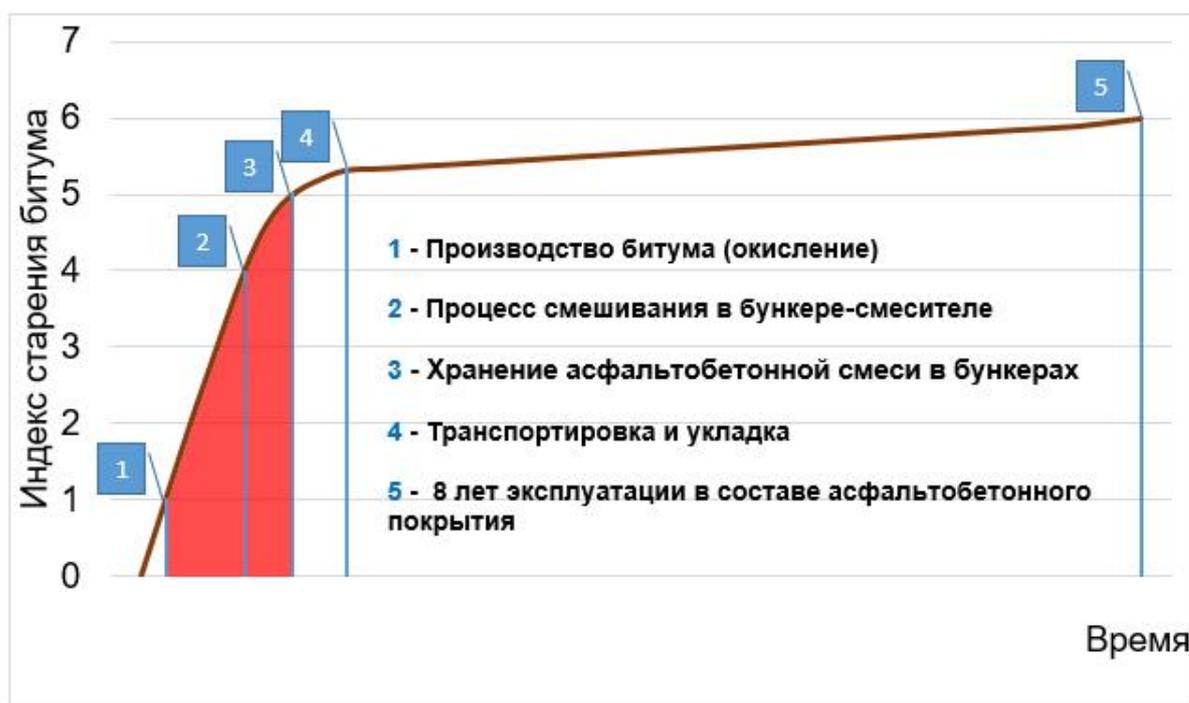


Рисунок 1.13 – Рост индекса старения битума на разных этапах производства

Перечислим основные факторы, влияющие на старение битума в процессе приготовления смеси [33, 35, 40].

1. Марка и изначальное качество битума. Очевидно, что чем выше первоначальное качество битума, тем медленнее он стареет. Поскольку при производстве асфальтобетонной смеси массово используют окисленный битум типа «золь-гель», как уже говорилось, то жесткие пространственные структуры имеются изначально. Можно сказать, что еще до начала производственного цикла старение уже идет.

2. Температурный режим и продолжительность нагрева. Для оценки дисперсности битума используют индекс дисперсности или иначе коллоидный индекс, определяемый по формуле:

$$I_{cs} = (C + AУВ) / A + НУВ, \quad (1.7)$$

где С – смолы,

АУВ – ароматические углеводороды,

А – асфальтены,

НУВ – насыщенные углеводороды.

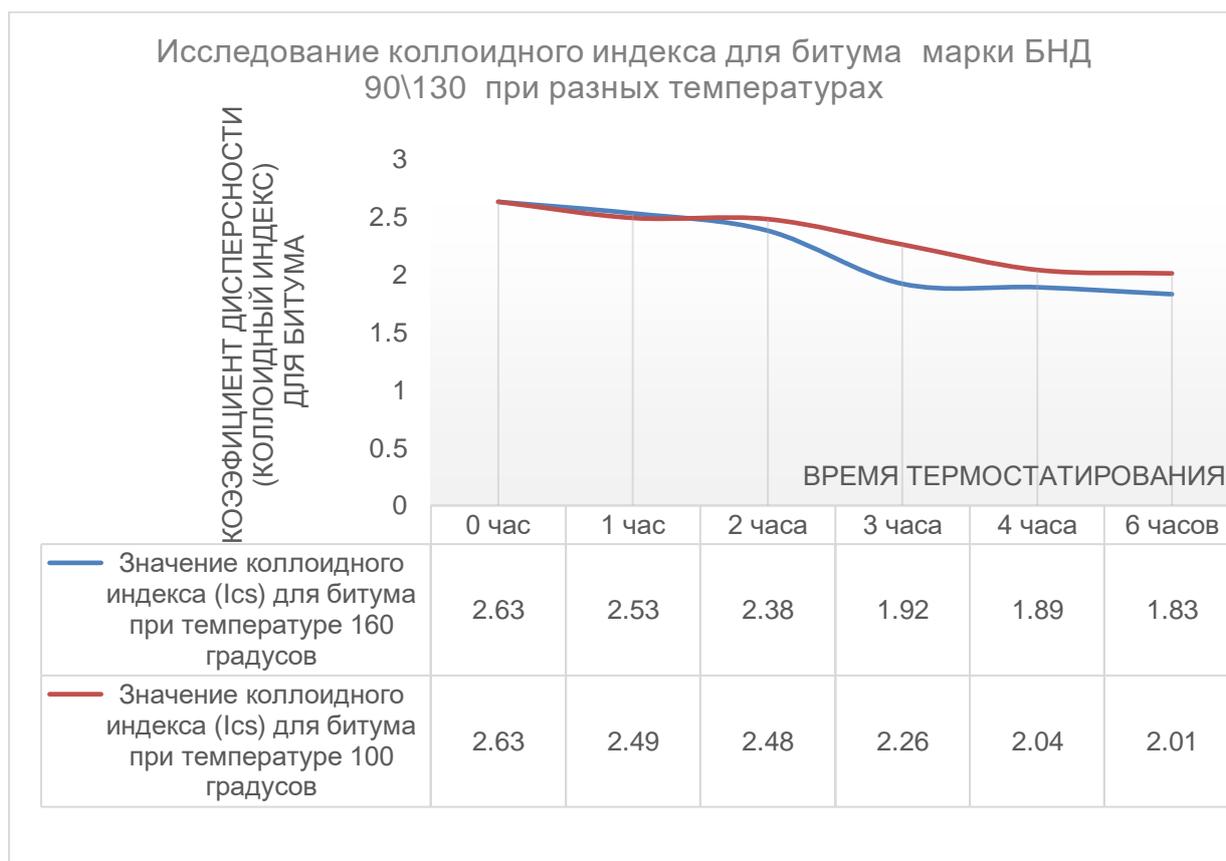


Рисунок 1.14 – Изменение индекса дисперсности битума при разных температурах

Для наглядного отображения влияния температурных режимов проводились опыты с битумом марки БНД 90/130 (битум нефтяной дорожный с интервалом допускаемого изменения твердости от 90 до 130).

Битум распределялся по минеральной основе и нагревался при разных температурах в течение 6 часов с целью определения изменений в его составе. Была выявлена четкая закономерность между ростом и продолжительностью нагрева битума и уменьшением дисперсной среды, что выразалось в снижении индекса дисперсности. Причем, чем выше была температура, тем сильнее было снижение дисперсности. Росли асфальтено-смолистые компоненты, и снижался объем масел – дисперсионной среды. Наглядно это отражено на диаграммах (рис. 1.14, 1.15).

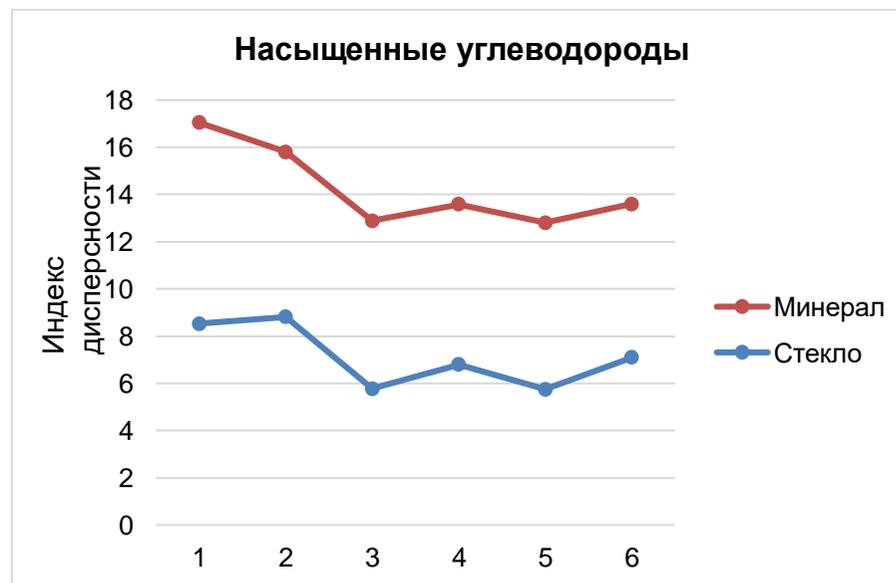
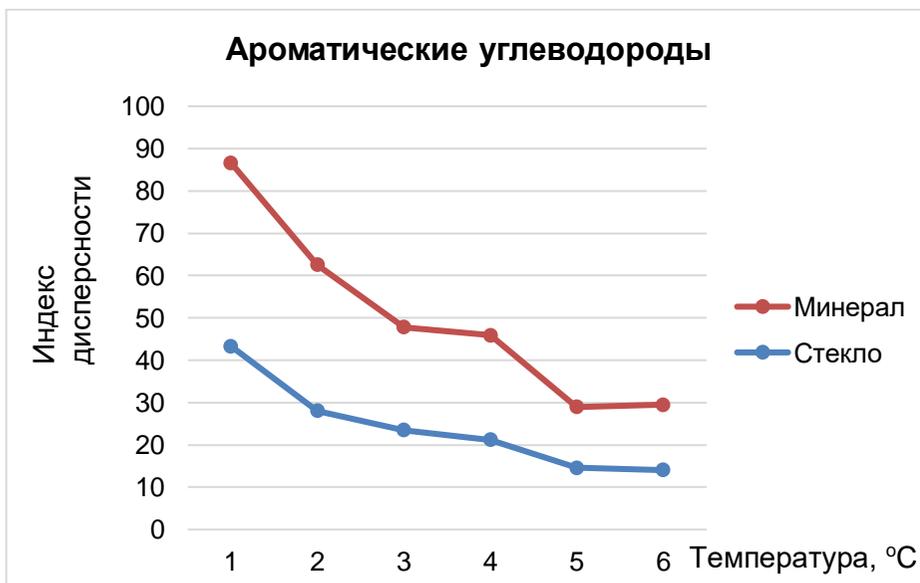
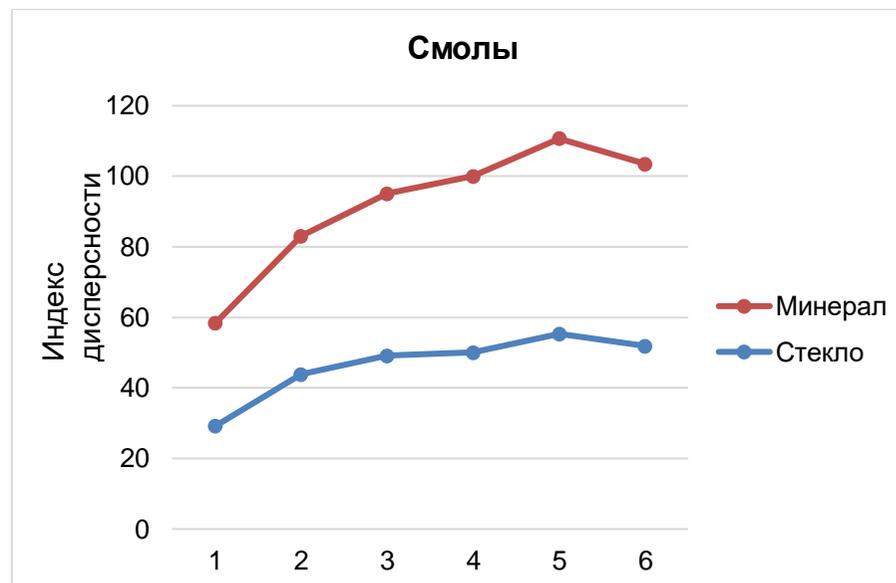
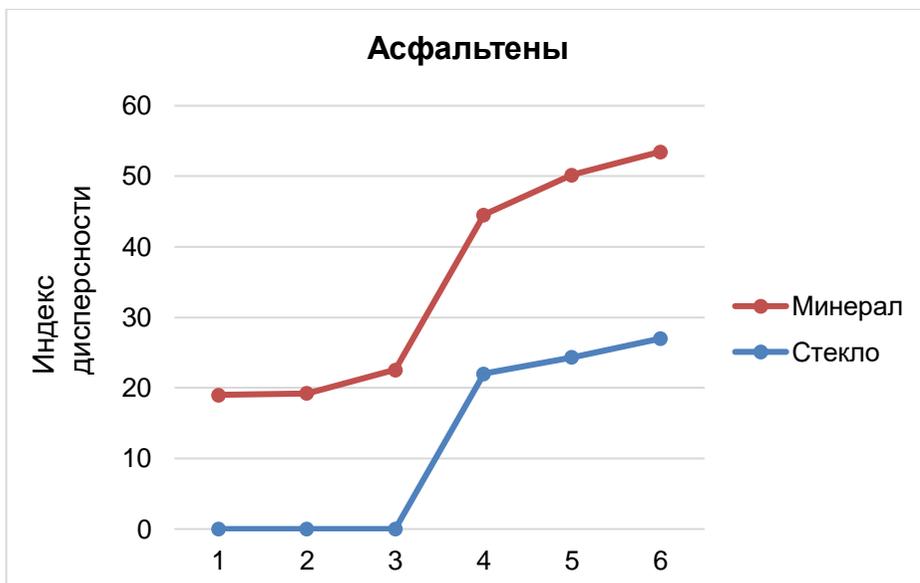


Рисунок 1.15 – Изменение группового химического состава битума при нагревании на разных основах

Кроме того, уменьшение индекса стало наиболее заметным после 3 часов нагрева, что соответствует среднему времени производства асфальтобетона и технологических процессов, с этим связанных. Можно сделать вывод, что дисперсность битума обратно пропорциональна продолжительности и температуре нагрева вяжущего [60-62].

Также надо учитывать, что готовая асфальтобетонная смесь может храниться в бункерах-накопителях при высокой температуре некоторое время. Хранение и перевозка к конечному месту укладки осуществляется на открытом воздухе в горячем виде. Следовательно, при этом происходят дальнейшие неуправляемые изменения компонентного состава битумного вяжущего.

3. Вид минерального материала. На рисунке 1.15 показано, что при нанесении битума на нейтральную основу (стекло) и на минеральную основу изменение компонентного состава было выше для минеральной основы, то есть для обычного наполнителя асфальтобетонной смеси.

4. Окисление при перемешивании, хранении и укладке. В смесителе битум при очень высокой температуре оказывается на поверхности минеральных составляющих. С одной стороны, еще Л.Б. Гезенцевой доказал важность тщательного перемешивания компонентов асфальтобетонной смеси, причем в его работах отмечается, что увеличение времени перемешивания и, соответственно, однородности дает экономию вяжущего до 15% [34]. С другой стороны, нельзя забывать, что чем дольше происходит этот процесс, тем сильнее мы подвергаем битум риску изменения компонентного состава, поскольку вяжущее перемешивается с другими компонентами асфальтобетонной смеси при свободном доступе воздуха и высокой температуре. Это идеальные условия для дальнейшего окисления вяжущего, и можно предполагать, что именно данное окисление является гораздо более значительным, чем окисление в процессе исходного приготовления битума.

5. Нагрев в пленках. Нагрев битума на первом этапе производства асфальтобетонной смеси осуществляется в объеме, а после попадания в смеситель битум перемешивается с минеральными компонентами и распределяется по

поверхности наполнителя. В этот момент осуществляется нагрев битума в тонких пленках, который приводит к гораздо большему старению вяжущего, чем при первоначальном нагреве в битумном хозяйстве.

4. Фильтрационный эффект.

При перемешивании компонентов может возникнуть так называемый фильтрационный эффект, при котором молекулы битума попадают в поры минеральных компонентов. Масла и смолы проникают внутрь, битум разделяется на фракции. Асфальтены отделяются, что увеличивает хрупкость готовой асфальтобетонной смеси в будущем [92].

5. Усадка смеси. Этот процесс негативно сказывается на битуме, потому что на этапе перемешивания смесь уплотняется, затем при выгрузке расширяется, при укладке снова уплотняется. Битумное вяжущее то склеивается с минеральным компонентом, то частично отделяется. При этом неизбежно возникновение микротрещин в результате упругости материала и разности температур.

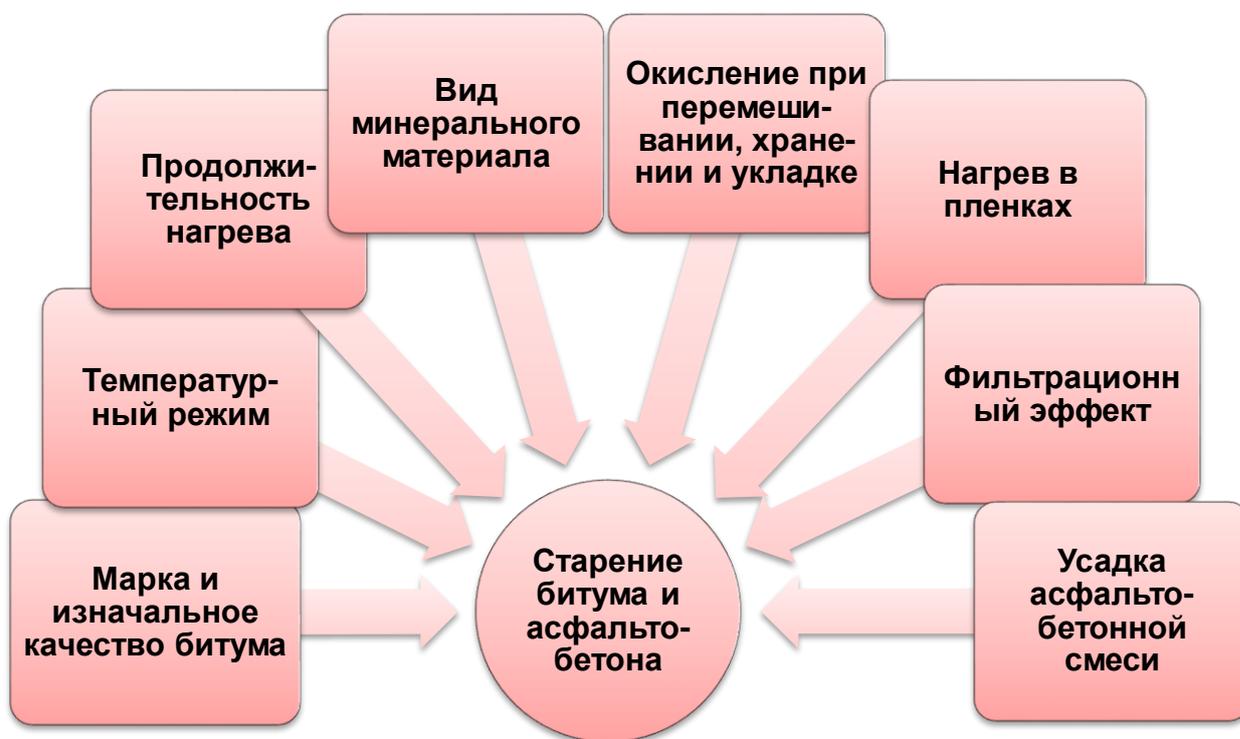


Рисунок 1.16 – Факторы старения битума на этапе производства асфальтобетона

Таким образом, можно говорить о проблеме окисления битумного вяжущего, как о вопросе термоокисления, причем, именно контакт с кислородом инициирует процесс старения [68, 84]. Были исследованы различные существующие способы решения проблемы старения и определили, что одним из перспективных путей устранения данной проблемы является введение защитного газа в смеситель, что позволит остановить процессы окисления даже в нагретой дисперсии.

Известно, что М.В. Витчак [147] провел теоретическое исследование краткосрочных и долгосрочных прогнозов старения битумного вяжущего. Под воздействием высокой температуры и процессов окисления в оборудовании битум необратимо изменяет свой химический и групповой состав, что, в свою очередь, ухудшает структуру, адгезию, когезию и реологические свойства вяжущего в асфальтобетонном слое дорожного покрытия. Исходные и уточненные математические модели (уравнения регрессии) данного автора показали, что температура битума, вязкость и его эффективное содержание в смеси, которое зависит от погрешностей дозирования битума, оказывают влияние на динамический модуль упругости. Критической температурой указывается 180°C. Оптимальной температурой предлагает 165±5°C, что и примем в качестве пределов.

Коэффициент диффузии и реакционная способность кислорода в битума описаны в работе Дж. Хуха и Р. Робертсона [145].

Вопросы определения среднеобъемной концентрации кислорода для i -го момента времени исходя из его материального баланса в смесителе в процессе инертизации рассматривались в работе А.А. Корнилова [143].

В работе А.А. Калюжного [142] для смесителя (аппарат идеального смешения) известно, что независимо от вида функции распределения среднее время пребывания смеси, то есть продолжительность 1 замеса в аппарате равно отношению объема материала в смесителе к расходу материала на выходе:

$$\Delta\tau = V^p / V^{cm} \quad (1.8)$$

где V^p – объем емкости, м³, V^{cm} – расход смеси на выходе аппарата, м³/ч.

В работе В.В. Булгакова [140] описывалась динамика среднеобъемных концентраций кислорода в емкости. Вопросы термодинамического равновесия между газовой фракцией и асфальтобетонной смесью исследовал М.А. Михеев [14].

В.П. Денисов [141] изучал вязкость битумного вяжущего при различных температурах.

1.5. Обзор способов предотвращения старения битумов

Проблема старения битума волнует ученых с тех пор, как битум стал использоваться в строительстве, тем более, в массовом строительстве дорог. Существует множество различных инновационных способов решения данной проблемы [66, 81, 99, 97, 102, 103, 112, 115].

Например, в качестве вещества, замедляющего данный негативный процесс, используется минеральный порошок. Вещество должно быть достаточно плотным, чтобы остановить процесс окисления. Однако, нужно отметить, что если была нарушена технология, порошок плохо высушен, влажный, то он будет комковаться, плохо перемешиваться с вяжущим. В результате, старение только ускорится.

Еще 50 лет назад Л.М. Гохман проводил исследования термопластов, которые могут улучшать свойства. В своей диссертационной работе он отмечал, что для того, чтобы увеличить способность битума к эластичности, нужно его модифицировать путем введения в него различных полимеров [89]. Такие полимерные добавки активно применяются в дорожном строительстве. Широко распространены различные пластификаторы, позволяющие создавать полимерно-битумные вяжущие (далее – ПБВ) на основе стандартных БНД. Также при производстве асфальтобетонной смеси вместе с минеральными компонентами можно добавить различные каучуки: резиновая крошка позволяет создать асфальтобетон очень высокого качества. В одном из интервью опытом

применения ПБВ поделился генеральный директор компании «Газпромнефть-Битумные материалы» Дмитрий Орлов, в котором рассказал про обустройство одной из трасс Алтая: стоимость 1 км трассы с помощью ПБВ увеличилась на 9%, хотя срок эксплуатации такой трассы должен достичь 12 лет, а экономия на ее ремонт – 32%. Также он указал общую цифру применения ПБВ при строительстве российских дорог – всего 4% при 15% в КНР и США. То есть в российских реалиях существует сложность внедрения новых технологий: дорожники и АБЗ неохотно экспериментируют при производстве асфальтобетонной смеси [136].

Таким образом, безусловно, модифицированные битумы продлевают жизненный цикл асфальтобетонных дорожных покрытий, но стоимость ПБВ относительно традиционного БНД выше.

Также есть варианты применения антиоксидантов (например, «НАФТАМ-2»), которые также могут быть эффективны, но все-таки, очевидно, что любые химические добавки, которые вешивают в асфальтобетонную смесь, могут испортить его, привести к любым, самым непредсказуемым последствиям. Зато доказано, что если в перемешиваемую смесь добавить воды и произвести вспенивание, то с химической точки зрения никаких отрицательных эффектов не будет, зато подобная инновация ингибирует окислительный процесс [65, 66, 85]. Это активно применяется в технологии производства теплого асфальтобетона (ТАБ) (с пониженной температурой производства 100–150⁰С), которая разрабатывалась еще в СССР. К сожалению, научные разработки в этом направлении были оставлены, зато закрепились в Соединенных Штатах, где теплая асфальтобетонная смесь давно и активно применяется. В нашей стране данная технология тоже распространена. Поскольку термостатирование происходит при более низких температурах, это также позволяет замедлить старение. Анализ российского опыта применения теплой асфальтобетонной смеси позволяет сделать вывод, что такая смесь более удобоукладываема, лучше уплотняется, отмечается небольшая экономия битумного вяжущего и энергоресурсов (щебень и песок нагревают до меньших температур, чем при производстве горячей асфальтобетонной смеси). Можно проводить укладку при

более низких температурах.

Наконец, крайне важную мысль высказал президент ассоциации «Росасфальт» Николай Быстров на одной из российских научных конференций, отметив, что при технологии ТАБ не меняется и никак не затрагивается химический состав смеси, что принципиально важно, то есть внедрение ПБВ затрагивает химсостав и значительно увеличивает стоимость смеси, в то время как ТАБ позволяет экономить на стадии не только эксплуатации, но и производства, не изменяя химическую основу [139].

С этим мнением необходимо согласиться и опираться именно на такой подход к решению проблемы старения.

Кроме того, нужно отметить, что очень интересным и достаточно полным документом являются ОДМ 218.03.20-2012 – методические рекомендации по обеспечению устойчивости битумов против старения при производстве асфальтобетонной смеси [26-28]. В данном документе указываются рекомендуемые режимы термостатирования, а также различные пути предотвращения окислительных процессов. В частности, предлагается сократить время хранения битума в бункерах-накопителях, максимально наполнять их смесью для вытеснения воздуха, а также подавать различные газы, не содержащие кислорода для заполнения объема. Данная мысль стала предпосылкой для формулирования теоретической идеи о том, что подобный газ можно подавать и в смеситель на этапе смешивания компонентов. Кроме того, газ может выполнять не только функцию вытеснения воздуха, но роль ингибитора окислительных реакций.

1.6. Выводы по Главе 1

На основании сказанного в Главе 1 можно сделать следующие выводы:

1. За рубежом в дорожных одеждах применяется преимущественно неокисленный битум. С учетом российских реалий переход на не окисленные битумы затруднен, поэтому в работе теоретически обосновано, что инновации должны касаться совершенствования технологии производства асфальтобетонной смеси на базе окисленных битумов.

2. Окисленный битум относится к реологическому типу «золь-гель», состарившийся – к типу «гель».

3. Проблема старения битума заложена на начальном этапе его производства.

4. Старение битума обусловлено его составом, технологическими режимами производства асфальтобетонной смеси и условиями дальнейшей эксплуатации асфальтобетонного покрытия.

5. Суть старения битумного вяжущего заключается в окислении, то есть поэтапном дегидрировании и превращении масел в смолы, а смол – в асфальтены и так далее с последующей усадкой и разрушением структур асфальтобетонного покрытия.

6. Классическим показателем старения являются индексы пенетрации и дисперсности, причем дисперсность битума обратно пропорциональна продолжительности и температуре нагрева вяжущего.

7. Скорость старения (термоокисления) вяжущего является максимальной на этапе производстве асфальтобетонной смеси, поскольку технология предполагает длительный нагрев и контакт с открытым кислородом воздуха.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ДОРОЖНЫХ БИТУМОВ В РАЗЛИЧНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕДАХ

2.1. Теоретическое обоснование применения защитных газов для замедления термоокислительных реакций в битумном вяжущем

Еще Бахрах Г.С. в своих работах отмечал, что, говоря о термоокислении битума, нужно прежде всего оценивать воздуходоступность битума, то есть то, в каком объеме и как интенсивно поступает свободный кислород к тонким пленкам битума, распределенным по минеральной составляющей [78]. И если в бункере хранения для окисления доступен только верхний слой вяжущего, то при перемешивании весь объем битума окисляется не в объеме, а именно в тонких пленках (50 мкм), что вызывает усиленное образование асфальтенов.

Таким образом, решать задачу снижения воздействия окисления воздухом при смешивании и хранении смеси нужно именно с точки зрения доступности воздуха к смеси.

Известно, что при добыче нефти и газа широко применяются различные защитные газы, которые не вступают в реакцию с другими смесями, вытесняют воздух, препятствуют окислительным процессам, являются пожаробезопасными. Так, азот, не относящийся к основной группе инертных газов, но обладающий инертными свойствами, применяется для инертизации трубопроводов. Это необходимо для тщательной прочистки стенок конструкции, где проходит газ/нефть. Процесс инертизации производится с целью удаления кислорода, влаги, а также для создания защитной атмосферы.

Инертизация трубопровода происходит следующим образом. Линия проведения защитного газа (азота) подсоединяется к колонне с трубами через специальные вентили или задвижки с использованием съемных частей или гибких шлангов. Таким образом азот проходит через трубы и попадает в систему щелочной очистки или в используемый для очистки абсорбер.

В тех же целях широко применяют и активный углекислый газ. И азот, и углекислый газ относят к защитным.

При отборе защитного газа из баллонов и газификаторов с понижением давления с помощью регулятора необходимо учитывать адиабатическое охлаждение сжиженного газа. При высокой скорости потока газа через регулятор давления из-за недостаточного подвода теплоты из атмосферы углекислота начинает охлаждаться, лед «забивает» механизм регулятора давления. Отбор газа прекращается. Для устранения этого эффекта необходимо принудительно подогревать газ перед входом в регулятор давления. Однако этот способ подходит для обычного применения защитного газа.

В случае с процессами, происходящими на АБЗ, то есть смешивании при высоких температурах, нужно учитывать, что газ в данном случае нельзя подавать полностью по аналогии с продувкой газопроводов, поскольку здесь необходимо не только испарение сжиженного газа, но и нагрев до рабочей температуры в бункерах.

В промышленности азот получают из кислорода воздуха, а углекислый газ - из печных (дымовых) газов, а также при разложении природных карбонатов (известняк, доломит). Смесь полученных газов, промывают раствором карбоната калия, который поглощает углекислый газ, переходя в гидрокарбонат. Раствор гидрокарбоната при нагревании или при пониженном давлении разлагается, высвобождая углекислоту. Применительно к инертизации окислительных процессов в бункерах на АБЗ безусловно можно рассматривать оба варианта получения этих газов, однако главной проблемой является экспериментальное подтверждение научной гипотезы о возможности замедления термоокисления битумного вяжущего при производстве асфальтобетонной смеси путем обработки защитными газами.

2.2. Алгоритм проведения исследований при изучении закономерностей термоокислительного старения нефтяных дорожных битумов в кислородосодержащей и инертной среде

На основании теоретической гипотезы, изложенной в п. 2.1, веществом, вытесняющим воздух, были выбраны азот (в смесителе) и углекислота (в бункерах хранения).

Хотя продолжительность термоокисления в смесителе и в бункерах хранения значительно отличается по времени, но сама степень воздействия кислорода на битум в миксере значительно выше, а интенсивность – в разы больше [92]. Поэтому время подачи защитных газов было условно разделено: подача азота в условиях лабораторных испытаний – 1 час минут, углекислоты – 25 мин.

Требовалось имитировать процесс, происходящий на АБЗ при реальном производстве асфальтобетонных смесей, в лабораторных условиях, провести опыты и сравнить результаты искусственного состаривания битума по ГОСТ и состаривания в присутствии инертной среды, определить и сравнить все базовые показатели, оценить степень изменения пенетрации, реологических характеристик и других характерных закономерностей.

С целью выявления влияния был составлен алгоритм проведения исследований, разбитый на 7 этапов (рис. 2.1).

1. РАЗРАБОТКА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

На данном этапе формировались уравнения зависимостей технологических процессов, определялись входные и выходные параметры модели, оптимизировались показатели для дальнейшего проведения лабораторных и производственных экспериментов.

2. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ.

2.1. Исследования исходного битума.

Для изучения термоокислительного старения исследовался вязкий битум БНД 60/90, который является одним из самых распространенных вяжущих в

дорожном покрытии, а также образцы асфальтобетонной смеси, приготовленной в лабораторных условиях из ускоренно состаренного битума.

Прежде всего были исследованы образцы исходного битума, и для них определялись базовые показатели, которые в дальнейшем использовались для сравнения с характеристиками состаренного в различных условиях.

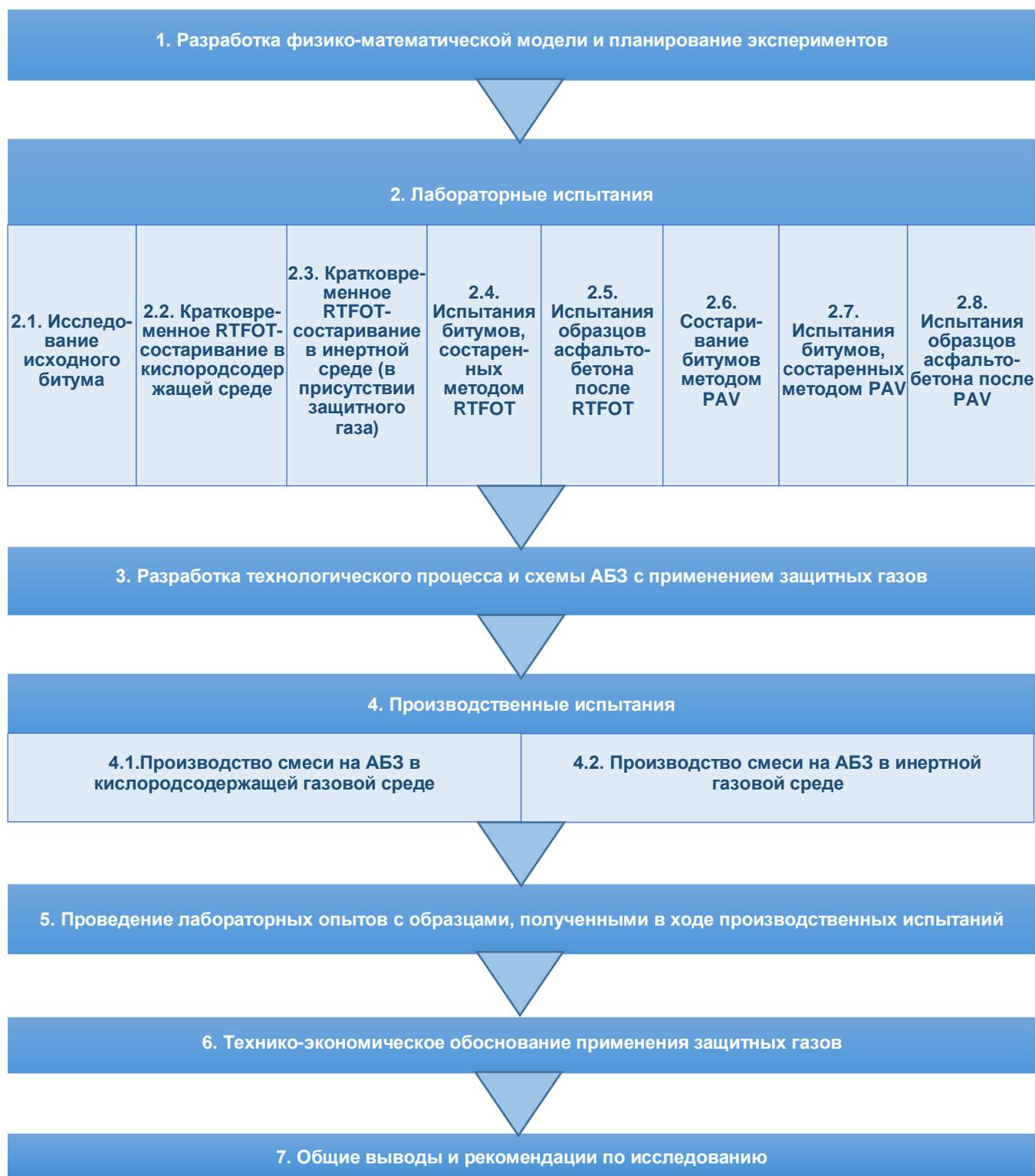


Рисунок 2.1 – Алгоритм проведения исследований

2.2.Кратковременное RTFOT-состаривание в кислородсодержащей среде.

Проводилось состаривание по методу RTFOT для имитации прокатки тонких пленок, то есть ускоренного старения битума при смешивании асфальтобетонной смеси в миксере. Опыты выполнялись стандартным методом.

2.3.Кратковременное RTFOT-состаривание в инертной среде (в присутствии защитного газа).

При первом, кратковременном RTFOT-состаривании в испытательную печь InfraTest с помощью компрессора, подающий воздух при стандартном методе, подавался азот – в течение часа, а в конце эксперимента – углекислый газ (в течение 25 минут) (рис. 2.2). Определялись показатели.

2.4.Испытания битумов, состаренных методом RTFOT.

Далее проводились запланированные исследования битума, состаренного в кислородсодержащей и инертной средах методом RTFOT. Анализировалось влияние газовых сред на термоокисление битума при замешивании асфальтобетонной смеси, делались выводы.



Рис. 2.2 – Испытательная печь RTFOT InfraTest 20-25720

и баллоны с азотом и углекислотой

2.5.Испытания образцов асфальтобетона, приготовленного на основе

битумов, состаренных в разных газовых средах (после RTFOT).

Следующим этапом была подготовка образцов асфальтобетона при помощи лопастного смесителя (модель 20-0160) и гираторного уплотнителя «Инфратест 20-42000».

Асфальтобетонная смесь марки Б тип II рассматривалась, как наиболее распространенная. Увеличение жизненного цикла именно такого асфальтобетона дало бы наибольшую экономическую выгоду. Таким образом, в лабораторных условиях готовилась мелкозернистая плотная асфальтобетонная смесь тип Б марка II. Состав смеси приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Состав асфальтобетонной смеси, приготовленной в лаборатории

Компонент	Расход, % от состава
Гранитный щебень, фракция 10-12 мм	43,2
Гранитный отсев, фракция 2 мм, прочность 800	42,0
Минеральный порошок	9,2
Битум БНД 60/90	5,6

После подготовки образцов асфальтобетона – сформованных плит с использованием исходного битума и из битумов, состаренных по ТОС RTFOT и ТС RTFOT – выполнялись испытания на колееобразование, после чего анализировались результаты, делались выводы по асфальтобетону после RTFOT.

2.6. Длительное состаривание битума методом PAV.

Оно осуществлялось в печи InfraTest 20-44000 (рис. 2.3).



Рис. 2.3 – Испытательная печь PAV InfraTest 20-44000

Поскольку на этапе реальной эксплуатации битум подвергался бы обычному окислению, то и в лабораторных условиях проводилось стандартное состаривание как тех образцов, которые подвергались RTFOT-термоокислению, так и тех, которые состаривались в инертной среде.

После каждого этапа определялись показатели битума с целью выявления изменений в битуме после длительного состаривания.

2.7. Испытания битумов после PAV

После PAV-состаривания образцы битума подвергались различным испытаниям, фиксировались результаты, делались выводы.

2.8. Испытания образцов асфальтобетона, полученных в лабораторных условиях, после PAV.

На данном этапе выполнялось формование при вибрировании и прессовании с целью получения круглых образцов диаметром 101,4 мм (рис. 2.5) для исследования предела прочности при расколе. Асфальтобетонную смесь приготовили на базе вяжущего, состаренного PAV после RTFOT.

3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И СХЕМЫ АБЗ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ, в рамках чего исследовалась стандартная схема завода, а затем выполнялся подбор оборудования, обеспечивающего подачу защитного газа в технологические емкости.

4. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ.

4.1. Производство смеси на АБЗ в кислородсодержащей среде. На данном этапе защитные газы подавались в бункер-смеситель и бункеры хранения в условиях АБЗ, отбирались образцы.

4.2. Производство смеси на АБЗ в инертной газовой среде.

5. ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ОПЫТОВ С ОБРАЗЦАМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ В ХОДЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ (рис. 2.4).

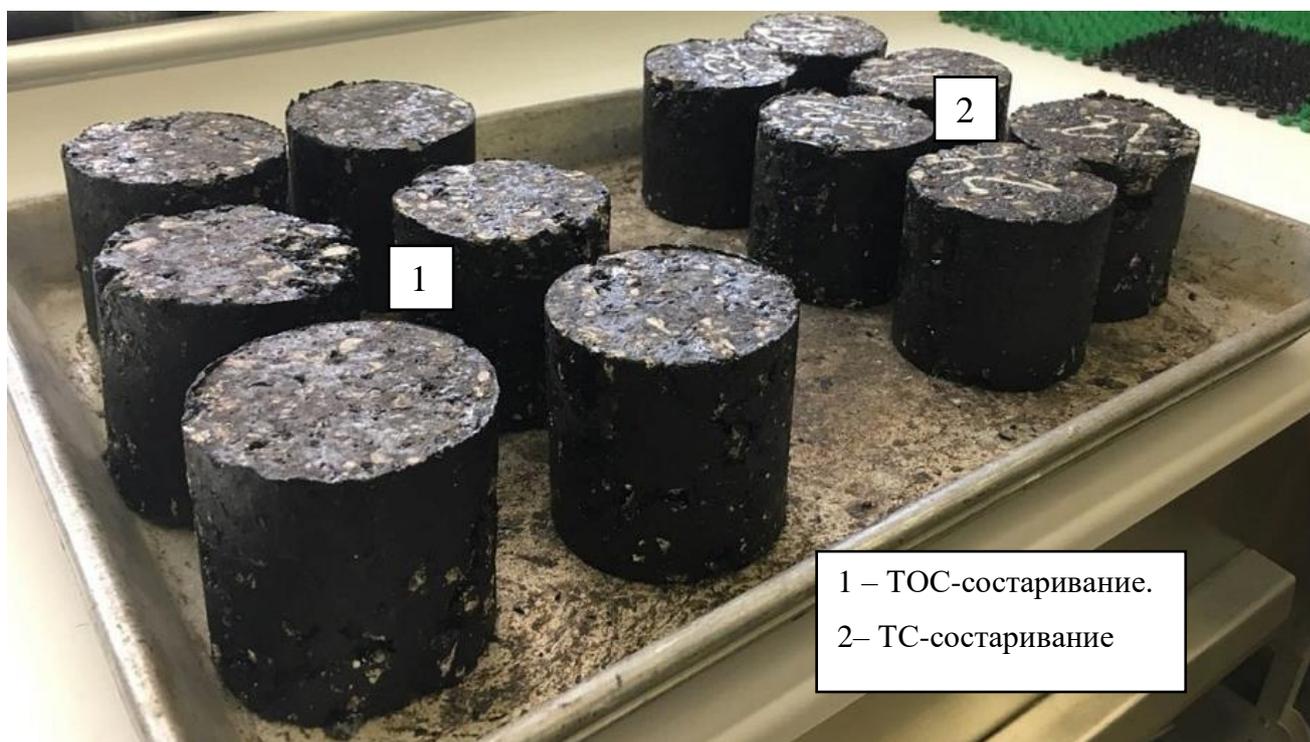


Рисунок 2.4 – Образцы асфальтобетона

Этап предусматривал длительное термостатирование отобранных на АБЗ образцов в климатической камере, определение пределов прочности, усталостной прочности и коэффициента старения с последующим математическим регрессионным анализом на базе математической статистики и распределения вероятностей.

6. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ.

Предлагаемая технология требовала обоснования не только с точки зрения технологии, но и технико-экономических показателей, что и было выполнено по окончании основной части исследований.

7. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ.

На заключительном этапе выполнения работы на основании всех полученных результатов формировались выводы об эффективности применения инновационного метода, предусматривающего применение защитных газов в целях формирования инертной среды при производстве асфальтобетонной смеси.

Были сформулированы рекомендации по прогнозированию долговечности асфальтобетона при применении инертной газовой среды.

2.3. Физико-математическое моделирование процессов производства асфальтобетонной смеси с применением защитных газов

Режим перемешивания минеральных материалов с битумом в смесителе циклического действия играет основную роль в процессе приготовления смеси. Для подтверждения научной гипотезы влияния защитного газа на качество приготавливаемой горячей асфальтобетонной смеси был разработан алгоритм исследования, включающий построение физико-математической модели влияния защитного газа на старение битумного вяжущего, в технологических процессах смешивания и хранения горячей асфальтобетонной смеси, для получения качественных дорожных покрытий.

Начальные физические параметры моделирования взяты для известных параметров механизмов, процессов и физико-механических параметров сред и используемых материалов. Основной агрегат, параметры которого используются в моделировании - смеситель (аналог ДС-185 (ДС-158)), непосредственно в нем в процессе смешения происходит начальное вытеснение воздуха горячей асфальтобетонной смесью с последующим его насыщением защитным газом. На

рисунке 2.5 а) показан чертеж и модельная схема 1б) многолопастного двухвального смесителя.

Наполнение и последующее распределение газа моделировалось из условия повышенного давления защитного газа в условиях его подачи к смеси.

В модели используется несколько основных параметров: начальная температура горячей асфальтобетонной смеси $T_{асф.нач}$, количество приготавливаемой смеси начальный объем $V_{асф.нач}$ и масса смеси $m_{асф.нач}$, воздушные пустоты $V_{ав}$, время смешивания горячей асфальтобетонной смеси $t_{смеш}$, объем защитного газа, подаваемого в смесительную установку $V_{защ.г}$. Выходные параметры моделирования: температура асфальтобетонной смеси $T_{асф.с}$, объем вовлеченного защитного газа $V_{вов.г}$.

Процесс приготовления горячей асфальтобетонной смеси опосредовано связан с органическим вяжущим – битумом. Термоокисление в процессе перемешивания, хранения, доставки на объект и укладки смеси в покрытие происходит непрерывно. Главными факторами в этом случае является температура и время перехода из одного состояния в другое. Температура за время перемешивания не изменяется поэтому процесс можно считать адиабатическим.

Моделирование проведено в математическом пакете MATLAB. Дифференциальные уравнения в частных производных решались методом конечных элементов с использованием численного моделирования в математическом пакете COMSOL Multiphysics.

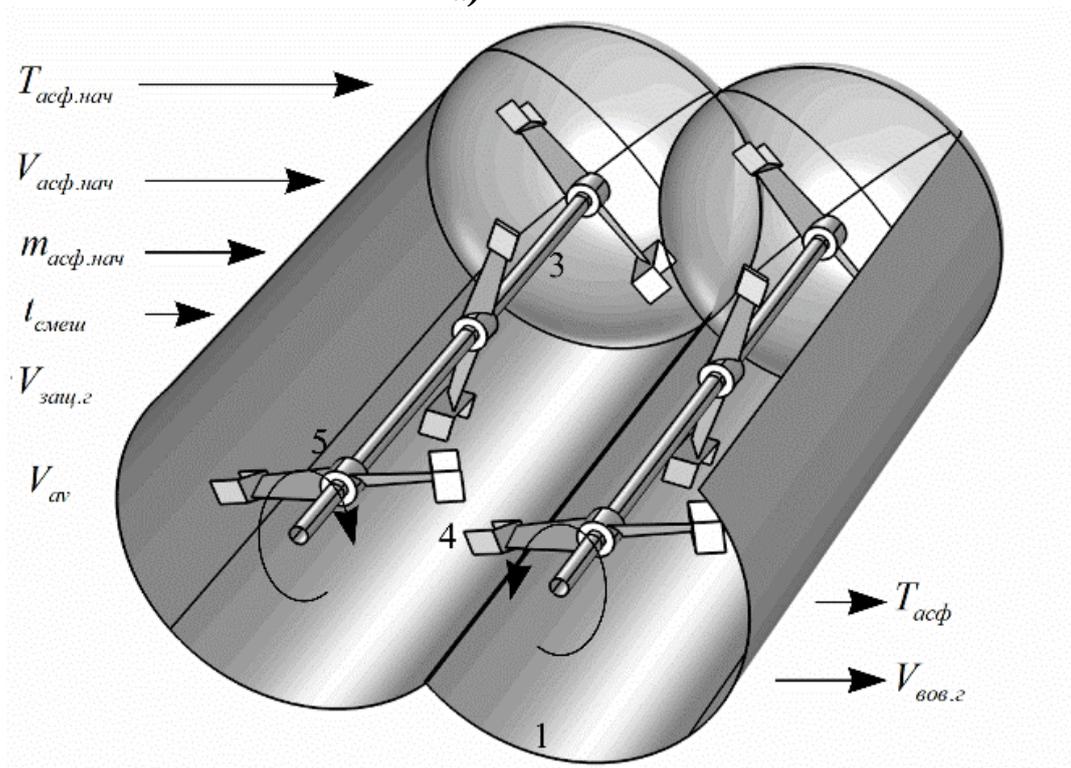
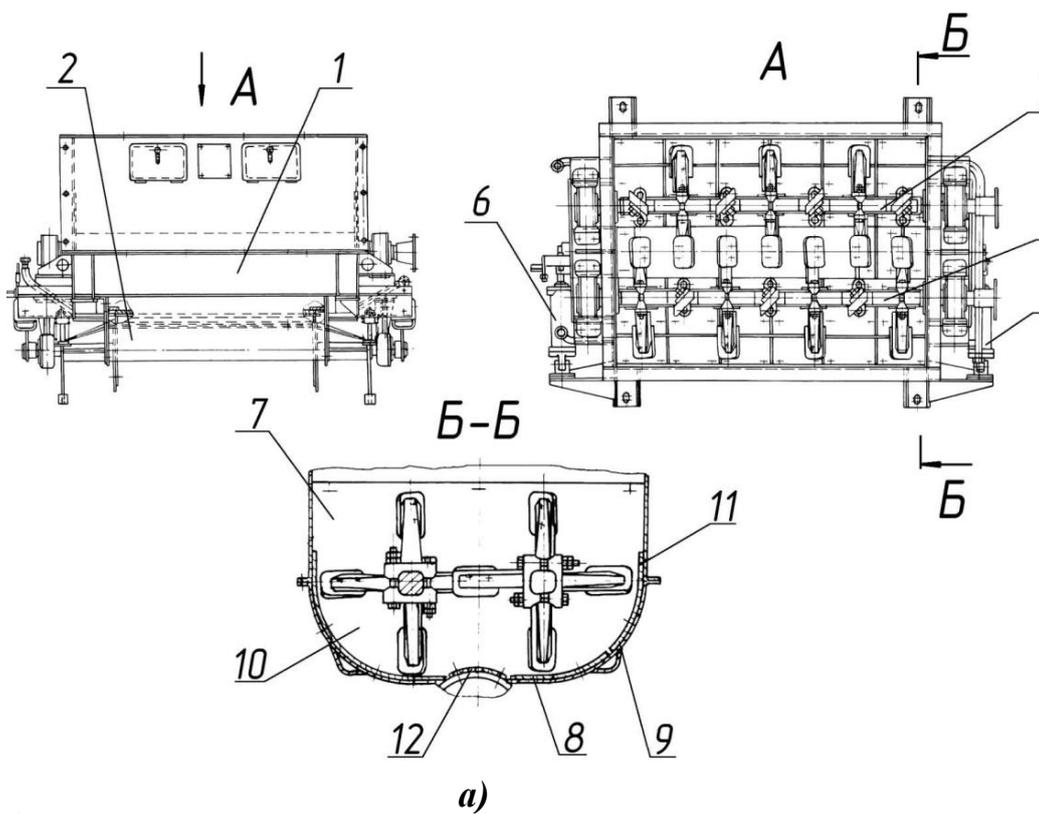


Рисунок 2.5 – Чертеж а) многолопастного двухвального смесителя (аналог ДС-185 (ДС-158) и модельная схема б) 1– корпус, 2 – затвор, 3 – вал (смесителя), 4 – лопасть, 5 – стойка левая, 6 – установка пневмоцилиндра, 7 – бронелист (верхний), 8-11 – бронелисты, 12 – барботер

В основу решения положены несколько уравнений, связанных с защитным газом: уравнение диффузии в пористой среде, диффузионное уравнение в подвижной среде, уравнение теплопереноса, уравнение неразрывности. Для решения задачи изменения свойств органического вяжущего от действия температуры и времени использованы дифференциальные кинетические уравнения описывающие старение битумосодержащих материалов, уравнение Аррениуса в дифференциальной форме, уравнения реологии битумных материалов.

На первом этапе моделирования рассматривалась главная гипотеза исследования и ее ограничения. Основными факторами начала термоокислительного процесса без учета вариаций свойств битумного вяжущего, является температура $T_{асф.нач}$, время ее воздействия на приготавливаемую смесь $t_{смеш}$. На выходе технологического процесса смешения получаем температуру смеси $T_{асф.с}$. И далее, рассматривался каждый этап технологических операций, влияющих на температурные и временные величины процесса старения (термоокисления) битумосодержащей горячей смеси. Вариационной частью решения является объем защитного газа, подаваемого в смесительную установку $V_{защ.г}$.

Процесс смешения в смесителе (рис.2.5) обеспечивает массоперенос и теплоперенос между компонентами смеси и защитным газом начальный объем которого принимается как $V_{асф.нач}$ с массой смеси $m_{асф.нач}$. Газ вовлекается посредством начальной пористости через воздушные пустоты $V_{ав}$. Где пористость выражена через объемы материала (2.1):

$$n_v = \frac{(V_{общ} - V_{мин} - V_{бит})}{V_{общ}}, \quad (2.1)$$

где $V_{общ}$ - общий объем, $V_{мин}$ - объем минеральной части, $V_{бит}$ - объем битума.

Остаток этих объемов составляет вовлеченный воздух, который в смесительной установке замещается на защитный газ.

Граничным условием решения дифференциального уравнения Фика и уравнения диффузии газа в пористой среде, где начальная пористость может составлять 0,25-0,4.

Первично задаются параметры смесителя, его геометрические формы вводятся в программу и величины ответственные за перемешивание, такие как диаметр хода лопастей:

$$v_{cp}^{-1} = \pi D_{cp} n / 60, \quad (2.2)$$

где v_{cp}^{-1} - окружная скорость перемешивающей лопасти, м/с, D_{cp} - диаметр лопасти, м, n – количество оборотов в минуту, об/мин.

Для данной конфигурации диаметр составил 0,9 м, а количество оборотов 60 об/мин. На основании полученного результата вычислен модуль скорости для элемента смеси подверженной перемешиванию:

$$U_x = \frac{dx}{dt}, U_x = -P_0 \cdot \sin\left(\frac{d\varphi}{dt}\right), U_y = \frac{dy}{dt}, U_y = -P_0 \cdot \sin\left(\frac{d\varphi}{dt}\right). \quad (2.3)$$

Так как количество лопастей на первом и втором валу одинаково, то и скорости перемешивания для каждого одинакового объема V_i секции равны:

$$V_i = \pi \cdot R_n^2 \cdot l, \quad (2.4)$$

где R_n - радиус лопастей, $i - 1..14$, количество секций.

Внутренний диаметр осей не рассматривается, и в приближении составляет порядка 10% от R_n . Так как лопасти делают один оборот то необходимо учесть время пребывания материала в области лопастей. При движении материала от области с минимальной скоростью, до максимальной на краю лопасти происходит концентрационные изменения состава, перемешиваемого в смесителе. Асфальтобетонная смесь представляет собой многофазную среду, включающую крупный заполнитель, мелкий, пылевые остатки и битум. Вначале фракционный состав имеет высокую пористость с гравитационным расслоением, которая для расчета составляет 40%, вводимый битум в процессе перемешивания способствует обволакиванию крупных частиц с последующей увязкой мелких

частиц, этот случай описывается дифференциальным уравнением концентрации C_i , изменяющейся во времени:

$$\frac{dC_i}{dt} = \gamma_i \cdot (C_{i-1}), \quad (2.5)$$

где γ_i - распределение каждого компонента в слое.

По мере перемешивания части фракций будут перемещаться в сторону края лопастей, что вызывает смещение одних фрагментов относительно других. В этот момент, в присутствии битума происходит захват газовой фазы и высвобождение воздуха из межструктурных компонентов – фракций.

Так как поры можно заполнить следующей фазой, то можно записать изменение концентрации газа в смеси:

$$\frac{dC_i}{dt} = \gamma_i \cdot (C_{i-1} - C_i). \quad (2.6)$$

Кинетику процесса перемешивания описываем уравнением типа:

$$K_c(t) = a \cdot K_{cn} \cdot e^{-bt}, \quad (2.7)$$

где K_{cn} - коэффициент неоднородности при смешивании смеси, a и b – коэффициенты, определяемые по данным для смесителя $a=12$, $b=0,76$.

Температурный режим и количество газа подаваемого в смеситель были заданы в виде таблицы значений, температурно - зависимые вязкостные свойства битумного вяжущего заданы из характеристик полученных в лабораторных условиях.

Процесс моделирования перемешивания с учетом диффузии изначально показал неравномерность концентрации газа рисунок 2.6 а)

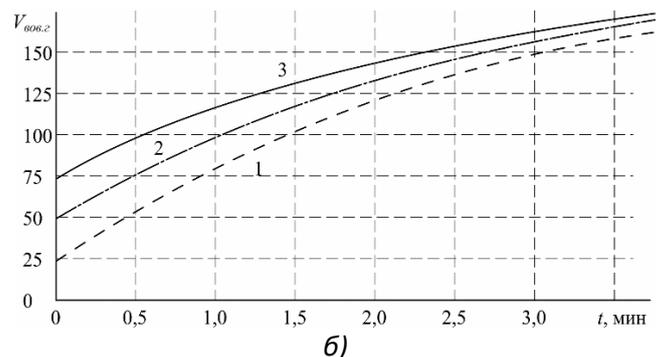
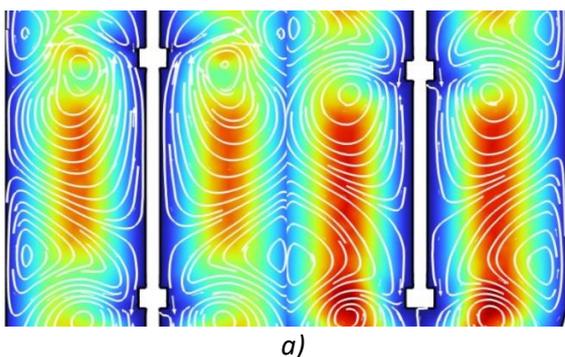


Рисунок 2.6 – Процесс перемешивания асфальтобетонной смеси в присутствии защитного газа: а) визуализация процесса; б) зависимости вовлеченного газа в процессе перемешивания от объема, прокачиваемого через смеситель: 1 – 30 м³/ч, 2 – 60 м³/ч, 3 – 90 м³/ч

Асфальтобетонная смесь представляет собой пористую структуру, в которой наблюдаются диффузионные процессы движения газа и замещение одного газа другим. Данную задачу можно считать, как движущуюся диффузионную среду с граничными условиями 2-го рода (условие Неймана) и потенциал давления на границе перемешивания стремится к нулю. Тогда закон Дарси можно записать:

$$W = -k_{\text{газ}}(G) \cdot \text{grad } p(G), \quad (2.8)$$

где W – потока, $k_{\text{газ}}(G)$ - коэффициент газопроводности, $p(G)$ - давление газа через диффузионный слой.

Этот процесс близок по физическому смыслу к растворению газа в объеме дисперсного материала, в котором как бы промешивается вовлеченный азот, вытесняя кислород, содержащийся в воздухе. Данный процесс описывается вторым законом Фика:

$$\frac{dC}{dt} = -D_m \cdot \frac{d^2C}{dx^2}, \quad (2.9)$$

где D_m - диффузионный коэффициент переноса массы газа.

Процесс формирования смеси циклический, а контролируемые параметры разнесены во времени. Для оценки параметров долговечности в модель внесены уравнения, связанные со старением битумного вяжущего и изменением его вязкостных свойств:

$$\eta = A * e^{\varphi t}, \quad \lg \eta = \lg A + n_c * t \quad (2.10)$$

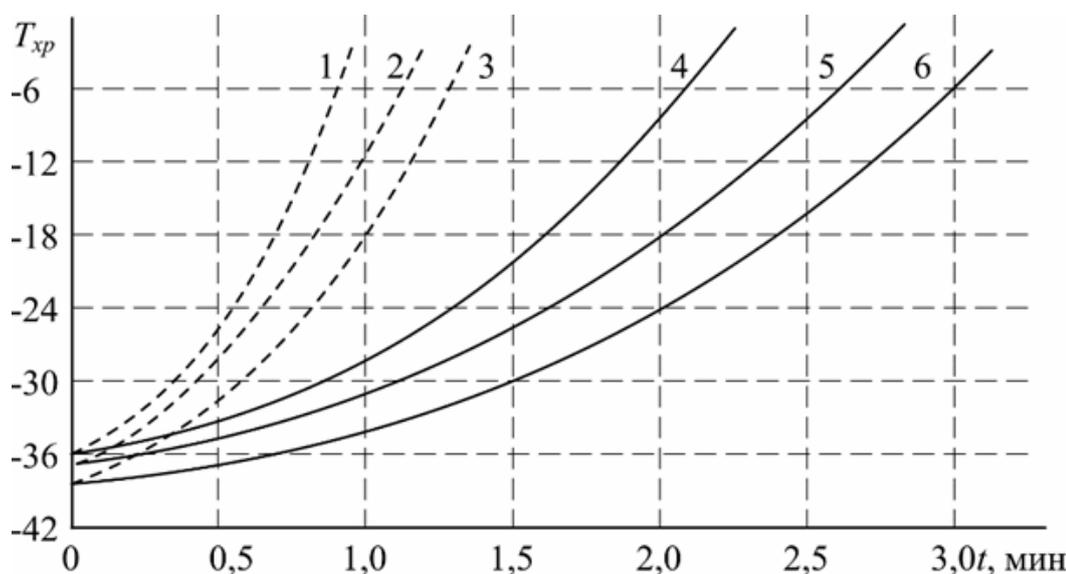


Рисунок 2.7 – Кинетика хрупкости битумного материала для двух температур (1, 2, 3 – 180 °С, 4, 5, 6 – 150 °С) и трех режимов прокатки (1, 4 – 30 м³/ч; 2, 5 – 60 м³/ч; 3, 6 – 90 м³/ч)

Моделирование показало, что с ростом температуры хрупкость растет, а увеличение объемов прокатки ее снижает, рисунок 2.7. Отмечается экспоненциальная зависимость хрупкости от температуры и незначительная, квадратичная нелинейность, связанная с объемами прокатки газа. Очевидно, это связано с реологическими свойствами заданного битумного материала. Изменяя свойства, через старение битума, можно получить циклическое изменение свойства горячей асфальтобетонной смеси.

Таким образом, используя моделирование в математических пакетах возможно предсказать изменение свойств горячей асфальтобетонной смеси при ее приготовлении и в последующей эксплуатации.

2.4. Базовые показатели, определяемые в лабораторных условиях при старении битума и асфальтобетона

Как уже отмечалось в Главе 1, при старении битума происходят глубокие изменения физико-химических свойств вяжущего (рис. 2.8) [39, 108, 114, 115].

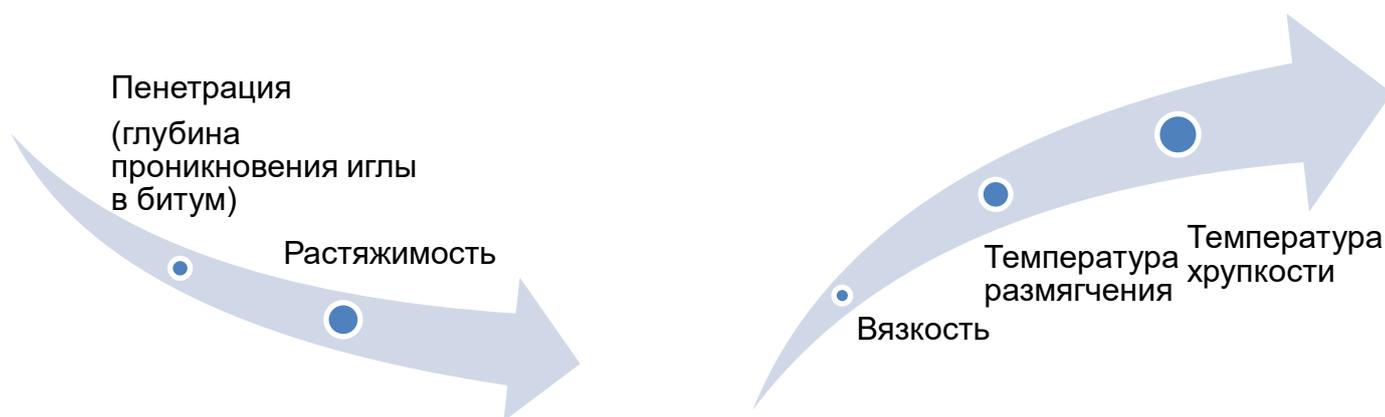


Рисунок 2.8 – Изменение свойств битума в асфальтобетоне при старении

С тех пор, как битум используется в дорожных одеждах, разработано множество методов лабораторного старения в целях оценки таких изменений для вяжущих. На сегодняшний день основным является метод RTFOT – метод вращения контейнеров с битумом в тонкой пленке, то есть в данном способе был учтен фактор необходимости перемешивания. Согласно этой методике битум помещают в специальные контейнеры, которые вращаются в печи при подаче воздуха. В результате битум перемешивается и растекается по стенкам. В процессе интенсивного окисления битум стареет, как это происходит в смесителе при производстве асфальтобетонной смеси. Проблема заключается в том, что при этом методе образцы могут выплескиваться из контейнеров, а фиксированная температура нагрева также не является совершенным вариантом, поскольку исходный битум разных марок изначально имеет различную вязкость и нагревается до разных температур. Так, например, БНД 60/90 при поступлении в миксер-смеситель может быть нагрет до 145⁰С, а менее вязкий битум марки БНД

90/130 нагревают на 5-10 °С слабее. При различных выходных характеристиках и толщины пленок будут также разными.

Основной оценочной характеристикой старения тут является потеря массы битумного вяжущего. При интенсивном процессе летучие ароматические вещества испаряются, и асфальтобетон, приготовленный на основе такого битума, тем сильнее будет подвержен растрескиванию. В России этот западный метод регулируется ГОСТ 33140-2014 [12] и широко применяется в лабораториях.

Вторым основным методом искусственного состаривания битумного вяжущего, позволяющим в считанные часы воспроизвести старение битума в асфальтобетоне, которое реально протекает за 5-10 лет эксплуатации, является PAV, который предполагает воздействие на тонкий слой битума температуры и высокого давления в специальной печи PAV в течение 20 часов. После этого в вакуумной дегазационной печи проводят дегазацию. Этот способ широко распространен в России и регулируется ГОСТ 58400.5-2019 [16]. Таким образом, оба метода являются усредненными и оценочными.

Отечественный опыт разработки и применения методов искусственного лабораторного состаривания битума приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Отечественный опыт разработки и применения методик состаривания битума для оценки изменения его свойств после старения

Нормативно-правовой документ	Статус	Слой битума	Температура нагрева	Время нагрева	Оценка степени старения	Суть метода	Сравнительная оценка качества методики состаривания
ГОСТ 18180-72 «Битумы нефтяные. Метод определения изменения массы после прогрева»	Действует	4 мм	163 ⁰ С	5 час	По температуре размягчения и потере массы при хранении при высоких температурах	Чашки с битумом держат в сушильном шкафу при высокой температуре и после охлаждения до 25 ⁰ С оценивают потери массы.	
ГОСТ 33140-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения старения под воздействием высокой температуры и воздуха (метод RTFOT)	Действует	Не выше 1,25 мм	163 ⁰ С	1 час 25 мин	По результатам до и после воздействия на битум (температуры плавления, хрупкости, динамическая вязкость, другие показатели) и потере массы	Контейнеры с битумом вращаются в печи. С помощью вращения битум раскатывается в тонкую пленку под воздействием температуры и потока нагретого воздуха, подаваемого в форсунку.	Наиболее широко распространенный метод. Достаточно качественная имитация старения при смешивании асфальтобетонной смеси на АБЗ.
ГОСТ Р 58400.5-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод старения под действием давления и температуры (PAV)	Действует	3,2 мм	90 – 110 ⁰ С (в зависимости от марки вяжущего)	20 часов	По результатам до и после воздействия на битум	Битум, уже состаренный по RTFOT, далее состаривается в печи под высоким давлением, после чего проводится дегазация при температуре 170 ⁰ С.	Качественная имитация многолетней эксплуатации асфальтобетонной смеси (5 – 10 лет). Самый распространенный метод.
ПНСТ	Предварительный	1-3 мм	150 ⁰ С – УСК	50 мин –	По степени потери	Включает методы:	Первый метод – аналог

Нормативно-правовой документ	Статус	Слой битума	Температура нагрева	Время нагрева	Оценка степени старения	Суть метода	Сравнительная оценка качества методики состаривания
396— 2020. Дороги автомобильные общего пользования. МАТЕРИАЛЫ ВЯЖУЩИЕ НЕФТЯНЫЕ БИТУМНЫЕ. Методы старения в тонком слое.	национальный стандарт для добровольного исполнения		100 ⁰ С – УСД1 100 ⁰ С – УСД2	УСК 40 ч – УСД1 8 ч – УСД2	массы образцов	1. УСК – Краткого старения вяжущего, имитирующего процесс при смешивании асфальтобетонной смеси, при этом: <ul style="list-style-type: none"> • битум в тонкой пленке распределяется на специальных пластинах; • атмосферное давление; • высокая температура; • поток воздуха. 2. Длительного старения (имитация процессов при эксплуатации), при этом: <ul style="list-style-type: none"> • битум в тонкой пленке на пластинах; • атмосферное (метод УСД1), либо высокое давление (метод УСД2); • высокая температура; • поток воздуха; • сушильный шкаф (УСД1), либо печь PAV (УСД2). 	RTFOT, второй – аналог PAV. Нормативный документ разработан и является предварительным вариантом будущего ГОСТа/ Методика является аналогом широко применяемых методов, но исключает дегазацию, сокращает время старения, упрощает весь процесс.

Перечислим характеристики, которые необходимо оценивать при определении степени старения битума и асфальтобетона (рис. 2.2), а также оборудование для их определения, которое применялось для экспериментов в рамках выполнения данной работы.

1. Непосредственно для битума определяются следующие показатели:

– Пенетрация, в том числе остаточная после старения, то есть степени твердости битума аппаратом для определения пенетрации нефтепродуктов ПН-106 по ГОСТ 33136-2014 [9];

– Изменение массы вяжущего, которое представляет собой разность масс до и после старения, выраженное в процентах;

$$\Delta = (M_{бдс} - M_{бпс}) / (M_{бдс} - M_{ск}) * 100\%, \quad (2.11)$$

где $M_{бдс}$, $M_{бпс}$ – это массы стеклянных емкостей с битумом до и после старения;

$M_{ск}$ – масса самой стеклянной емкости.

– температура размягчения битума до и после искусственного старения методом КиШ с помощью автоматического аппарата КиШ-20 по ГОСТ 33142-2014 [1, 14];

– температуру хрупкости, то есть устойчивости к низким температурам автоматическим аппаратом АТХ-20 по ГОСТ 33143-2014 [15];

– растяжимость (дуктильность) битума дуктилометром ДАФ-980 по ГОСТ 33138 — 2014 при 25 °С [11]. Этим методом определяют возможность битума растянуться в нить. Желательно, чтобы битум был хорошо растяжим при низких температурах и умеренно растяжим при 25⁰С;

– динамическая вязкость – ротационным вискозиметром по ГОСТ 33137-2014 при 60⁰С [10];

– динамическая вязкость сдвига при 60⁰С – динамическим сдвиговым реометром DSR по ГОСТ Р 58400.10-2019 [18].

Для исходного битума допустимая деформация – от 9 до 15%, после RTFOT – от 8 до 12%, после PAV – от 0,8 до 1,2%. В данном методе определяют комплексный модуль сдвига G^* , который определяют как $\tan \delta$ напряжения /

тах деформация, а также фазовый угол (угол между вектором деформационного усилия и создаваемым им напряжением) для битума.

- температуру вспышки на аппарате АТВО-20 (для определения температуры вспышки нефтепродуктов в открытом тигле) по ГОСТ Р 33141-2014 [13];

- жесткость битума, измеряемую в МПа за 60 сек, характеризующую способность вяжущего сопротивляться прогибу при отрицательных температурах. Эксперимент проводится путем изгиба битумной балочки на реометре VBR по ГОСТ Р 58400.8-2019 [17].

2. Для асфальтобетона:

- предел прочности при сжатии с помощью Испытательного пресси UNIFRAME 50 кН по ГОСТ 9128-2013 [6];

- усталостную прочность, то есть сопротивляемость изменяющимся нагрузкам (измеряется в $G \cdot \sin \delta$ при 10 рад/с, кПа) путем подготовки приложения к прямоугольным образцам асфальтобетона циклических деформаций с помощью испытательной установки на изгиб по ГОСТ 58401.11-2019 [19]. Во время испытания к образцам прикладывается деформационная нагрузка в течение не менее 10 000 циклов до разрушения;

- предел прочности на сжатие при постоянной скорости, трехосное сжатие с помощью Испытательного пресси UNIFRAME 50 кН по ГОСТ Р 58406.6-2020 [22];

- истирание асфальтобетона, которое определяется путем лабораторного опыта истирания образцов при низкой температуре в течение 15 мин., который описан в ГОСТ Р 58406.5-2020 (проводится на установке для выявления степени истираемости УКМП-РДТ по методу Пралля) [24];

- колееобразование – испытанием на установке на колееобразование 20-4000 + 4001 по ГОСТ 58406.3-2020 [23];

- сдвигоустойчивость цилиндрических образцов асфальтобетона толщиной 101.4 мм с помощью приспособления для испытания на сдвигоустойчивость по Маршаллу 101.4 мм для цифрового испытательного пресси UNIFRAME 50 кН по

ГОСТ Р 58406.8-2019 [21].

– трещиностойкость, которая характеризуется прочностью на растяжение образцов при расколе. Испытания проводятся с помощью испытательного пресса UNIFRAME 50 кН по ГОСТ Р 58401.18 – 2019.

– Определение сдвиговой деформации, коэффициента старения и других параметров после термостатирования в климатической испытательной камере «Тепло-Влага-Холод» М60/100-1000 КТВХ по ГОСТ Р 58401.25- 2019, ГОСТ Р 58406.3-2020 и т.д. [25].

Перечень всех испытаний приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Методы испытаний битума и асфальтобетона при оценке степени старения

Характеристика	Лабораторное оборудование	Нормативный документ
Для испытаний битума		
Пенетрация, масса вяжущего	Пенетромтр ПН-10б	ГОСТ 33136-2014
Температура размягчения	КиШ-20	ГОСТ 33142-2014
Температура хрупкости	АТХ-20	ГОСТ 33143-2014
Дуктильность	Дуктилометр ДАФ-980	ГОСТ 33138 — 2014
Динамическая вязкость (текучесть)	Ротационный вискозиметр	ГОСТ 33137- 2014
Сдвиговая и усталостная устойчивость	Динамический сдвиговый реометр DSR	ГОСТ Р 58400.10-2019
Жесткость и ползучесть битума	Реометр ВВР (изгиб битумной балочки)	ГОСТ Р 58400.8-2019
Для испытаний асфальтобетона		
Предел прочности при сжатии	Испытательный пресс UNIFRAME 50 кН	ГОСТ 9128-2013
Усталостная прочность (устойчивость)	Испытательная установка на изгиб	ГОСТ 58401.11-2019
Предел прочности на	Испытательный пресс UNIFRAME 50 кН	ГОСТ Р 58406.6-

Характеристика	Лабораторное оборудование	Нормативный документ
растяжение при изгибе и предельной относительной деформации растяжения		ГОСТ Р 58406.3-2020
Истирание асфальтобетона	Установка УКМП-РДТ (по методу Пралля)	ГОСТ Р 58406.5-2020
Колееобразование	Установка на колееобразование 20-4000 + 4001	ГОСТ Р 58406.3-2020
Сдвигоустойчивость по Маршаллу	Приспособление для испытания на сдвигоустойчивость по Маршаллу 101.4 мм для цифрового испытательного пресса UNIFRAME 50 кН	ГОСТ Р 58406.8-2019
Трещиностойкость и водостойкость (прочность при расколе после циклов «замораживание-оттаивание»)	Испытательный пресс UNIFRAME 50 кН, Приспособления к прессу на 50 кН для определения прочности при расколе 76-В0078/Ф	ГОСТ 12801-98, ГОСТ Р 58401.18 – 2019
Определение сдвиговой деформации	Климатическая испытательная камера Тепло-Влага-Холод М60/100-1000 КТВХ	ГОСТ Р 58401.25-2019, ГОСТ Р 58406.3-2020

2.5. Выводы по Главе 2

1. Термоокисление битума при смешивании и хранении асфальтобетонной смеси можно значительно замедлить путем введения защитного газа и перевести процесс в термостарения.

2. Для исследования и доказательства этого тезиса был разработан алгоритм исследования, состоявший из 7 этапов.

3. Математическое моделирование процессов позволило спрогнозировать зависимость пределов прочности и трещиностойкости от температуры приготовления смеси и объема подаваемого защитного газа.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

3.1. Реологические характеристики битумов, термостатируемых в кислородной и инертной среде

Базовым понятием реологии являются ньютоновские и неньютоновские жидкости, то есть такие жидкие вещества в которых скорость течения пропорциональна или не пропорциональна касательным напряжениям.



Рисунок 3.1 – Классификация битумов по упругим свойствам

Реология битумного вяжущего до сих пор недостаточно исследована, хотя очевидно, что данное вяжущее может вести себя, как обе жидкости. Это связано с количеством асфальтенов и термодинамическим состоянием вещества в каждый момент времени. Большое количество асфальтенов в состаренном битуме увеличивает вязкость, плотность вещества, снижает текучесть [46, 48, 49].

Сильно нагретый битум находится в жидком состоянии, при пониженных температурах становится более вязким. С практической точки зрения это значит, что если быстро надавить на битум, он проявит себя как упругое твердое тело, если же надавливать медленно, то можно погрузиться в битум, как в любую жидкость. Строго говоря, битумные вяжущие преимущественно относятся к неньютоновским жидкостям, так как их вязкость зависит от градиента скорости воздействия, что будет подробно рассмотрено ниже.

К базовым реологическим характеристикам битума относят пенетрацию, температуру размягчения и хрупкости, а также растяжимость, то есть дуктильные свойства. Кроме того, оценивают вязкость сдвига и ряд других показателей [2, 3, 4, 5, 30, 42]. Таким образом, битумное вяжущее исследуют на предмет различных деформаций при механическом и температурном воздействии до и после старения, а затем оценивают степень деформационных изменений.

Исследование пенетрации и изменения массы на пенетрометре по ГОСТ ГОСТ 33136-2014, а также температуры размягчения методом КиШ по ГОСТ 33142-2014.

Приведем результаты проведенных опытов и проанализируем данные. На пенетрометре ПН-10Б исследовались пенетрация и изменение массы образцов битума БНД 60/90 после состаривания. На аппарате КиШ-20 определялась температура размягчения. Для этого битум, помещенный в специальное кольцо, под действием температуры становился мягче. На вяжущее воздействовал металлический шар, после чего размягченный битум касался нижней пластины. Отметим, что эксперименты делались с упором на метод RTFOT, как соответствующий процессу термоокисления при замешивании и хранении асфальтобетонной смеси [9, 14].

Таблица 3.1 – Требования к битуму БНД 60/90 до и после RTFOT-состаривания

Показатель	Товарный битум БНД 60/90	Допустимое изменение параметров после RTFOT с доступом кислорода
Глубина проникания иглы, (пенетрация), при 25°C	61-90	Не менее 46 %
Изменение массы, %		Не более 0,8%
Температура размягчения по КиШ, ° С,	Не ниже 47	
Изменение t размягчения по КиШ, ° С		Не более 5

Таблица 3.2 – Результаты испытаний битума БНД 60/90 до и после RTFOT-состаривания в разных газовых средах

Номер образца исходного битума	Удельный расход воздуха, подаваемого на стандартное окисление, м3/м3	Свойства исходных образцов БНД 60/90		Свойства образцов БНД 60/90 после RTFOT-состаривания в кислородосодержащей среде				Свойства окисленных битумов после RTFOT-состаривания в присутствии инертной среды			
		Пенетрация при 25°С, 0,1 мм	Температура размягчения, °С	Остаточная пенетрация при 25°С,		Изменение массы, %	Изменение температуры размягчения, °С	Остаточная пенетрация при 25°С,		Изменение массы, %	Изменение температуры размягчения, °С
				0,1 мм	%			0,1 мм	%		
Образец 1	133	82,1	48,0	47,70	58,1	-0,12	4,6	62,97	76,7	-0,02	3,5
Образец 2	118	81,4	50,0	53,07	65,2	-0,07	4,3	61,21	75,2	-0,03	3,9
Образец 3	140	80,2	47,5	45,07	56,2	-0,14	4,9	62,88	78,4	-0,04	3,2
Образец 4	84	86,6	49,0	62,61	72,3	-0,07	4,0	70,32	81,2	-0,03	4,0
Образец 5	114	87,5	50,0	63,35	72,4	-0,12	5,0	65,98	75,4	-0,03	3,8
Образец 6	114	77,0	51,0	53,59	69,6	-0,08	4,4	59,06	76,7	-0,02	4,0

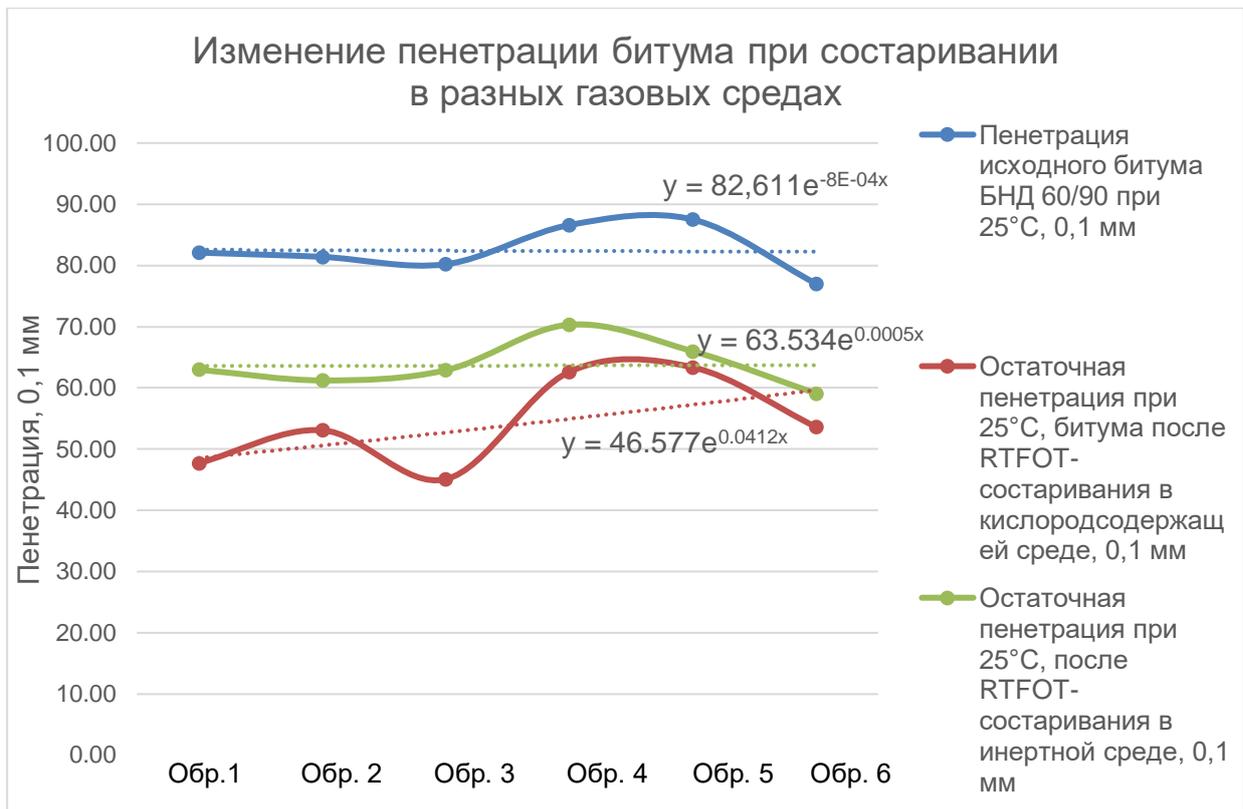


Рис. 3.2 – Изменение пенетрации битума при состаривании в разных газовых средах

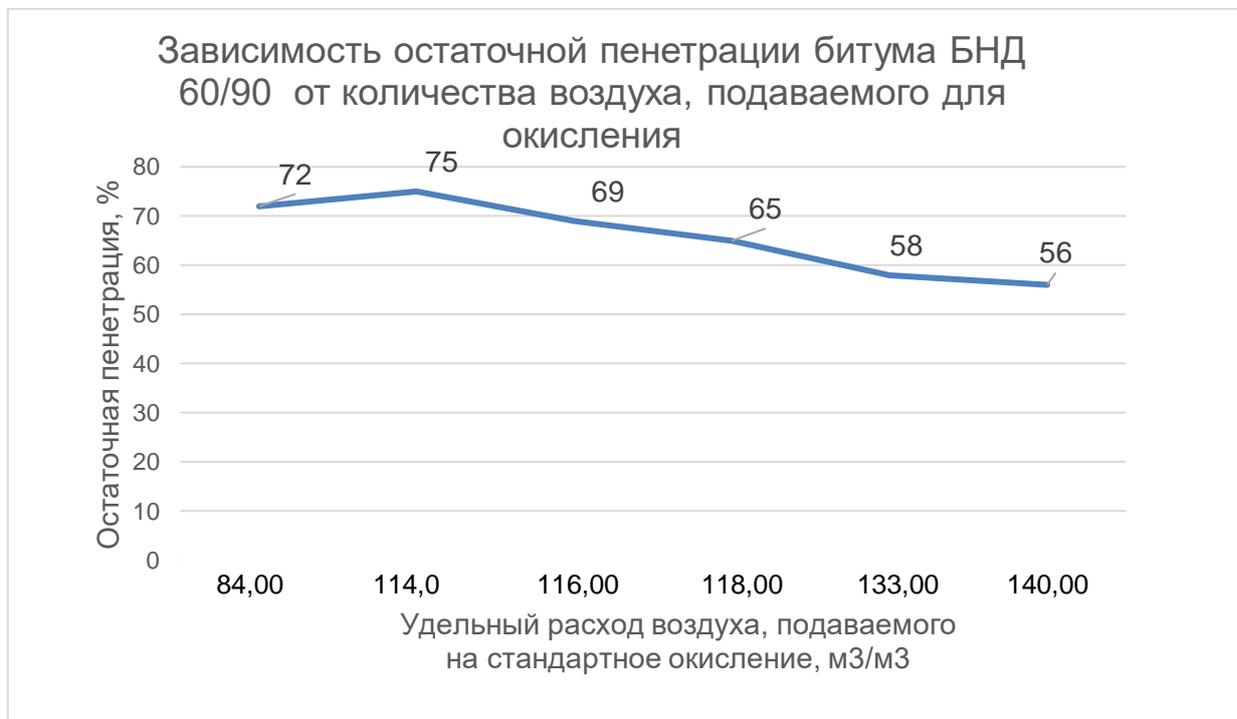


Рис. 3.3 – Зависимость остаточной пенетрации битума БНД 60/90 от количества воздуха, подаваемого для окисления

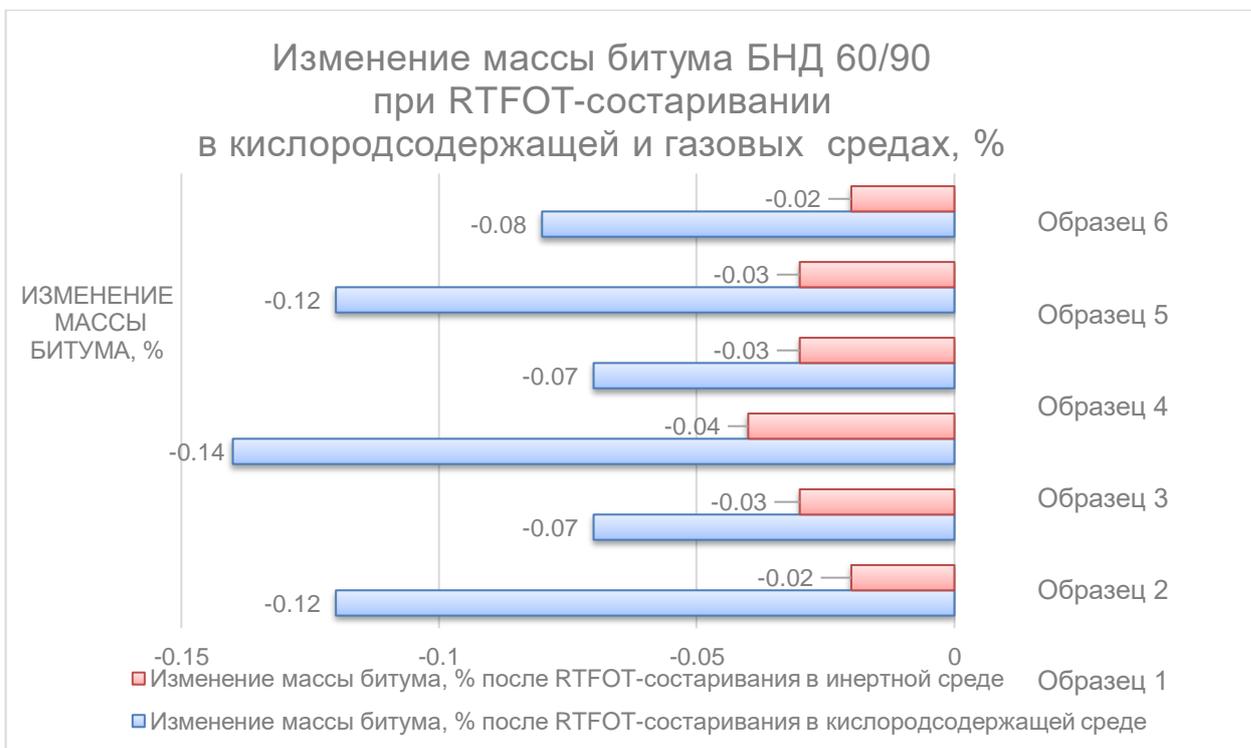


Рис. 3.4 – Изменение массы битума БНД 60/90 при RTFOT-состаривании в кислородсодержащей и газовых средах



Рис. 3.5 – Изменение температуры размягчения битума БНД 60/90 при RTFOT-состаривании в кислородсодержащей и газовых средах

Анализ графика на рис. 3.2 позволяет сделать вывод, что хотя по нормативному показателю удовлетворяют оба результата, но глубина проникания иглы, то есть остаточная пенетрация при состаривании в кислородосодержащей ниже, чем в инертной.

Кривая на графике на рис. 3.3 свидетельствует о том, что с увеличением удельного расхода воздуха остаточная пенетрация пропорционально снижается, поскольку чем больше объем подаваемого кислорода, тем интенсивнее происходит состаривание.

Графики на рис. 3.4 и 3.5 показывают, что потеря массы в инертной среде замедлилась, а температура размягчения повысилась менее значительно, чем при старении в условиях окисления воздухом. Последнее связано с ростом термостойкости более состаренного битума, следовательно, нужна более высокая температура для его размягчения, поскольку отношение насыщенных соединений к асфальтенам уменьшилось.

Исследование изменения температуры хрупкости битумов по ГОСТ 33143-2014.

Согласно данному стандарту нормативная температура хрупкости товарного битума марки БНД 60/90 составляет -15°C , а после старения вяжущее должно становиться хрупким при температуре не выше -12°C , то есть предельное изменение составляет примерно 3 градуса. Опыты с образцами проводились на аппарате АТХ-20, имеющем встроенный охладитель на элементах Пельтье. С помощью данного аппарата был реализован метод Фрааса: образцы битума БНД 60/90 наносились тонким слоем толщиной 0,1 мм на металлическую пластину. Затем последовательно проводились понижение температуры и изгиб битумной пленки до момента появления сквозной трещины. Поскольку аппарат позволяет выводить среднюю температуру, то были выведены средние значения температуры хрупкости для исходного битума и для состаренного в разных газовых средах. Очевидно, что чем ниже температура хрупкости, тем больший запас прочности у битума, тем выше его качество. Таким образом, если метод обработки защитным газом позволяет снизить степень окисления и,

следовательно, понизить температуру хрупкости битума, то такой способ эффективен, что наглядно представлено в таблице 3.3 и на диаграмме (рис 3.6). Положительный эффект есть, хотя он и не так значителен, как при применения различных полимерных модификаторов. Однако ввод различных добавок значительно удорожает стоимость асфальтобетона.

Таблица 3.3 – Нормативные и экспериментально полученные данные по температуре старения БНД 60/90

Показатель	Значение
Нормативное значение t хрупкости товарного БНД 60/90, °С	Не выше -15,0
Нормативное значение t хрупкости товарного БНД 60/90 после состаривания, °С	Не выше -12,0
Среднее фактическое значение t хруп. товарного БНД 60/90 (по Фраасу), °С	-16,3
Среднее фактическое значение t хруп. БНД 60/90 после состаривания в кислородосодержащей среде методом RTFOT (по Фраасу), °С	-12,5
Среднее фактическое значение t хруп. БНД 60/90 после состаривания в инертной газовой среде (по Фраасу), °С	-13,0

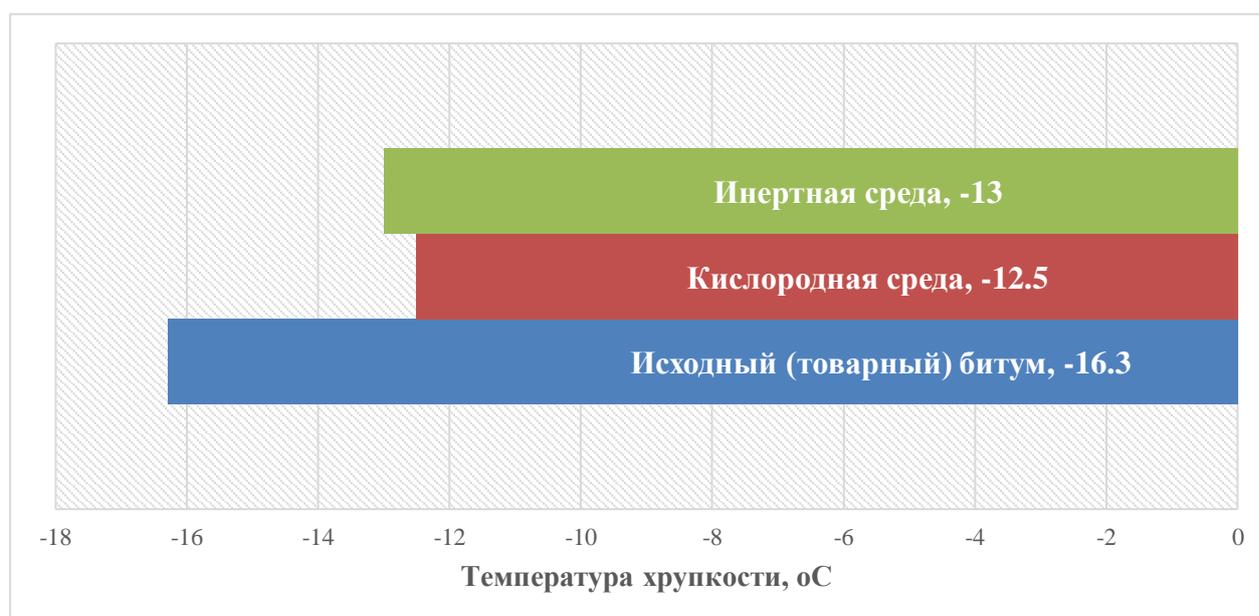


Рис. 3.6 – Изменение температуры хрупкости битума БНД 60/90

при RTFOT-состаривании в кислородсодержащей и газовых средах

Определение дуктильных свойств битума марки БНД 60/90 по ГОСТ 33138 — 2014 с помощью дуктилометра ДАФ-980.

Очевидно, что если при нулевой температуре битум должен обладать значительной дуктильностью и умеренной – при 25 °С. Именно при этой средней температуре определяют степень перехода битума от ньютоновского к неньютоновскому течению. Другой стороны, слишком сильное изменение реологических свойств битума в процессе старения крайне нежелательно и сказывается на качестве асфальтобетона.

Для определения степени изменения дуктильности проводились испытания на дуктилометре ДАФ-980. При измерении растяжимости образцы БНД 60/90 помещали в специальную форму дуктилометра, нагревали битум и растягивали до разрыва, отмечая значение в см, на которое смог растянуться образец битума.

Таблица 3.4 – Нормативные и экспериментально полученные данные по дуктильности БНД 60/90

Номер образца	Норма дуктильности при 25 °С для исходного БНД 60/90, см. по ГОСТ 33133-2014	Фактическая дуктильность отобранных образцов исходного БНД 60/90	Дуктильность после ТОС RTFOT, см.	Дуктильность, после ТС RTFOT, см.
Образец 1	≥55	133	55,2	58,3
Образец 2		135	58,6	62,2
Образец 3		128	50,8	59,3
Образец 4		144	62,2	64,4
Образец 5		138	48,9	65,1
Образец 6		141	60,7	61,2

Для удобства термоокислительное старение в кислородсодержащей среде обозначим как ТОС RTFOT, а старение в инертной среде, то есть термостарение в отсутствии кислорода как ТС RTFOT. Данные экспериментов приведены в таблице 3.4 и на рисунке 3.7. Все исходные образцы соответствуют нормативу.

После старения снижение дуктильности значительно в обоих случаях, но изменения при термостарении (без присутствия кислорода) менее выражено. Ряд образцов после ТОС RTFOT имеет значения дуктильности менее нормы.

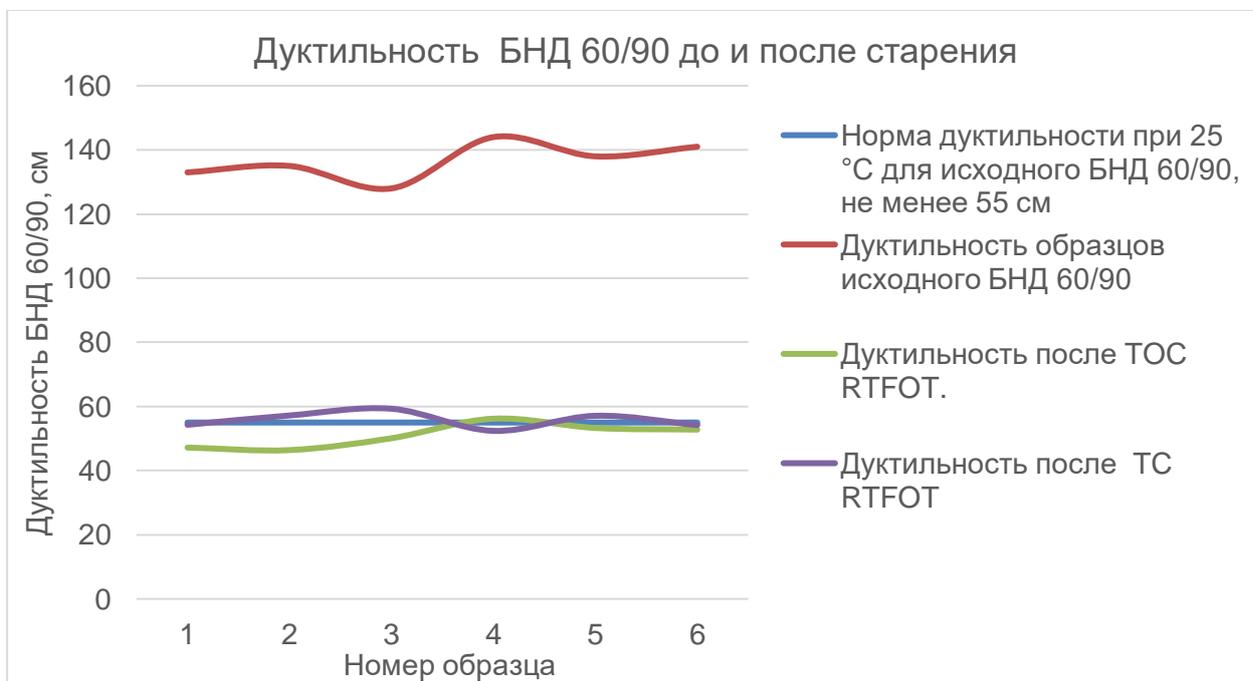


Рис. 3.7 – Дуктильность битума БНД 60/90 после ТОС RTFOT и ТС RTFOT

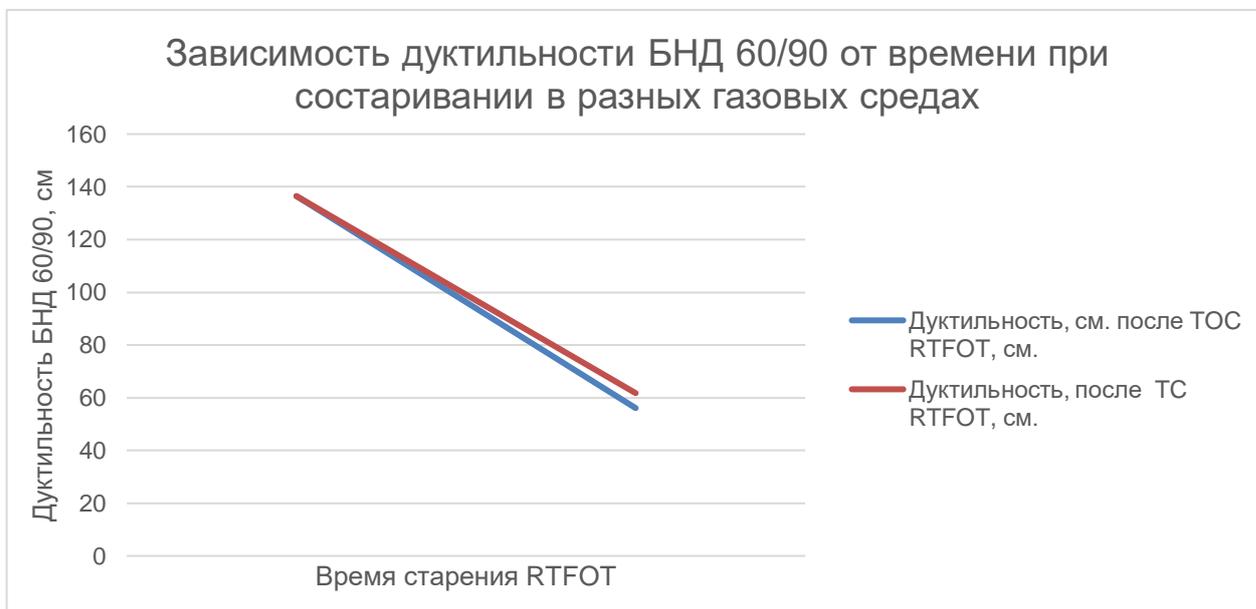


Рис. 3.8 – Зависимость дуктильности БНД 60/90 от времени при состаривании в разных газовых средах

Определение динамической вязкости по ГОСТ 33137-2014 и регрессионный анализ.

Одной из важнейших реологических характеристик битума является его динамическая вязкость, то есть способность вяжущего сопротивляться различным сдвиговым деформациям по касательной, радиально. Для таких испытаний битум вращают и измеряют степень воздействия вискозиметром по ГОСТ 33137-2014. Показатель динамической вязкости определяют как отношение степени приложенного сдвига, так называемого напряжения сдвига к его скорости. По сути вискозиметром определялась текучесть битума при крутящем моменте, его способность сопротивляться вращательному движению. Поскольку ГОСТ 33137-2014 не предусматривает испытания для состаренных битумов, нужно опираться на принцип, изложенный в ГОСТ Р 58400.10-2019, где подробно изложен порядок опытов именно с состаренным битумом. Таким образом, динамическая вязкость для битума БНД 60/90 исследовалась в 5 этапов:

1. Показатели исходного вяжущего;
2. Показатели состаренного по ТОС RTFOT;
3. Показатели состаренного по ТС RTFOT (в инертной среде);
4. Показатели состаренного по методу PAV после ТОС RTFOT;
5. Показатели состаренного по методу PAV после ТС RTFOT.

Динамическая вязкость измеряют в Па*сек и определяют по формуле:

$$\eta = \tau/\gamma', \quad (3.1)$$

где τ – напряжение сдвига, Па;

γ' – его скорость, с^{-1} .

Для исследования этого показателя сравнивали, каким образом повлияет старение на динамическую вязкость образцов битума БНД 60/90. Из таблицы данных 3.5 и графика на рис. 3.9 видно, что показатель динамической вязкости увеличился в среднем в 3 раза при термоокислении и только в 2 раза при термостарении в присутствии защитных газов.

Таблица 3.5 – Динамическая вязкость БНД 60/90 при разных режимах старения, различных напряжениях и скоростях

сдвига

Скорость сдвига $\dot{\gamma}$, c^{-1}	60°C		60°C		60°C		60°C		60°C	
	Исходный битум		Битум после термоокислительного старения ТООС RTFOT		Битум после термостарения ТС RTFOT (в присутствии защитного газа)		Старение PAV после ТООС		Старение PAV после ТС	
	Динамическая вязкость η , Па*с	Напряжение сдвига τ , Па	Динамическая вязкость η , Па*с	Напряжение сдвига τ , Па	Динамическая вязкость η , Па*с	Напряжение сдвига τ , Па	Динамическая вязкость η , Па*с	Напряжение сдвига τ , Па	Динамическая вязкость η , Па*с	Напряжение сдвига τ , Па
0,556	140,8	78,3	250,1	172,3	211,2	133,1	300,2	305,4	280,9	117,4
2	78,3	155,6	150,1	462	94	250,3	250,1	266,2	133,1	188
6	66,6	399,6	130,4	1179,6	70,5	721,4	196,6	861	143,5	423
20	58,7	1174	100,6	2974	58,7	1503,6	148,7	2348	117,4	1174
1620,0	16,9	27378	4,8	7776	3,4	5508	3,1	6022	3,3	5672,9
4860,0	1,1	4860	0,9	4374	0,9	4374	0,7	3402	0,9	4126,8

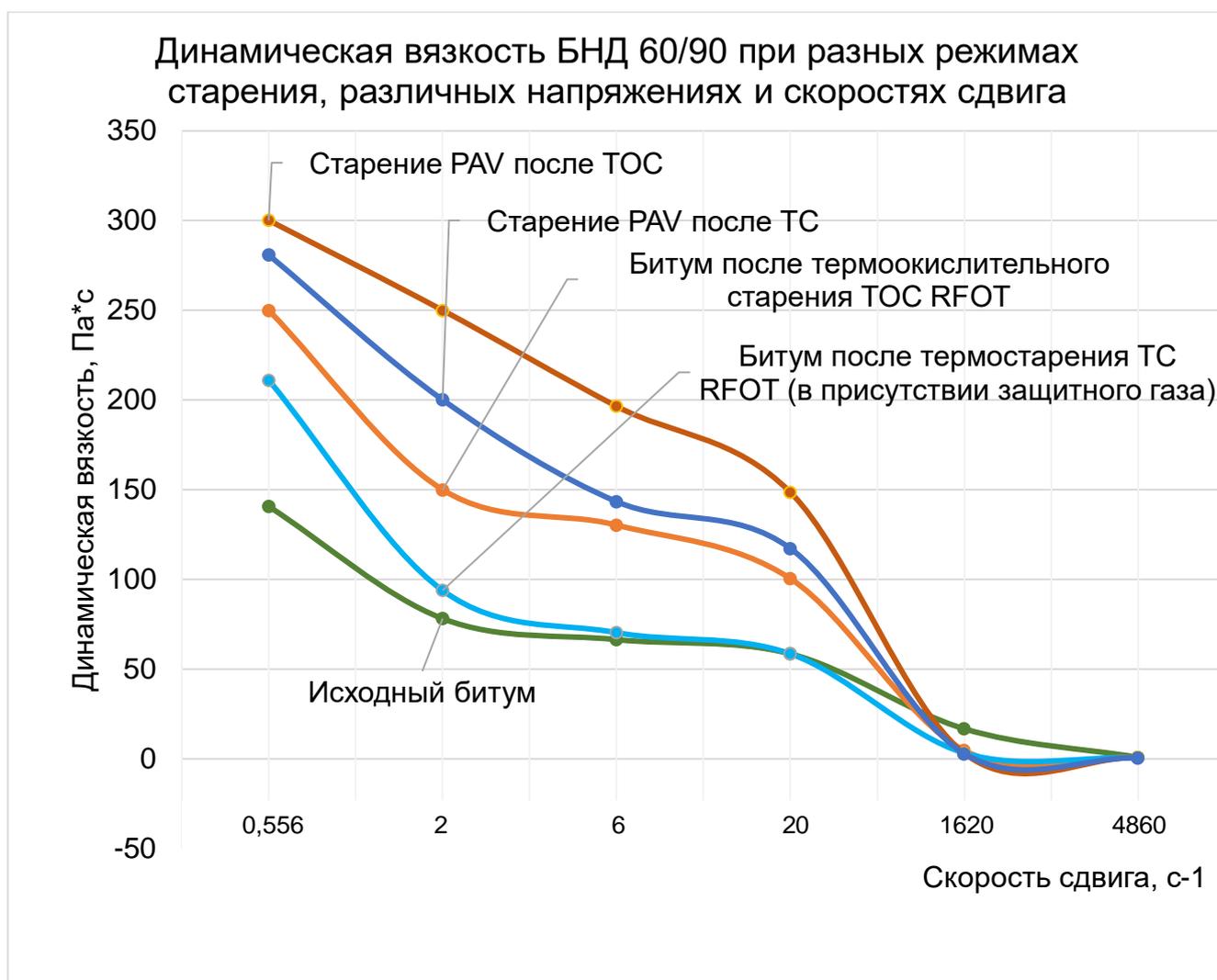


Рисунок 3.9 – Динамическая вязкость битума при разных режимах старения в зависимости от скорости сдвига

С повышением скорости сдвига динамические вязкости исследованных образцов поэтапно снижаются, а при скорости $\dot{\gamma} \geq 1620 \text{ с}^{-1}$ различаются незначительно.

Однако, с учетом того, что битум, являясь полимерным расплавом, отличается неньютоновским течением жидкости, при котором вязкость вещества зависит от градиента скорости, что подробно исследовано для битумным вяжущих в ряде работ [100, 111], следует говорить преимущественно не о динамической, а эффективной вязкости битума. Если первая просто характеризует вязкотекучие свойства битума с прямо пропорциональной зависимостью: чем выше динамическая вязкость, тем более вязким является

вещество, то эффективная вязкость – это вязкость с самыми эффективными характеристиками скорости сдвига, температуры. Такое более глубокое понимание реологии битумных позволяет более корректно оценивать степень структурных изменений при термоокислительном старении и термостарении и описать изменения вязкости рядом уравнений.

Прежде всего нужно обратиться к степенному закону для неньютоновских жидкостей, описываемому моделью британского химика Оствальда-де Ваале, согласно которому напряжение сдвига τ даётся формулой (известно, что формула этого ученого дает меньшую погрешность) [48, 83]:

$$\tau = K * (\Delta u / \Delta y)^n \quad (3.2)$$

K — это коэффициент густоты потока, Па*сⁿ;

$\Delta u / \Delta y$ — градиент скорости вдоль оси, перпендикулярной к плоскости сдвига слоёв жидкости, с⁻¹;

n — показатель поведения жидкости.

Тогда эффективная вязкость является функцией градиента скорости:

$$\eta_{\text{эфф}} = f(\tau) \quad (3.3)$$

$$\eta_{\text{эфф}} = K * (\Delta u / \Delta y)^{n-1} \quad (3.4)$$

Модель является условной, поскольку для реальных жидкостей эффективная вязкость не может бесконечно уменьшаться при росте градиента скорости. Имеются верхний и нижний пределы для $\eta_{\text{эфф}}$, которые зависят от фундаментальных физико-химических законов для вещества.

Эффективную вязкость ($\eta_{\text{эфф}}$) от напряжения сдвига (τ) в координатах экспоненциальной функции определим, как предлагается в работе Виноградова Г. В. [32]:

$$\lg \eta = f(\tau) \quad (3.5)$$

$$\eta_{\text{эфф}} = \eta_0 * \exp(-a*\tau), \quad (3.6)$$

где a – эмпирическая константа, η_0 – начальная вязкость, Па*с, имеющая огромное значение для полимерных систем, к которым относится и битум.

Применяя формулу 2.4, получим:

$$\eta_{\text{эфф}} = \eta_0 * \exp(-a * K * (\Delta u / \Delta y)^{n-1}) \quad (3.7)$$

Или в логарифмическом виде:

$$\lg \eta_{\text{эфф}} = \lg \eta_0 - a * \tau, \quad (3.8)$$

$$\lg \eta_{\text{эфф}} = \lg \eta_0 - a * K * (\Delta u / \Delta y)^{n-1}, \quad (3.9)$$

При напряжении сдвига $\tau \rightarrow 0$ предел текучести $\tau_T = \eta_0$, то есть нулевой вязкости, тогда эффективная вязкость определяется по формуле:

$$\lg \eta = \lg \eta_0 - a * K * (\Delta u / \Delta y)^{n-1} \quad (3.10)$$

Если скорость сдвига $\gamma' = 0$, то значение напряжения сдвига $\tau = \tau_T$. Таким образом, τ_T — это предел текучести, то есть критическое напряжение сдвига, приводящее к хрупкому разрушению битума.

При этом пластическая деформация самопроизвольно продолжается. В данном случае это прямой показатель старения битумного вяжущего, поскольку происходящий в нем коагуляционный процесс наращивания количества асфальтенов в изначальной битумной эмульсии приводит к критическим деформациям и разрушению.

Если приравнять вязкость при максимальной скорости сдвига ($\gamma' = 4860 \text{ c}^{-1}$) к вязкости полного разрушения структуры битумного вяжущего η_r , то эффективную вязкость в широком диапазоне сдвига описать все тем же уравнением Оствальда-де Ваале, как разность между начальной вязкостью и вязкостью при максимальной скорости сдвига, скорректированной на скорость разрушения:

$$\lg \eta = \lg \eta_1 - k_{\Delta r} * \lg \gamma', \quad (3.11)$$

где η_1 — вязкость при скорости сдвига $\gamma' = 1 \text{ c}^{-1}$, а $k_{\Delta r}$ — коэффициент, отражающий скорость разрушения (определяется эмпирически).

Как следует из таблицы 3.6, **эффективная вязкость битума, состаренного в инертной среде, изменилась значительно меньше относительно показателей для исходного битума, чем приращение вязкости в присутствии кислорода. Это еще раз доказывает, что при ТОС не только интенсивнее растет вязкость, но и скорость его разрушения также увеличивается быстрее,**

то есть:

$$|k_{\Delta r} \text{TOC}| > |k_{\Delta r} \text{TC}| \quad (3.12)$$

Таблица 3.6 – Изменение эффективной вязкости битума $\eta_{\text{эфф}}$ при ТС и ТОС в широком диапазоне скоростей сдвига

Образцы битума БНД 60/90	Вязкость, Па*с		Эффективная вязкость в полном диапазоне сдвига $\eta_{\text{эфф}}$ по уравнению де Ваале ($\lg \eta_{\text{эфф}} = \lg \eta_1 - k_{\Delta r} \cdot \lg \gamma'$, $\gamma' = 2 \dots 1620 \text{ c}^{-1}$)	Коэффициент корреляции
	Начальная вязкость ($\gamma' = 1 \text{ c}^{-1}$) η_1	Эффективная вязкость при максимальной скорости сдвига – полном разрушении вяжущего ($\gamma' = 1620 \text{ c}^{-1}$), η_m		
1. Исходный	140,8	1,1	$\lg \eta = 2,022 - 0,436\gamma'$	0,994
Состаренный по ТС (инертная среда)	280,9	0,9	$\lg \eta = 1,937 - 0,414\gamma'$	0,983
ТОС (кислородосодержащая среда)	300,2	0,7	$\lg \eta = 3,247 - 0,867\gamma'$	0,985

Отметим, что при увеличении скорости сдвига те структуры, которые остались неразрушенными, начинают укреплять битум при термостарении. При термоокислении структура разрушается быстрее, а вязкость имеет симбатную, то есть схожую зависимость с пределами текучести. Сделаем вывод, что **критическое напряжение сдвига (предел текучести) исходного битума больше предела текучести для термоокисленного битума, но меньше предела текучести для битума после термостарения, поскольку неразрушенные коагуляционные структуры упрочняются при ТС и разрушаются при ТОС:**

$$\eta_{\text{ТОС}} < \eta_{\text{исх}} < \eta_{\text{ТС}} \quad (3.13)$$

$$\tau_{\text{Т/ТОС}} < \tau_{\text{Т/исх}} < \tau_{\text{Т/ТС}} \quad (3.14)$$

Это подтверждается регрессионными моделями, где в качестве Y , то есть зависимой переменной выступает предел текучести, а варьируемым X – изменение вязкости неразрушенной структуры:

$$\tau_{\text{Т/ТС}} = \tau_{\text{Т/исх}} + k_{\text{ТС}} (\eta_{0/\text{ТС}} - \eta_{0/\text{исх}}) \quad (3.15)$$

$$\tau_{т/тос} = \tau_{т/исх} - k_{тос} (\eta_{0/исх/тос} - \eta_{0/тос}) \quad (3.16)$$

Согласно [110] это говорит о следующем: формирующаяся коагуляционная структура становится прочнее при термостарении (в присутствии защитного газа) и разрушается при термоокислительных процессах (в присутствии кислорода воздуха).

Определение сдвиговой и усталостной устойчивости сдвиговым реометром DSR по ГОСТ Р 58400.10-2019.

Данные испытания относятся к определению широкого диапазона деформационных способностей битума. Такие серьезные исследования проводят на динамическом реометре, где возможно исследовать степень сопротивления вяжущего механическому прогибу, то есть определить степень колееобразования (сдвиговую устойчивость) и сопротивление внутренним усталостным напряжениям [104, 107]. Для определения этих параметров применяют такой показатель, как комплексный модуль G^* – модуль жесткости, то есть сопротивляемость деформации вяжущего, если к нему применяется многократный синусоидальный сдвиг.

$$G^* = \tau/\gamma, \quad (3.17)$$

где τ – максимальное напряжение при сдвиге,

γ – максимальная деформация.

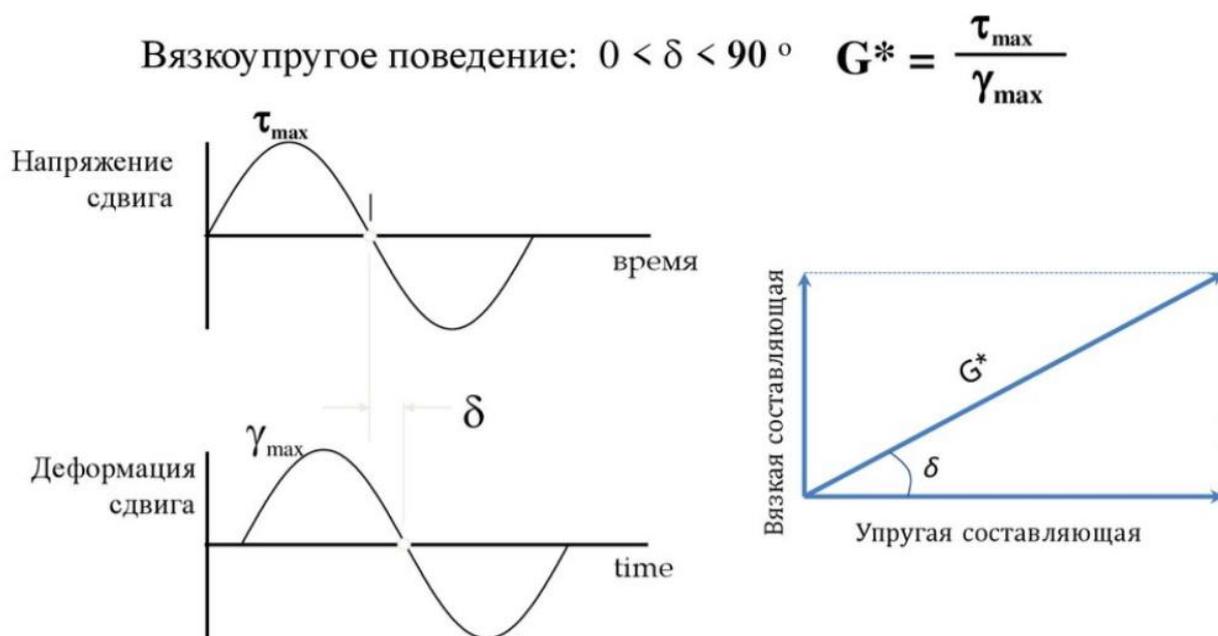


Рисунок 3.10 – Вязкоупругое поведение битума

Если два вяжущих имеют равное значение G^* , но первый восстанавливается после деформации быстрее, чем второй, то он имеет лучшие упругие свойства. Про такой битум говорят, что он имеет меньший фазовый угол – меньшее отставание по времени восстановления до первоначального состояния. Фазовый угол обозначается буквой δ . Чем ближе δ к 90° , тем ближе битум к агрегатному состоянию жидкости. Чем ближе δ к 0° , тем более упругим телом является вяжущее. Соответственно, при старении вязкость битума растет, соответственно, модуль жесткости будет повышаться [58, 59]. Наглядно это представлено на рисунке 3.10. Таким образом, требуемые характеристики определяют по формулам:

$$\text{Сдвиговая устойчивость} = G^*/\sin\delta \quad (3.18)$$

$$\text{Усталостная устойчивость} = G^* \cdot \sin\delta \quad (3.19)$$

Определено, что сдвиговую устойчивость (сопротивление колееобразованию) имеет смысл определять после RTFOT-состаривания, а усталостную – после PAV-состаривания, имитирующего длительную эксплуатацию дорожного покрытия [48, 50].

Для такого исследования эксперименты проводились в 5 этапов, то есть для исходного битума, а также поэтапно после двух состариваний, как это указано в ГОСТ Р 58400.10-2019.

К образцам битума применялась деформация на сдвиговом реометре в течение 10 циклов с переменной знака синусоидальной нагрузки. Система автоматически регистрировала данные экспериментов. Верхний предел эксплуатационной температуры для БНД 60/90 – 70 °С.

Разумеется, после состаривания битум стремится к твердому телу. Его вязкость повышается. Значение сдвиговой устойчивости растет, то есть сопротивление колееобразованию увеличивается. RTFOT-состаривание в присутствии инертной среды было замедлено, соответственно, значения сдвиговой устойчивости меньше, чем при обычном старении в кислородосодержащей среде. Показатели всех образцов отвечают нормам и требованиям ГОСТ.

Однако, после длительной эксплуатации, то есть после PAV-состаривания показатели образцов, предварительно состаренных по RTFOT без кислородного окисления, показали пусть и незначительные, но лучшие результаты. Кроме того, показатели усталостной устойчивости для большей части образцов БНД 60/90 после стандартного PAV-состаривания превысила требуемый предел в 5000 кПа, а при состаривании в инертной среде только 2 образца вышли за данные пределы.

Данные приведены в таблицах 3.7, 3.8 и на диаграммах (рис. 3.11-3.14).

Таблица 3.7 – Сдвиговая и усталостная устойчивость битума БНД 60/90, состаренного в разных газовых средах

Номер образца	Норматив сдвиговой устойчивости $G^*/\sin\delta$, при 10 рад/с, кПа		Сдвиговая устойчивость $G^*/\sin\delta$, при 10 рад/с, кПа			Норматив усталостной устойчивости $G^*\cdot\sin\delta$, при 10 рад/с, кПа после PAV состаривания	Усталостная устойчивость $G^*\cdot\sin\delta$, при 10 рад/с, кПа	
			Исходного товарного БНД 60/90	После ТОС RTFOT	После ТС RTFOT		После PAV (образцы состарены по ТОС RTFOT)	После PAV (образцы состарены по ТС RTFOT)
	для товарного БНД 60/90	после RTFOT состаривания						
Образец 1	Не менее 1	Не менее 2,2	1,64	3,51	2,83	Не более 5000	5595	4366
Образец 2	Не менее 1	Не менее 2,2	1,50	3,18	2,77	Не более 5000	5565	5006
Образец 3	Не менее 1	Не менее 2,2	1,20	3,14	2,84	Не более 5000	6616	5100
Образец 4	Не менее 1	Не менее 2,2	2,10	4,27	3,12	Не более 5000	5780	4563
Образец 5	Не менее 1	Не менее 2,2	1,48	3,10	2,79	Не более 5000	5734	4222
Образец 6	Не менее 1	Не менее 2,2	2,21	3,81	2,56	Не более 5000	4986	4167

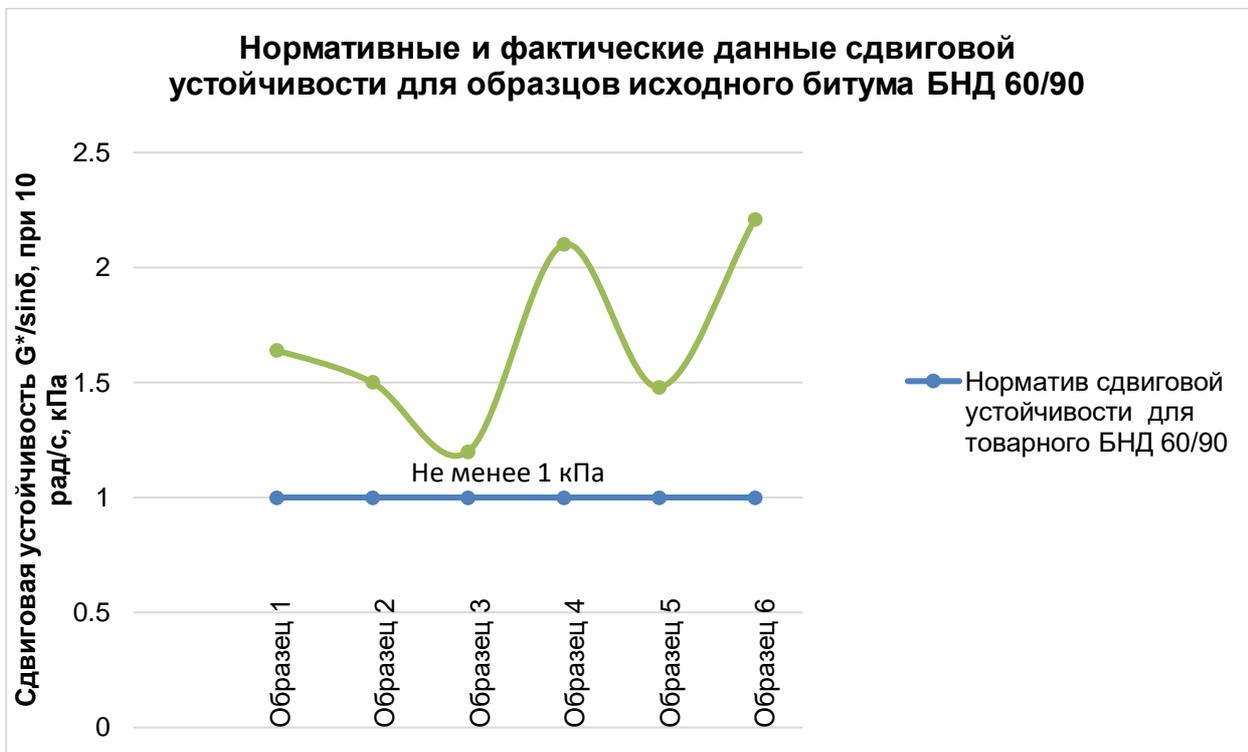


Рисунок 3.11 – Нормативные и фактические данные сдвиговой устойчивости для образцов исходного битума БНД 60/90

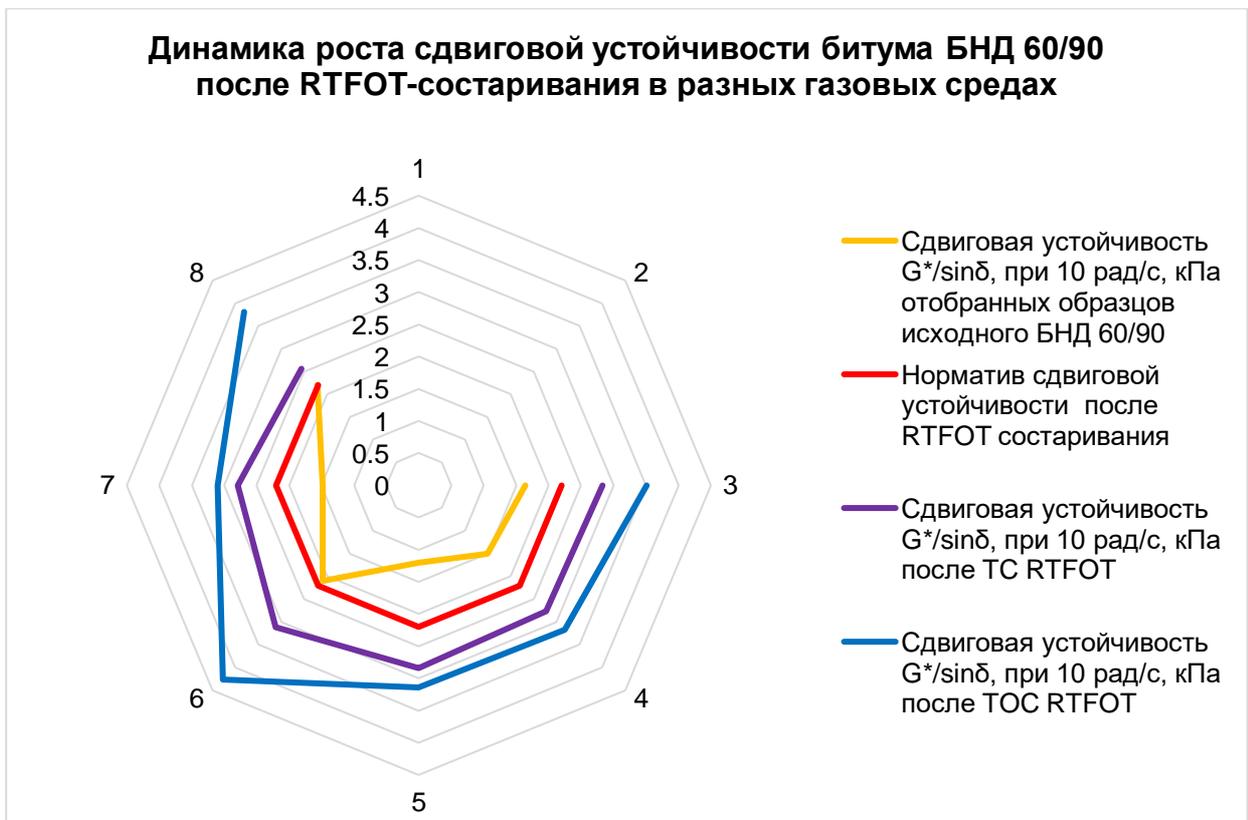


Рисунок 3.12 – Динамика роста сдвиговой устойчивости битума БНД 60/90 после RTFOT-состаривания в разных газовых средах

Усталостная устойчивость битума БНД 60/90 после PAV-состаривания образцов, предварительно состаренных по RTFOT в разных газовых средах

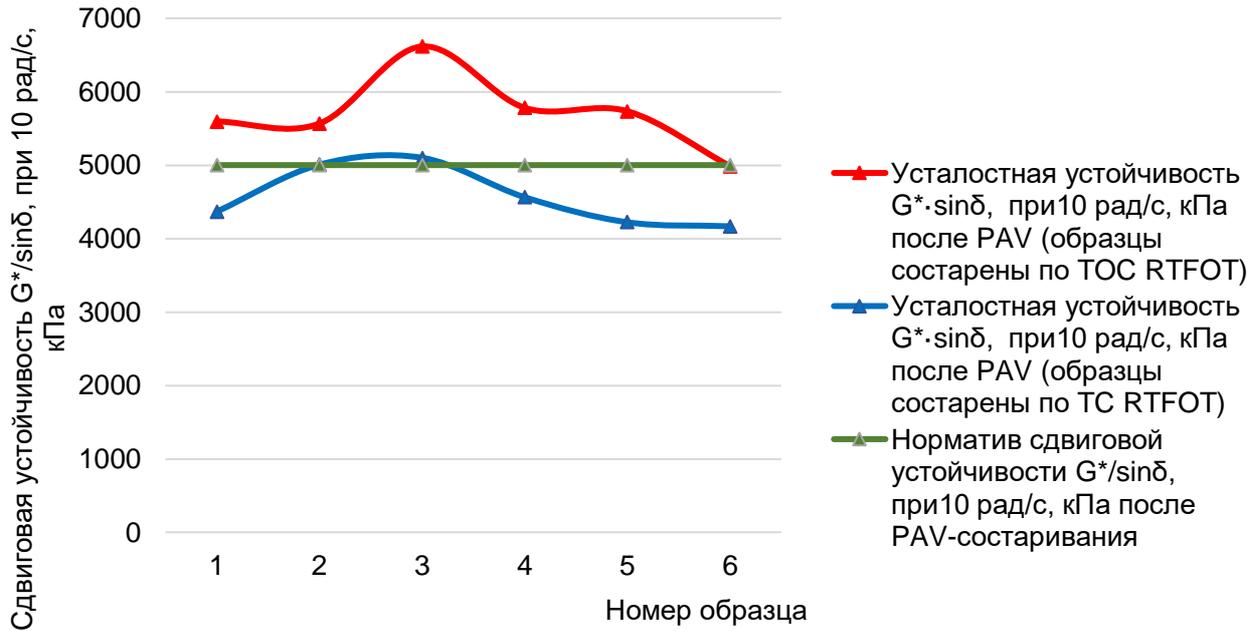


Рисунок 3.13 – Усталостная устойчивость битума БНД 60/90 после PAV-для образцов, предварительно состаренных по RTFOT в разных газовых средах

Изменение фазового угла при состаривании битума в разных газовых средах

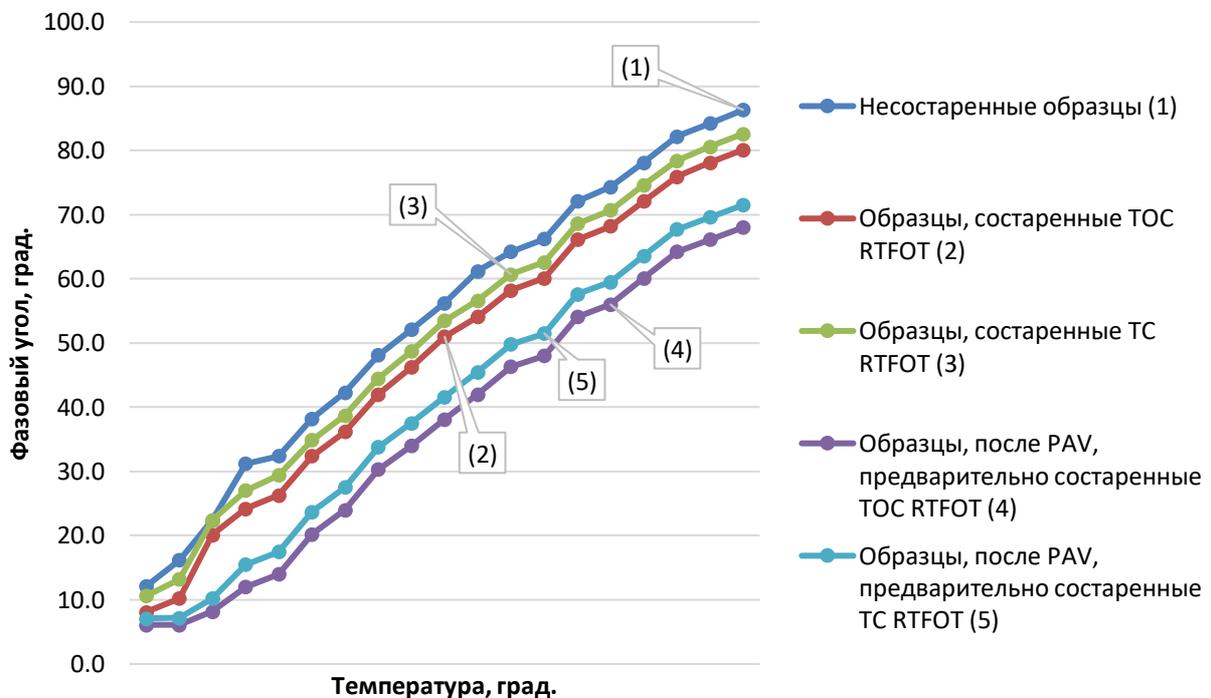


Рисунок 3.14 – Изменение фазового угла при состаривании битума в разных газовых средах

Таблица 3.8 – Фазовый угол δ при различных условиях старения БНД 60/90

Несостаренные образцы (1)	Образцы, состаренные ТОС RTFOT (2)	Образцы, состаренные ТС RTFOT (3)	Образцы, после PAV, предварительно состаренные ТОС RTFOT (4)	Образцы, после PAV, предварительно состаренные ТС RTFOT (5)
12,1	8,1	10,6	6,1	7,1
16,2	10,2	13,2	6,1	7,2
22,4	20,1	22,4	8,2	10,2
31,2	24,2	27,0	12,0	15,5
32,4	26,3	29,4	14,0	17,5
38,2	32,4	34,9	20,2	23,7
42,3	36,2	38,7	24,0	27,5
48,1	42,0	44,5	30,3	33,8
52,1	46,2	48,7	34,0	37,5
56,2	51,0	53,5	38,1	41,6
61,2	54,1	56,6	42,0	45,5
64,2	58,2	60,7	46,3	49,8
66,2	60,1	62,6	48,0	51,5
72,1	66,1	68,6	54,1	57,6
74,3	68,2	70,7	56,0	59,5
78,1	72,1	74,6	60,1	63,6
82,2	75,9	78,4	64,2	67,7
84,2	78,1	80,6	66,1	69,6
86,3	80,1	82,6	68,0	71,5

Выводы:

Подытожим, что комплексный модуль жесткости G^* при ТОС RTFOT вырос примерно в 2 раза, а после PAV – в 6500-7000 раз. При ТС RTFOT состаривании без кислорода G^* меньше примерно на 20%.

Усталостная устойчивость после состаривания в инертной среде показала лучший результат примерно на 20%.

Фазовый угол при традиционном кислородном состаривании уменьшается от показателей исходного битума в среднем на 4° - 6° после RTFOT и на 10° - 16° после PAV. Это изменение фазового угла менее выражено при состаривании в инертной среде в среднем на 2 - 3° .

Исследование жесткости и ползучести битума на реометре BBR путем изгиба битумной балочки (по ГОСТ Р 58400.8-2019)

Данное исследование проводят в связи с тем, что со временем механическое воздействие движущегося транспорта и влияние низких температур вызывает в дорожном покрытии растягивающие напряжения. Из-за этого в дорожной одежде возникают поверхностные трещины. Для имитации этого процесса проводят испытания на специальном реометре. В данном случае проводились опыты на реометре с изгибом балки BBR 20-44220 по принципу, как показано на рисунке 3.15.

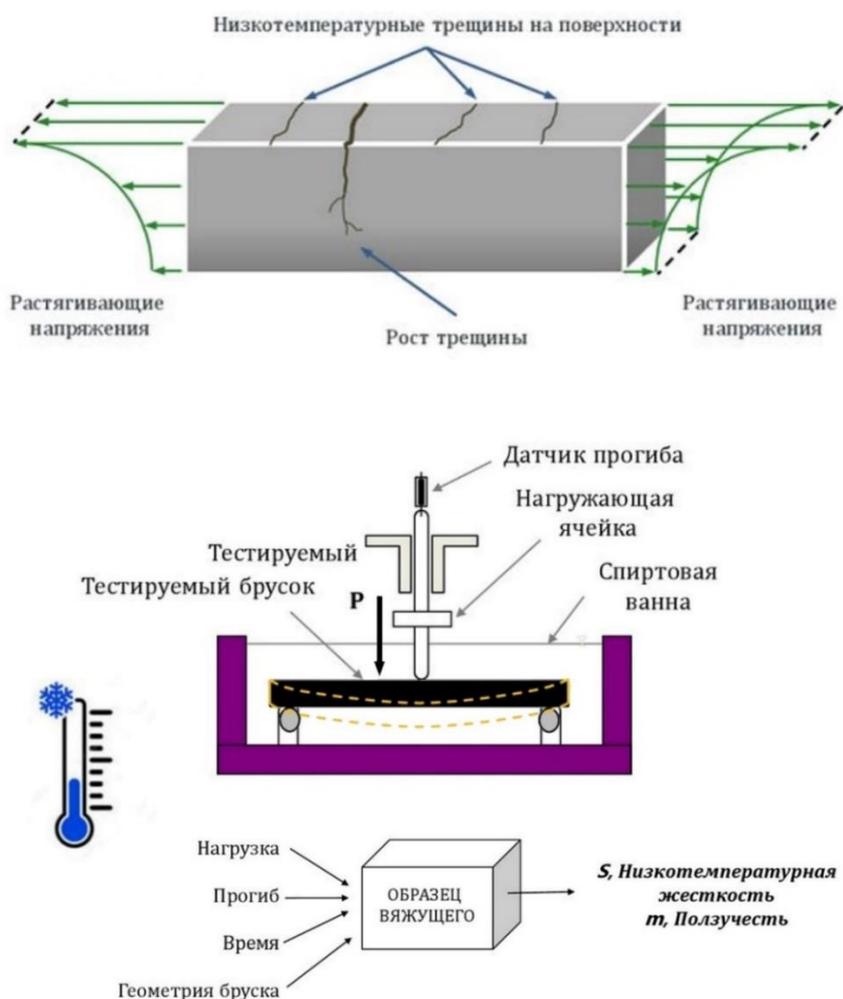


Рисунок 3.15 – Принцип испытания на жесткость и ползучесть образцов битума БНД 60/90

Жесткость битумного вяжущего (обозначается, как S) – это реологическая характеристика, которая отражает, насколько битум при отрицательной температуре способен к сопротивлению механическому деформированию.

$$S = N_{\max}/P_{\max}, \quad (3.20)$$

где N_{\max} – максимальное напряжение,

P_{\max} – максимальный прогиб балки.

Ползучесть – это характеристика, которая отражает степень деформации битумного вяжущего, возникающей со временем при нагрузке. Ползучесть выражается характеристикой m – скоростью отклика битумного вяжущего на изменение температуры.

И жесткость, и ползучесть – это прежде всего временные характеристики. У свежего асфальта жесткость низкая, а ползучесть очень высокая, поскольку он недоуплотнен. Далее, в период набора прочности дорожного полотна, оба показателя достигают определенного константного значения и меняются в течение многих лет незначительно. Наконец, в конце жизненного цикла дорожного покрытия ползучесть, то есть деформативность, начинает резко увеличиваться, катастрофически возрастать, а жесткость – падать. Возникают поверхностные трещины. Асфальтобетон разрушается. Таким образом, соотношение жесткости и ползучести должно быть оптимальным, то есть жесткость не должна превышать определенного значения, но оставаться как можно дольше значительной, а ползучесть – оставаться на уровне, когда покрытие способно к обратимым деформациям, но и не снижаться до той степени, когда покрытие станет растрескиваться. Очевидно, что нижний эксплуатационный предел температур приводит к ускоренному трещинообразованию покрытия.

На предварительно сформированные битумные бруски образцов БНД 60/90 (исходных и состаренных по методу PAV после RTFOT в кислородосодержащей и инертной средах, поскольку речь идет именно об эксплуатационной характеристике) при низкой температуре с помощью

нагружающей ячейки оказывалось вертикальное давление в течение 240 сек, чтобы вызвать прогиб балки. Величина прогиба фиксировалась датчиком.

Таблица 3.9 – Данные испытаний на жесткость и ползучесть для битума БНД 60/90 после состаривания в разных газовых средах

T Время, сек	P Нагрузка, мН	d Прогиб балочки, мм	Измеренная жесткость, мПа	Оцененная жесткость, мПа	Отклонение, %	m Скорость отклика БНД 60/90 на Δt
ТОС-состаривание						
0,0	21,9	0,554	-	-	-	-
0,5	1027,2	0,620	-	-	-	-
8,0	986,2	0,674	670,472	670,676	0,03	0,211
15,0	986,3	0,692	583,082	582,850	0,04	0,236
30,0	986,3	0,718	490,651	490,425	0,05	0,263
60,0	981,9	0,752	404,596	404,987	0,10	0,290
120,0	982,0	0,798	328,341	328,217	0,04	0,317
240,0	982,3	0,861	261,060	261,055	0,00	0,344
250,0	31,6	0,748	-	-	-	-
ТС-состаривание						
0,0	21,9	0,674	-	-	-	-
0,5	1027,2	0,74	-	-	-	-
8,0	986,2	0,794	559,376	559,676	0,05	0,211
15,0	986,3	0,812	471,56	471,85	0,06	0,236
30,0	986,3	0,838	379,225	379,425	0,05	0,263
60,0	981,9	0,872	293,887	293,987	0,03	0,29
120,0	982,0	0,918	217,568	217,217	0,16	0,317
240,0	982,3	0,981	150,125	150,055	0,05	0,344
250,0	31,6	0,868	-	-	-	-

Чтобы выявить жесткость при ползучести, нужно зафиксировать результаты при минимальной температуре через 2 часа после начала нагрузки. Западными учеными было установлено, что точно такой же результат даст исследование уже через 60 секунд, если поднять температуру эксперимента

всего на 10 градусов. Таким образом, удалось ускорить проведение данного исследования в разы.

Данные испытания позволяют определить жесткость, являющуюся зависимостью от математических степеней, то есть логарифмов жесткости $\log S(t)$ и времени нагрузки $\log t$, если время составляет 60 секунд ($t=60$ с.).

Таким образом, по нормативам образцы должны удовлетворять одновременно ряду условий:

$$S \leq 300 \text{ МПа}, m \geq 0,3, t_{\text{нагр.}} = 60 \text{ сек.} \quad (3.21)$$

С учетом таких условий определяется критическая температура ниже нуля, при которой образец еще способен к снятию напряжения, а далее наступает растрескивание. Результаты исследования приведены в таблице 3.9 и на рисунках 3.16-3.18.

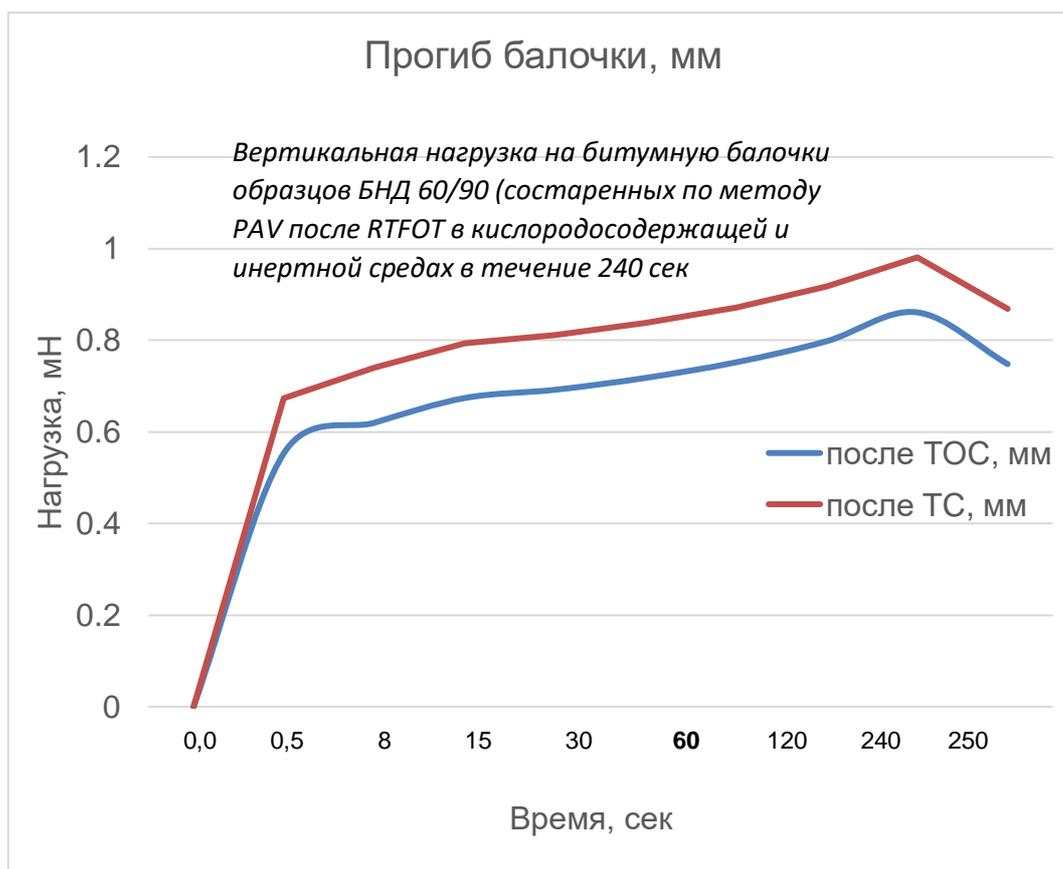


Рисунок 3.16 – Прогиб балочки при испытании на реометре ВВР образцов битума БНД 60/90 после состаривания в разных газовых средах

Сопротивляемость нагрузкам (жесткость) битума БНД 60/90 в зависимости от времени и степени прогиба балочки на реометре BBR

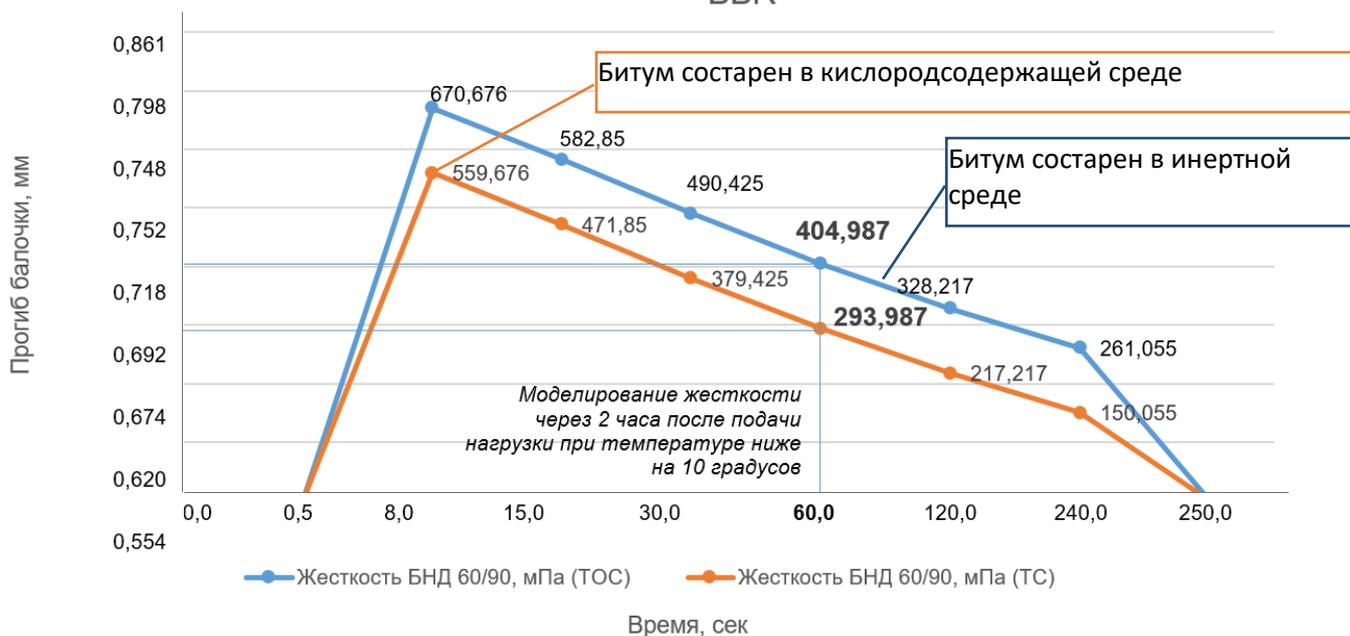


Рисунок 3.17 – Жесткость балочки при испытании образцов БНД 60/90

Как видно из графика на рис.3.17, битумная балочка, сформированная из вяжущего при ТС-состаривании сильнее сопротивляется нагружению.

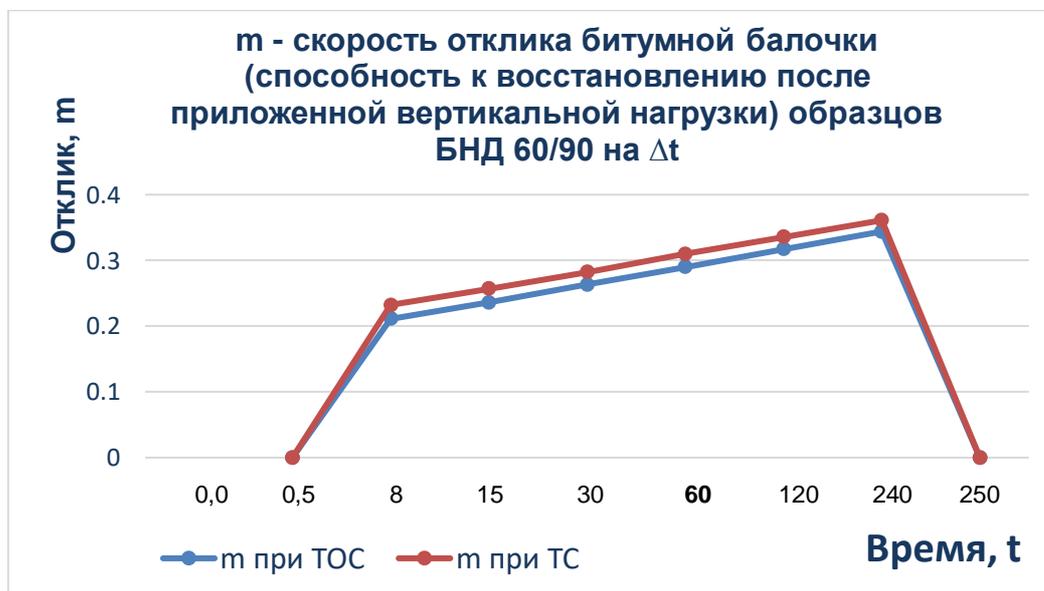


Рисунок 3.18 – Скорость отклика при испытании образцов БНД 60/90

Выводы:

Можно сделать вывод, что при низких температурных режимах RTFOT-состаривание в кислородосодержащей среде приводит к росту жесткости битума примерно 1,5 раза, а PAV-состаривание после ТОС RTFOT закономерно вызывает рост жесткости до 2,5-3 раз. В инертной среде этот показатель меньше примерно на 100 МПа (в среднем на 30 %).

Соответственно прогиб балочки для более жесткого битума меньше, его сопротивление деформации выше. Однако надо понимать, что потеря пластичных свойств при низких температурах приведет к ускоренному разрушению по причине роста хрупкости.

Скорость отклика образцов БНД 60/90 на изменение температуры после состаривания в инертной среде закономерно выше, так как возможность для релаксации такого битума выше, чем более жесткого.

3.2. Деформационная устойчивость асфальтобетона в зависимости от условий старения вяжущего

Как уже неоднократно говорилось, термоокисление битума характеризуется последовательным превращением масел в смолы, а смол – в асфальтены. Этот процесс происходит как при старении отдельно взятого битума, так и при смешивании асфальтобетонной смеси. Причем, этот процесс происходит еще интенсивнее за счет распространения вяжущего по поверхности минеральной основы, а также проникновения битума внутрь в поры минерального порошка.

При этом формируется достаточно такая структура из асфальтенов, которую нетрудно деформировать, поскольку материал потерял часть пластических свойств в результате ускоренного состаривания.

Целью данного исследования было замедление старения вяжущего при производстве асфальтобетонной смеси путем исключения доступа кислорода воздуха за счет вытеснения его защитными газовыми средами. Чтобы сделать

окончательные выводы по поводу эффективности данной методики, были проведены опыты, в ходе которых в лабораторном лопастном смесителе были проведены замесы для формирования образцов асфальтобетона на основе образцов битумного вяжущего, состаренных как по RTFOT в кислородосодержащей среде, так и после термостарения в инертной среде.

Согласно сбалансированным методам проектирования асфальтобетонных смесей из всех возможных исследований в лабораторных условиях до проведения натуральных испытаний были проведены исследования на:

- колееобразование асфальтобетона по ГОСТ Р 58406.3-2020 – после краткосрочного старения битума.
- трещиностойкость, то есть предел прочности при растяжении при расколе (после циклов «замораживание-оттаивание» по ГОСТ 12801-98, ГОСТ Р 58401.18 – 2019), а также водостойкости – после долгосрочного старения.

Исследование на колееобразование асфальтобетона с помощью установки на колееобразование 20-4000 + 4001 по ГОСТ Р 58406.3-2020.

Данное испытание проводилось в лабораторных условиях на установке, которая позволяет проводить испытания образцов асфальтобетона на образование колеи от движущегося транспорта. Поскольку подать защитный газ в лабораторный асфальтобетонный смеситель было невозможно, было принято решение использовать битум, ранее кратковременно состаренный в разных газовых средах. Конечно, при лабораторном замешивании асфальтобетона старение продолжилось, но важно было определить, будет ли разница в качестве покрытия при различно состаренном вяжущем. Таким образом, провели испытание на колееобразование асфальтобетонных плит, сформованных с добавлением:

- исходного вяжущего;
- вяжущего, кратковременно состаренного при доступе кислорода;
- вяжущего, кратковременно состаренного в инертной среде.

Для этого использовалась система «Infratest», которая позволяет проводить 10 тысяч циклов прокатывания колеса по поверхности испытуемого дорожного покрытия, имитируя движение транспорта. 1 цикл равен 2 движениям колеса вправо и влево. Результаты испытания фиксировались программой.

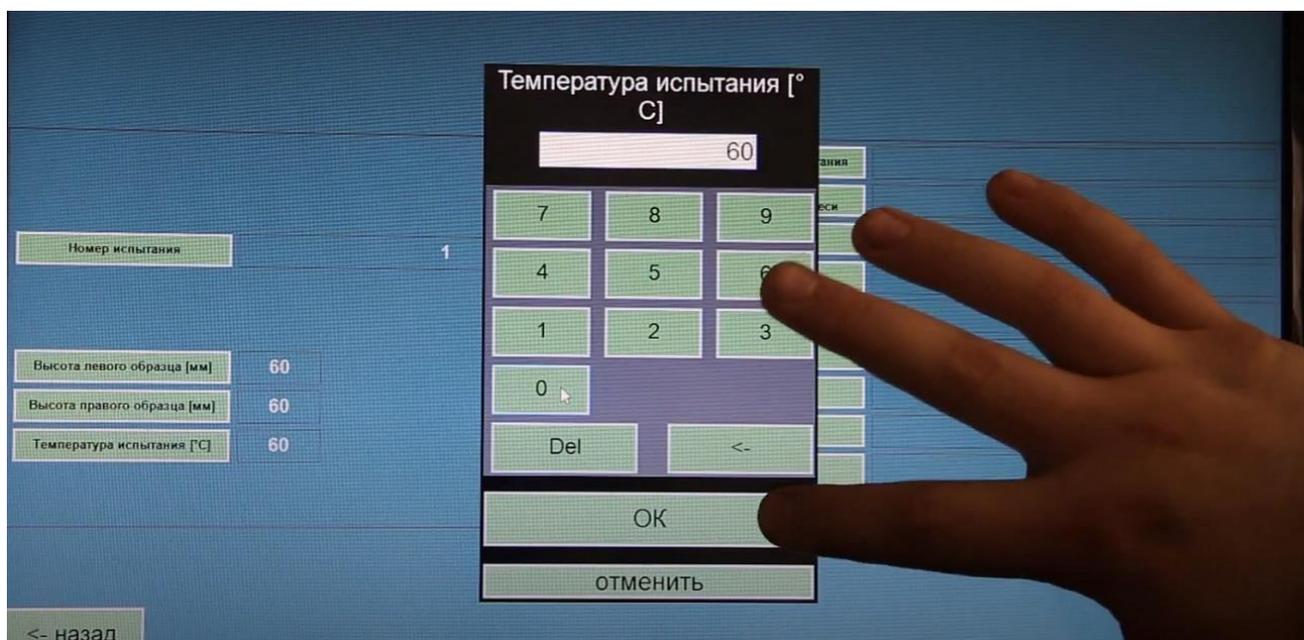


Рисунок 3.19 – Ввод температуры испытания на колееобразование



Рисунок 3.20 – Нагрузка на образцы при испытании на колееобразование

X	Дата	Время	Имя
	18.07.2022	16:32	После ТОС RTFOT
	06.07.2022	12:56	ISPITANIE
	03.07.2022	09:10	Bitum после TC RTFOT2_isp
	01.07.2022	13:24	SHMA-20 RESTART
	01.07.2022	09:10	Bitum после TC RTFOT1

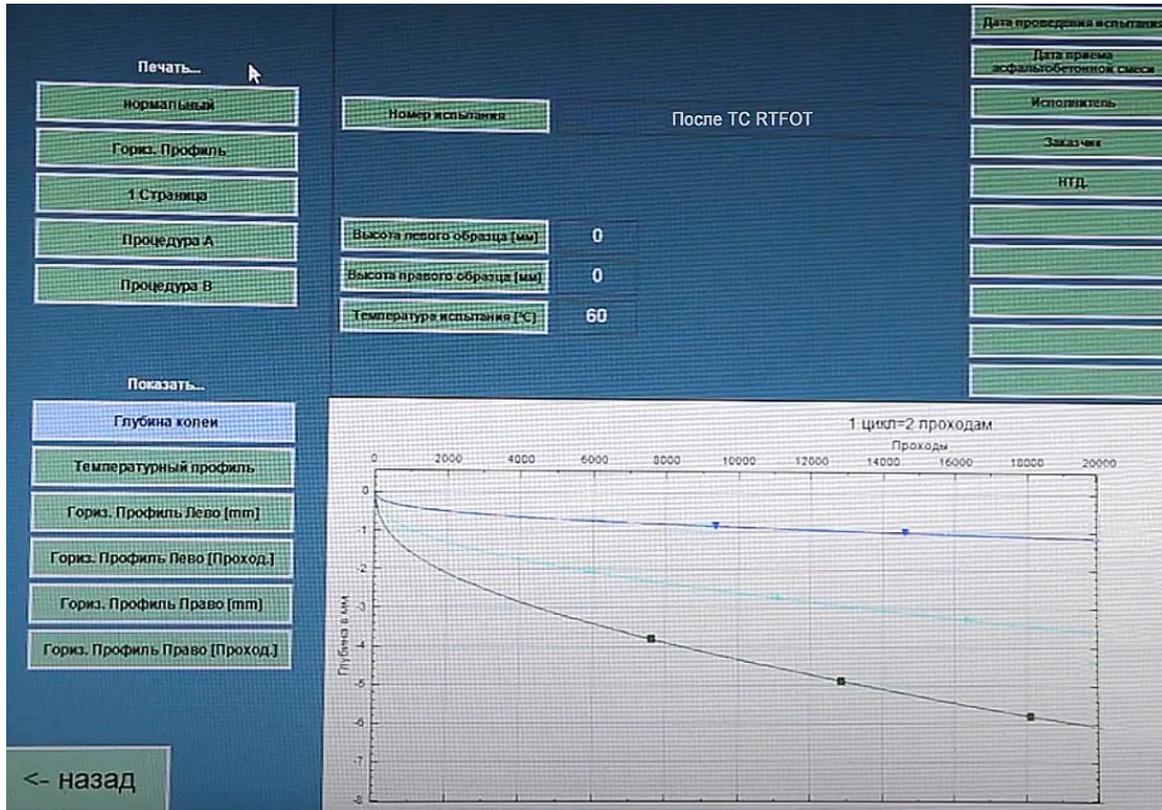


Рисунок 3.21 – Вывод данных при проведении испытаний на колеобразование асфальтобетона на основе битума БНД 60/90 после состаривания вяжущего в разных газовых средах

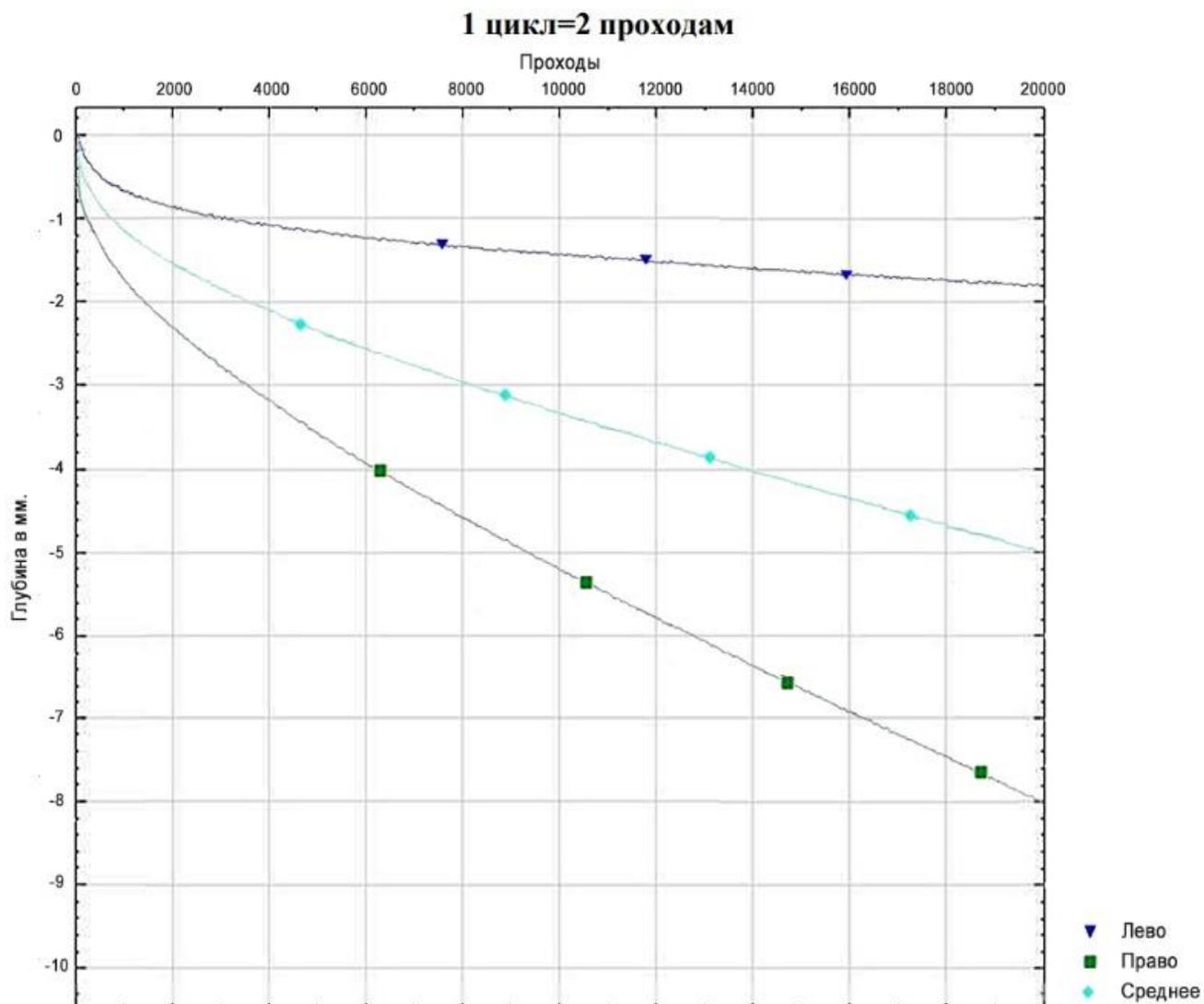


Рисунок 3.22 – График зависимости глубины колеи от количества циклов (проходов) нагруженного колеса для образцов асфальтобетона из исходного битума БНД 60/90

Угол наклона кривой колесобразования WTS определяют по формуле:

$$WTS = (d_{10000} - d_{5000}) / 5, \quad (3.22)$$

где d_{10000} – глубина после 10000 тысяч циклов, d_{5000} – глубина после 5000 тысяч циклов.

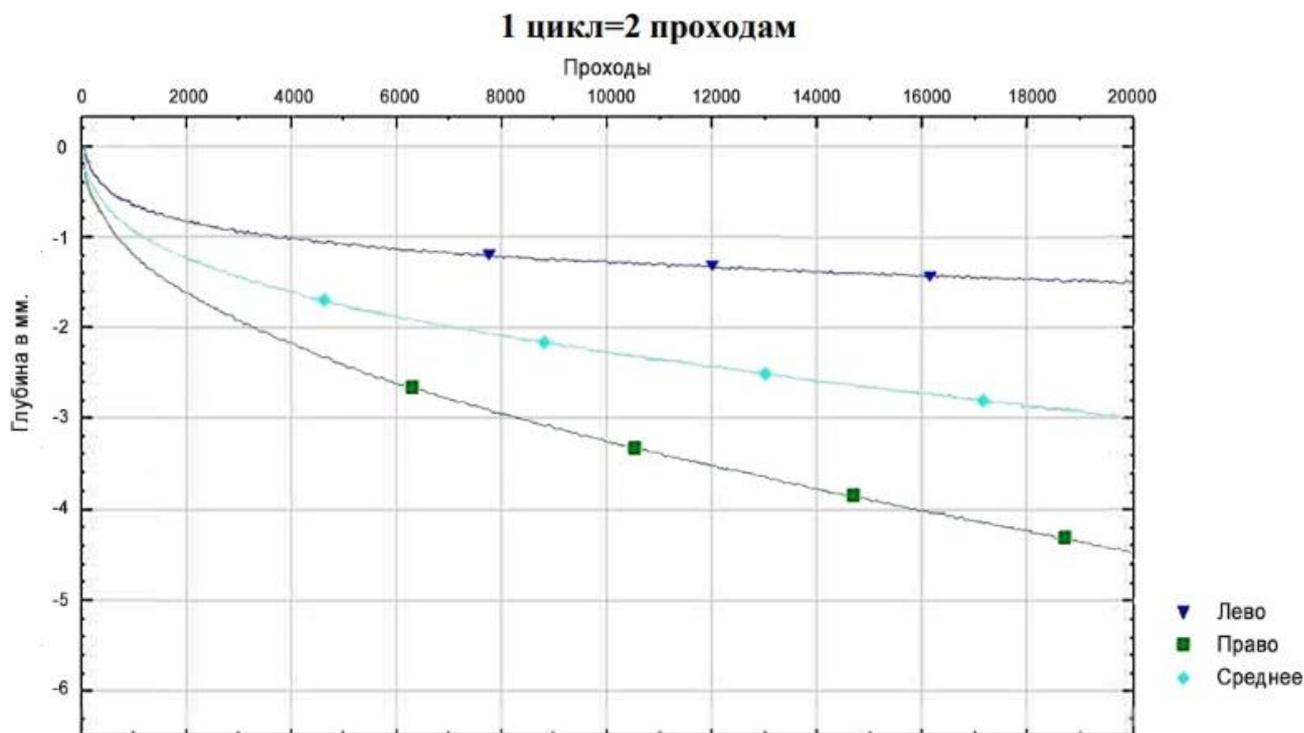


Рисунок 3.23 – График зависимости глубины колеи от количества циклов (проходов) нагруженного колеса для образцов асфальтобетона после ТОС RTFOT

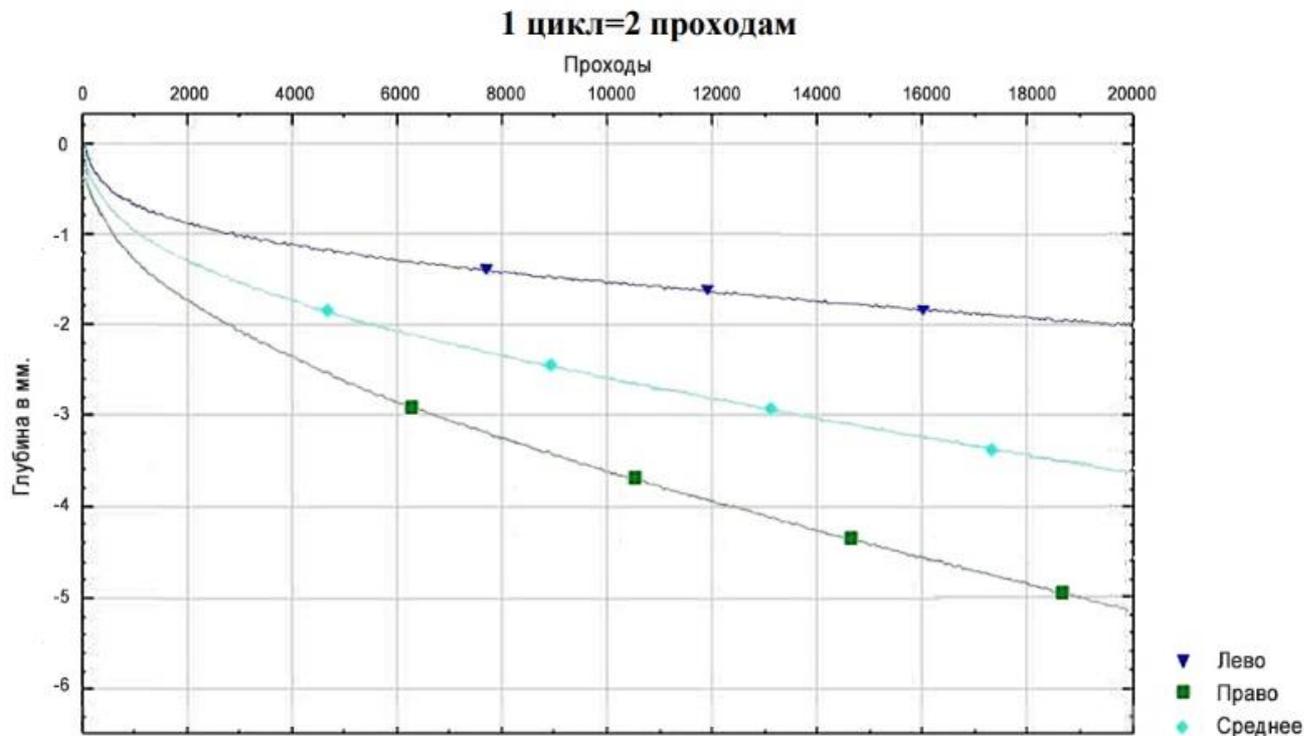


Рисунок 3.24 – График зависимости глубины колеи от количества циклов (проходов) нагруженного колеса для образцов асфальтобетона после ТС RTFOT

Таблица 3.10 – Данные по глубине колеи после проведения испытаний на колееобразование асфальтобетона

Образец	Асфальтобетон с исходным битумом БНД 60/90			Асфальтобетон с битумом после ТОС RTFOT			Асфальтобетон с битумом после ТС RTFOT		
	Глубина колеи	Среднее значение	Диапазон	Глубина колеи	Среднее значение	Диапазон	Глубина колеи	Среднее значение	Диапазон
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Лево	1,79	-4,90	6,22	1,76	-3,10	2,68	2,00	-3,61	3,21
Право	8,01			4,44			5,21		

Таблица 3.11 – Зависимость глубины колеи от прохода колес

Образец	Асфальтобетон с исходным битумом БНД 60/90			Асфальтобетон с битумом после ТОС RTFOT			Асфальтобетон с битумом после ТС RTFOT		
	Наклон прохода колес	Наклон прохода колес (линейная часть)	Глубина колеи	Наклон прохода колес	Наклон прохода колес (линейная часть)	Глубина колеи	Наклон прохода колес	Наклон прохода колес (линейная часть)	Глубина колеи
	[mm/ 1000 циклов]	[mm/ 1000 циклов]	[mm]	[mm/1000 циклов]	[mm/ 1000 циклов]	[mm]	[mm/ 1000 циклов]	[mm/ 1000 циклов]	[mm]
Лево	-0,04 (d10000- d5000)	-0,06 [d6400-d4400)	-1,8 (d10000)	-0,05 (d10000- d5000)	-0,05 (d7800-d5800)	-1,8 (d10000)	-0,08 (d10000- d5000)	-0,05 (d7600-d5600)	-2,0 (d10000)
Право	-0,48 (d10000-d5000)	-0,74 (d3800-d1800)	-8,0 (d10000)	-0,23 (d10000- d5000)	-0,22 (d8775-d6775)	-4,4 (d10000)	-0,32 (d10000- d5000)	-0,31 (d8350-d6325)	-5,2 (d10000)
Среднее значение	-0,26	-0,40	-4,9	-0,14	-0,13	-3,1	-0,20	-0,18	-3,6

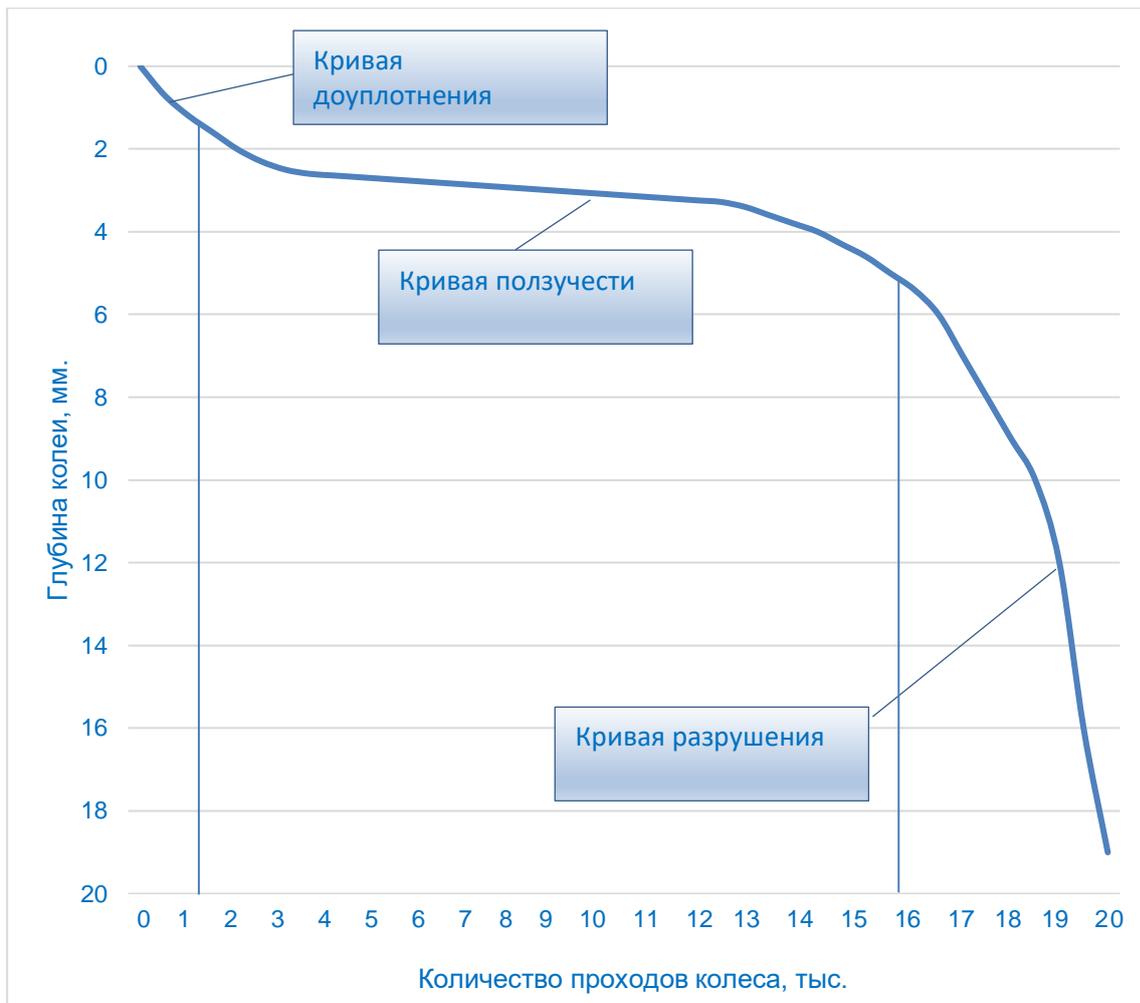


Рисунок 3.25 – График реальной эксплуатации покрытия

График реальной эксплуатации покрытия имеет несколько иной вид и учитывает все этапы жизненного цикла, которые делятся на 3 этапа (рис. 2.30). Во время первых примерно 1500 проходов асфальт доуплотняется, и эта часть графика представляет собой кривую доуплотнения, поскольку гираторный уплотнитель выполняет роль катка, но все остальное уплотнение асфальтобетона происходит за счет перемещения по нему дорожного транспорта. Надо учитывать, что именно доуплотнение начинает процесс так называемого отощения асфальтобетона, поскольку пленки вяжущего, распределенные по поверхности минеральной основы, становятся тоньше. Далее постепенно нарастает прочность и жесткость покрытия, эффект ползучести замедляется. График в этой основной части показывает процесс активной эксплуатации покрытия, кривая называется кривой ползучести. На последнем этапе жизненного цикла происходит

растрескивание асфальтобетона, ползучесть резко возрастает, и если колееобразование и другие разрушительные процессы превышают критические значения, то покрытие начинает разрушаться. В этом случае конечным проходам соответствует кривая разрушения.

Если сравнивать результаты проведенных испытаний на колееобразование, становится очевидным, что асфальтобетон с исходным вяжущим имеет гораздо более значительное колееобразование, чем состаренное вяжущее. Разница при состаривании в разных средах относительно невелика, однако данный опыт нельзя назвать полноценным, поскольку лабораторное смешивание проводилось в одинаковых условиях в присутствии кислорода. Дважды состаренный битум стал более вязким и дал большую плотность асфальтобетону, однако хрупкость и ползучесть такого асфальтобетона после длительной эксплуатации должна быть меньше, поскольку асфальтены хоть и увеличивают твердость битума, но значительно снижают его пластичность, увеличивают степень растрескивания. В конечном счете именно трещиностойкость материала характеризует его эксплуатационные свойства, таким образом, то, насколько хорошо состаренный асфальтобетон будет сопротивляться деформации при смене температур и воздействию осадков, и будет в конечном счете определять его качество.

Исследование на трещиностойкость асфальтобетона (предел прочности на растяжение при расколе), а также водостойкость с помощью испытательного прессы Uniframe 50 кН и приспособления к прессу 76-B0078/F по ГОСТ Р 58401.18.

Итак, трещиностойкость асфальтобетонного дорожного покрытия можно назвать главным качественным показателем, поскольку трещины возникают прежде всего при растяжении в результате снижения температуры ниже 0°C и деформационного сдвига в покрытии, в результате чего, в конечном итоге, и образуются поверхностные трещины.

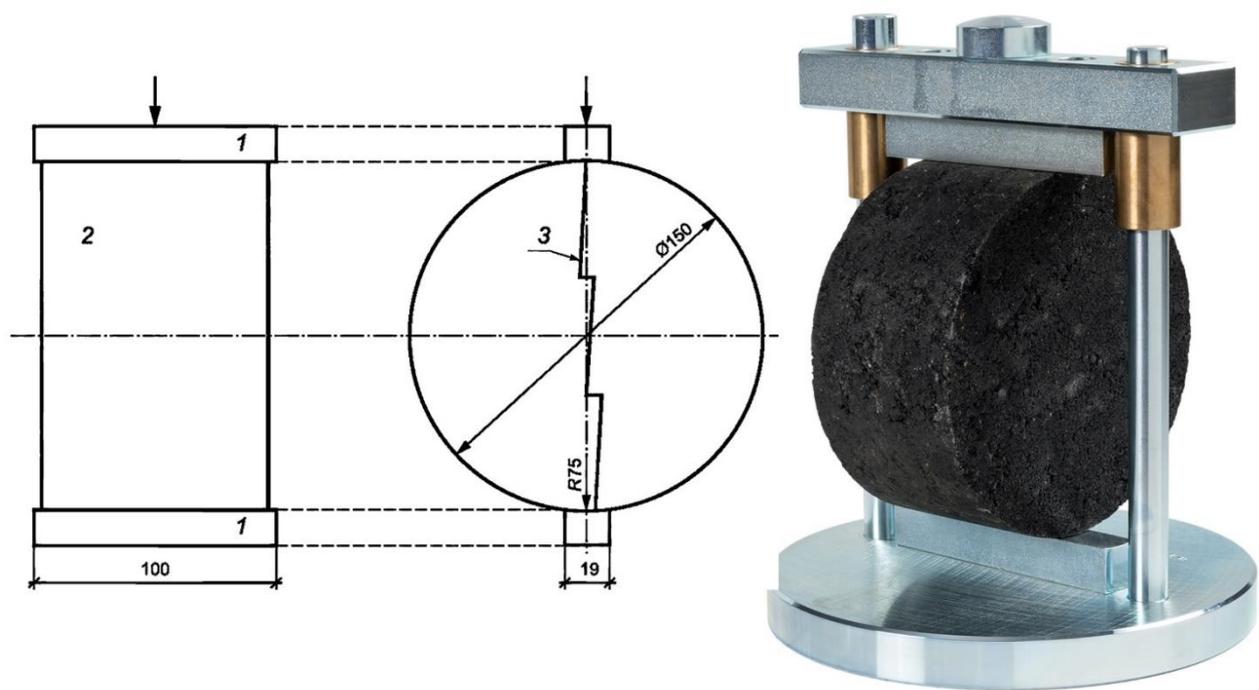


Рисунок 3.26 – Схема расположения образцов
при испытании по ГОСТ Р 58401.18

Трещиностойкость определяют по результатам специального исследования, которое заключается в том, что 3 уплотненных круглых образца асфальтобетона подвергают циклу «замораживание-оттаивание», а другие 2 круглых керна выдерживают при комнатной температуре.

Одним циклом замораживания-оттаивания считается:

- термостатирование (замораживание) водонасыщенных образцов при $t = -18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (не менее 16 ч);
- термостатирование (оттаивание) при $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1 сут.)

После серии данных циклов образцы укладывают между нагрузочными пластинами в пресс горизонтально, и нагрузочное давление осуществляется специальными пластинами именно на боковую поверхность (рис. 2.31). Скорость хода поршня испытательного прессы – 50 мм/мин.

Предел прочности при непрямом растяжении, кПа

$$S = \frac{2000P}{\pi hD}, \quad (3.23)$$

где P – максимальная нагрузка, Н;

h – толщина образца, мм;

D – диаметр образца, мм.

Коэффициент водостойкости – это отношения предела прочности S_1 водонасыщенных образцов к пределу прочности сухих образцов S_2 , то есть соотношение нагрузок, необходимых для раскалывания образцов в данных состояниях:

$$TSR = S_2/S_1 \quad (3.24)$$

Так для образца 1 предел прочности при непрямом растяжении при расколе вычисляется следующим образом:

$$R_p = 2000 \cdot 3360 / (3,14 \cdot 64 \cdot 100) = 3,344 \text{ МПа} \quad (3.25)$$

Таблица 3.12 – Результат экспериментов по определению предела прочности при непрямом растяжении

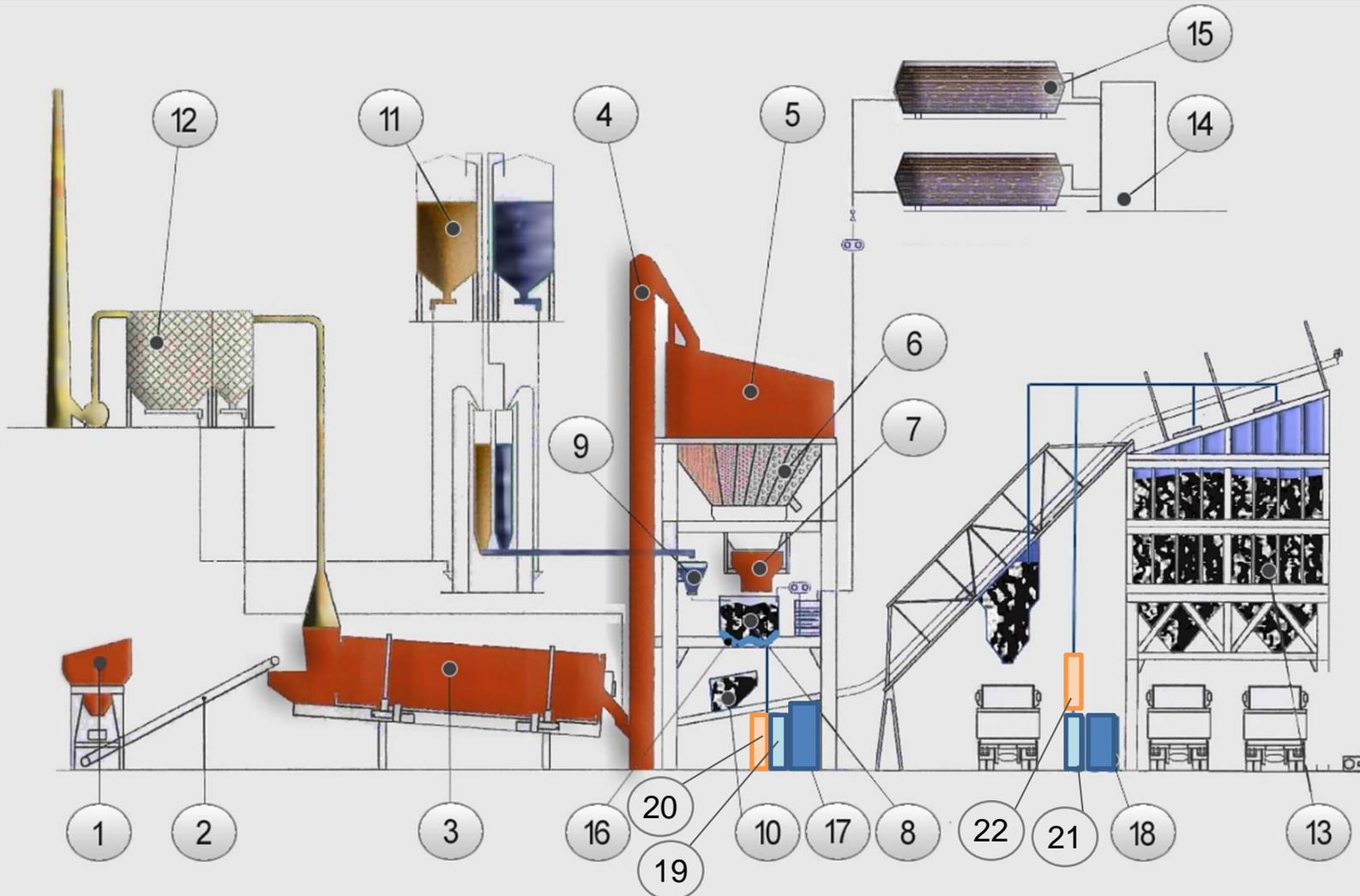
Способ состаривания	Номер образца	Разрушающая нагрузка Р, Н	Диаметр образца d, мм	Высота (толщина) образца h, мм	Предел прочности при непрямом растяжении образца при расколе, МПа	Среднее значение предела прочности при непрямом растяжении, МПа	Коэффициент водостойкости (не менее 0,85 для марки Б II)	
PAV после ТОС RTFOT	Водонасыщенные						0,868	
	1	3 360	100	64	3,344	3,392		
	2	3 231	100	64	3,416			
	3	3 222	100	64	3,417			
	Сухие образцы							3,909
	4	3 660	100	64	3,901			
	5	3 634	100	64	3,904			
6	3 687	100	64	3,923				
PAV после ТС RTFOT	Водонасыщенные						0,941	
	1*	3 634	100	64	3,617	3,603		
	2*	3 664	100	64	3,646			
	3*	3 678	100	64	3,546			
	Сухие образцы							3,830
	4*	3 845	100	64	3,823			
	5*	3 823	100	64	3,777			
6*	3 893	100	64	3,889				

Анализ полученные данных дает возможность сделать вывод, что коэффициент водостойкости у образцов с вяжущим после термостарения битума выше, чем у образцов после термоокислительного старения: снижение трещинообразования составило, в среднем, 8%. Таким образом, эксплуатационных характеристики данного асфальтобетона лучше.

3.3. Технологическая схема производства асфальтобетонной смеси с возможностью модифицирования окружающей газовой среды

На основании результатов проведенных лабораторных и опытно-производственных экспериментов предлагается модифицирование классической схемы АБЗ путем применения защитных газов [69-73]. Для этого в технологическую линию добавлены перфорированный трубчатый распылитель, то есть барботер защитного газа **16**, который размещен в мертвых зонах под лопастями, в нижней части миксера-смесителя, где происходит смешивание компонентов асфальтобетонной смеси.

Технологическая схема производства асфальтобетонной смеси с возможностью модифицирования окружающей газовой среды



- 1 – дозатор фракций каменной смеси
- 2 – транспортер (конвейер)
- 3 – сушилка
- 4 – элеватор каменной смеси после сушки
- 5 – сепаратор
- 6 – емкость горячей каменной смеси после сушки
- 7 – система взвешивания каменной смеси
- 8 – смеситель
- 9, 11 – дозатор-наполнитель
- 10 – ковшовый элеватор
- 12 – фильтр
- 13 – бункеры хранения готовой смеси
- 14 – нагреватель масляного типа
- 15 – цистерны с битумом
- 16 – барботер защитного газа
- 17 – мобильная (модульная) передвижная азотная станция адсорбционного типа
- 18 – цистерна с углекислотой
- 19 – испаритель азота
- 20 – проточный нагреватель азота
- 21 – испаритель углекислого газа
- 22 – проточный нагреватель углекислого газа

Рисунок 3.27 – Технологическая схема АБЗ с применением защитных газов

Далее предусмотрено применение комплексного решения по снабжению АБЗ газообразным азотом путем его получения из воздуха в полевых условиях с электроприводом компрессора за счет работы мобильной (модульной) передвижной азотной станции адсорбционного типа **17** необходимой мощности (от 50 до 350 м³/час в зависимости от потребляемого объема азота на данном конкретном АБЗ), откуда газ поступает в смеситель **8** через электропаровой испаритель жидкого азота **19** и проточный взрывозащищенный нагреватель азота (для подогрева до 160°C ± 5°C) **20**, расположенные ниже смесителя. Поскольку азот легче воздуха, он поднимается с помощью специального барботера **16** в верхнюю часть миксера и вытесняет воздух, а также ингибирует окислительные процессы.

Под бункерами агрегата готовой смеси размещены цистерны с углекислотой **18** необходимого объема (от 2 000 до 6 500 литров для обеспечения углекислым газом суточной работы завода), из которых газ через электропаровой испаритель углекислого газа **21** и проточный нагреватель углекислого газа **22** подается в верхнюю часть данных бункеров. Углекислый газ тяжелее воздуха, он распыляется вниз, вытесняет воздух и препятствует процессам окисления при хранении и выгрузке асфальтобетонной смеси. Предлагаемые изменения представлены на технологической схеме (рис. 3.27).

Собственное производство СО₂, получаемого с помощью генератора газа на дизтопливе, неэффективно. Данное решение требует дальнейших разработок по рекуперации отводимых дымовых газов, что в дальнейшем позволит решить возникающие экологические проблемы как по монооксидам углерода, так и по оксидам азота.

3.4. Проведение производственных испытаний

Для изучения старения асфальтобетонных смесей в кислородосодержащей и

инертной среде, а также процессов старения и, соответственно, изменения качественных характеристик асфальтобетонных смесей были организованы полупромышленные испытания на асфальтосмесительной установке малой мощности, находящейся на территории ООО «Дорожник» (Семилукский район).

Для проведения натуральных испытаний было предварительно приобретено 6 баллонов с азотом, 2 баллона с углекислым газом, 8 подогревателей защитных газов ПЭГ-1 220V ПТК для каждого баллона, другое вспомогательное оборудование. В условиях промышленного внедрения будут использоваться генераторы газа, цистерны с защитным газом, испарители и поточные нагреватели.

Сначала были сделаны замесы по стандартной технологии, отобраны образцы. Затем под контролем технолога АБЗ и при соблюдении мер безопасности были сделаны отверстия в бункерах, и выполнены замесы при разных температурах (165 и 180°C) для экспериментально-статистического моделирования влияния параметров и их оптимизации. Опыты выполнялись в зимнее время, когда завод практически не загружен, однако поскольку температура окружающей среды была низкой, то и замесы при t ниже 165°C не проводились.

В течение 1 часа в емкости подавался защитный газ из баллонов по шлангам. После 2 выгрузок отбирались образцы с целью проведения различных испытаний.



Рисунок 3.28 – Смесительный агрегат и бункеры агрегата готовой смеси



Рисунок 3.29 – Баллон азота с редуктором давления и подогревателем защитных газов ПЭГ-1 220V ПТК

Исследования проводились в течение 2 дней. В первый день выполнялись замесы и отборы проб по стандартной технологии. Во второй день была организована подача защитных газов в технологические емкости.

Таким образом, в результате полупромышленных испытаний для последующего изучения были получены:

1. Смесь, произведенная по стандартной технологии в присутствии кислородосодержащей среды.

1.1. Отобранная сразу же после смешивания, приготовленная при температуре 165°C;

1.2. То же, что и 1.1, приготовленная при 180°C;

1.3. Смесь после 2 часов хранения в термосбункере, приготовленная при температуре 165°C;

1.4. То же, что и 1.3, приготовленная при 180°C.

2. Смесь, произведенная в присутствии защитных газов (инертная среда)

2.1. Отобранная сразу же после смешивания, приготовленная при температуре 165°C;

2.2. То же, что и 2.1, приготовленная при 180°C;

2.3. Смесь после 2 часов хранения в термосбункере, приготовленная при температуре 165°C;

2.4. То же, что и 2.3, приготовленная при 180°C.

Целью производственных опытов было подтверждение теоретических расчетов и результатов лабораторных исследований, то есть сходимость результатов. Кроме того, нужно было установить, будет ли влиять повышение температуры производства ту же критическую роль при наличии инертной среды, что и при стандартной технологии. Степень старения битумного вяжущего после 2-часового хранения приравнена к результатам RTFOT-состаривания. Термостатирование образцов, полученных из отобранных асфальтобетонных смесей в климатической камере можно приравнять к PAV-состариванию вяжущего, используемого в приготовлении этих смесей.



Рисунок 3.30 – Процесс монтажа баллонов с защитным газом

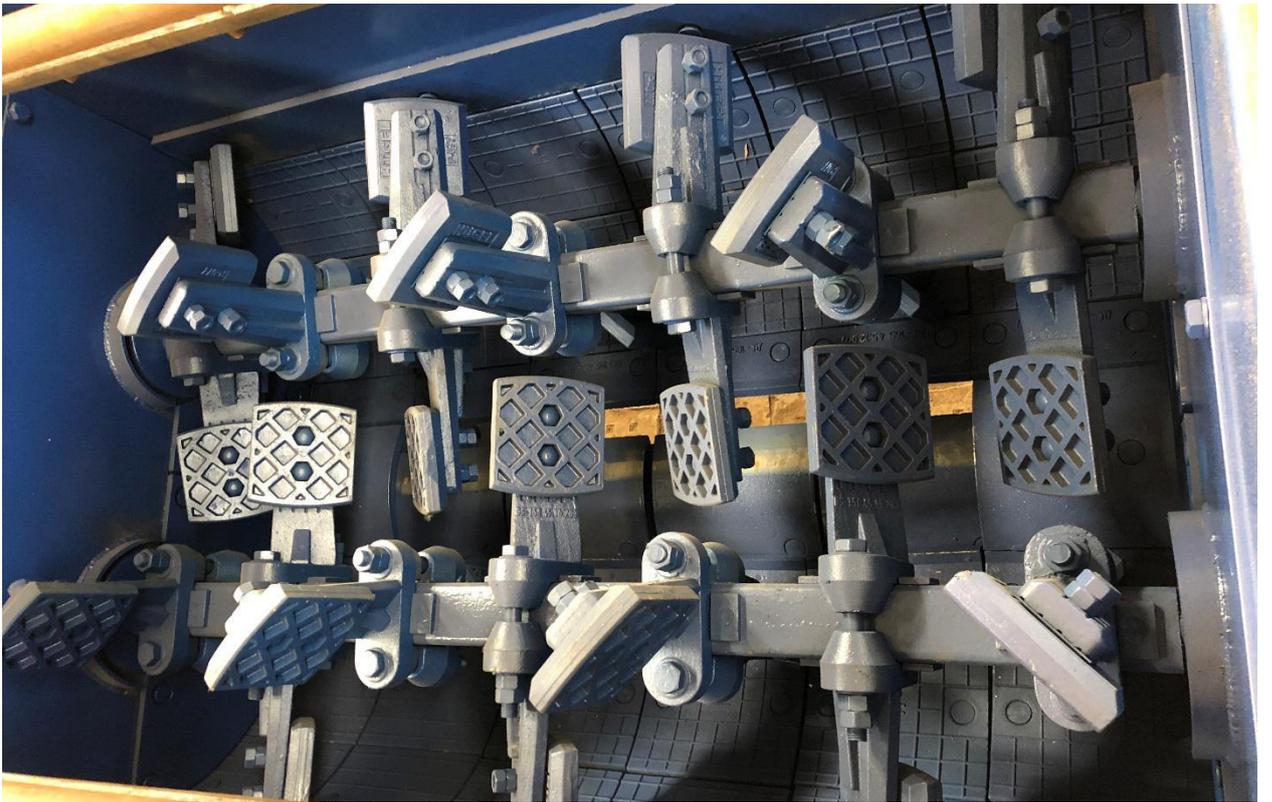


Рисунок 3.31 – Лопасты смесителя



Рисунок 3.32 – АБЗ малой мощности

3.5. Испытания полученных образцов на пределы прочности и сопротивление динамическим сдвигам

Первый этап исследований после проведения полупромышленных экспериментов состоял в испытаниях полученных образцов на пределы прочности и сопротивление динамическим сдвигам. Для первого блока экспериментов формовались образцы в виде стандартных цилиндров (рис. 3.33). Для второй части готовились балочки, которые должны были подвергаться нагрузке до усталостного разрушения. Результаты сведены в таблицу 3.13.



Рисунок 3.33 – Отформованные образцы из отобранной асфальтобетонной смеси

Таблица 3.13 – Результаты испытания асфальтобетонных образцов, изготовленных из асфальтобетонной смеси марки Б тип II по стандартной технологии и в присутствии защитных газов

Параметры производства и хранения смеси Б2 (срок хранения в бункере АГС = 2 ч.)	Тпр, °С	Предел прочности асфальтобетона при сжатии $R^0_{сж}$ при 0°С, МПа (не более 12 МПа по ГОСТ 9128-2013)	Предел прочности асфальтобетона при сжатии $R^{20}_{сж}$ при 20°С, МПа (не менее 2,2 МПа по ГОСТ 9128-2013)	Предел прочности асфальтобетона при сжатии $R^{50}_{сж}$ при 50°С, МПа (не менее 1,2 МПа по ГОСТ 9128-2013)	Предел прочности на растяжение при расколе R^0_p , МПа (2,5-7 МПа)	Предел прочности на растяжение при изгибе $R^{20}_{изг}$, МПа	Количество циклов N до усталостного разрушения балочек $N \cdot 10^3$, цк
Смесь по ТОС							
Отбор сразу после смешивания	165	9,5	5,85	1,2	3,21	1,1	31
Отбор сразу после смешивания	180	10,5	6,3	1,4	3,7	1,3	25
Хранение в термосбункере	165	9,8	6,16	1,3	3,6	1,64	30
Хранение в термосбункере	180	10,5	6,7	1,6	4,1	1,92	19,5
Смесь по ТС							
Отбор сразу после смешивания	165	8,8	5,3	1,2	3,1	1	32
Отбор сразу после смешивания	180	10,2	5,83	1,4	3,4	1,26	25
Хранение в термосбункере	165	9,3	6,1	1,3	3,3	1,3	31
Хранение в термосбункере	180	10,3	6,6	1,6	3,8	1,9	20

Проанализируем полученные результаты:

1. Значения пределов прочности на сжатие закономерно возрастают для всех образцов, что указывает на старение асфальтобетонной смеси на каждом

технологическом этапе.

2. Если смесь готовилась при $T_{пр} = 165^{\circ}\text{C}$, то предел прочности на изгибе заметно ниже как при термоокислительном старении, так и в присутствии инертной среды, чем при $T_{пр} = 180^{\circ}\text{C}$. Предел прочности на растяжение при расколе при повышенных температурах производства выше, чем при стандартной, и приближается к верхним допустимым границам. Воздействие высоких температур приводит к потере упруго-пластичных свойств асфальтобетонного покрытия и интенсивному трещинообразованию при отрицательных температурах.

3. Прочность менее резко растет для образцов, отформованных из смеси, приготовленной в присутствии защитных газов.

4. Количество циклов до усталостного разрушения закономерно падает, причем, этот процесс происходит тем скорее, чем выше первоначальная температура приготовления смеси. Разница этого показателя для всех испытанных образцов невелика.

3.6. Оптимизация технологических параметров с применением регрессионного анализа

Вторым этапом исследований стало математическое моделирование процессов с учетом изменения вязкости и трещиностойкости, как главных критериев старения асфальтобетонной смеси с учетом формул для вязкости 3.2-3.15. В работе [47] подробно исследуются данные проблемы, прежде всего увеличение вязкости асфальтобетонной смеси, которое описывается уравнениями:

$$\eta = A * e^{\varphi t} \quad (3.26)$$

$$\lg \eta = \lg A + n_c * t \quad (3.27)$$

$$n_c = \varphi * \lg e, \quad (3.28)$$

где A – постоянная, φ – любой из факторов старения, t – время, n_c – коэффициент, который получен определением тангенса угла наклона вектора

предела прочности на растяжение при расколе образцов асфальтобетонной смеси к оси значений изменяемого фактора:

$$\operatorname{tg} \alpha = \Delta R / \Delta F \quad (3.29)$$

Поскольку n_c показывает степень повышения вязкости смеси во времени, то его можно назвать коэффициентом старения, который можно использовать для характеристики и прогнозирования трещиностойкости, а, значит, и долговечности асфальтобетона. Чем больше изменение тангенса, тем значительнее взаимосвязь изменения фактора и изменения пределов прочности.

В работе [86] этот основной показатель качества смеси – трещиностойкость T_c , предлагается определять по формуле:

$$T_c = (\lg \eta_{п} - 1,1 * \lg \eta_{н}) / n_c, \quad (3.30)$$

где $\eta_{п}$ – предельное значение вязкости при расчетной низкой температуре;

$\eta_{н}$ – начальная вязкость асфальтобетона при той же температуре;

1,1 - коэффициент приведения начальной вязкости к условно-начальной, соответствующей линейному изменению логарифма вязкости от времени.

Таблица 3.14 – Результаты расчетов по определению тангенса угла, определяющего коэффициент n_c

Расчет	Значение	Неизменяемый показатель	Принцип варьирования
Для изменения R0 по:			
ΔV			
$tg1 = (6,7-7,1)/(80,45-50,45) = -0,013$	-0,013	150	(-1;+1) - (-1;-1)
$tg2 = (7,2-7,6)/(80,45-50,45) = -0,013$	-0,013	165	(0;+1) - (0;-1)
$tg3 = (8,1-8,8)/(80,45-50,45) = -0,023$	-0,023	180	(+1;+1) - (+1;-1)
ΔT			
$tg1 = (8,8-7,1)/30 = 0,057$	0,057	35,45	(+1;-1) - (-1;-1)
$tg2 = (8,6-7,3)/30 = 0,043$	0,043	65,45	(+1;0) - (-1;0)
$tg3 = (8,1 - 6,7)/30 = 0,047$	0,047	95,45	(+1;+1) - (-1;+1)
Для изменения Rp по:			
ΔV			
$tg1 = (3,1-3,2)/(80,45-50,45) = -0,003$	-0,003	150	(-1;+1) - (-1;-1)
$tg2 = (3,2-3,6)/(80,45-50,45) = -0,013$	-0,013	165	(0;+1) - (0;-1)
$tg3 = (3,1-3,1)/(80,45-50,45) = 0,017$	0,017	180	(+1;+1) - (+1;-1)
ΔT			
$tg1 = (3,9-3,2)/30 = 0,023$	0,023	35,45	(+1;-1) - (-1;-1)
$tg2 = (3,5-3,2)/30 = 0,010$	0,010	65,45	(+1;0) - (-1;0)
$tg3 = (3,6-3,1)/30 = 0,017$	0,017	95,45	(+1;+1) - (-1;+1)

На основании уравнения 3.30 и данных таблицы 3.13 можно определить трещиностойкость через полученный усредненный коэффициент n_c . Результаты коррелируют с ранее сделанными выводами в п. 3.1.

Таблица 3.15 – Результаты экспериментов по определению трещиностойкости

Образцы	Расчет по n_c	Коэффициент водостойкости (не менее 0,85 для марки Б II) по табл. 2.13
После ТС	0,949436291	0,941
После ТОС	0,923636416	0,868

Для оценки теоретического обоснования влияния защитных газов на термоокисление исследуемого материала организован полнофакторный активный эксперимент с композиционным несимметричным планом второго порядка для уровней (-1; 0; +1). Начальные регрессионные уравнения были рассчитаны на основе 2-х факторного плана.

В связи с тем, что эксперименты в условиях АБЗ при пониженной температуре не проводились, были взяты лабораторные данные для смешивания при $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Варьируемые параметры: X_1 - температура производства асфальтобетонной смеси ($165\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$);

X_2 – объем подаваемого защитного газа ($65,45\pm 15\text{ м}^3/\text{час}$).

Параметры оптимизации:

- предел прочности при сжатии при $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (R_{50}),
- предел прочности при сжатии при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (R_{20}),
- предел прочности при сжатии при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (R_0 , не более 12 МПа для III-й и IV-й дорожно-климатических зон, в которых находится Воронежская область), определяемый на Испытательном прессе UNIFRAME 50 кН по ГОСТ 9128-2013;
- предел прочности на растяжение при расколе при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (R_p , 2,5-7 МПа), то есть трещиностойкость на том же прессе по ГОСТ Р 58401.18 – 2019 [20].

Таблица 3.16 – Матрица планирования и результаты эксперимента

№ п/п	Значение фактора				Значение параметра оптимизации, МПа				Коэффициент			
	в кодиро- ванных значениях		в натуральных значениях						Расчет по n_c		Результаты лабораторных испытаний	
	X ₁	X ₂	T, °C	Объем защитного газа,	Y ₁ (R ₅₀)	Y ₂ (R ₂₀)	Y ₃ (R ₀)	Y ₄ (R _p)				
1	0	0	165	65.45	1.5	3.7	8.1	3.6	0,949	0,924	0,941	0,868
2	+1	+1	180	80.45	1.7	3.9	7.1	3.2				
3	-1	-1	150	50.45	1.2	3.3	7.7	3.2				
4	0	+1	165	80.45	1.4	3.6	8	3.7				
5	0	-1	165	50.45	1.4	3.3	7.9	3.4				
6	+1	0	180	65.45	1.6	3.8	7.3	3.1				
7	-1	0	150	65.45	1.4	3.4	7.6	3.4				
8	+1	-1	180	50.45	1.6	3.5	7.4	3.2				
9	-1	+1	150	80.45	1.5	3.4	7.6	3.4				

Прикладной регрессионный анализ [37] позволил получить коэффициенты зависимости пределов прочности асфальтобетонной смеси от температуры приготовления смеси и объема подаваемого защитного газа.

В основу уравнения регрессии уравнение второго порядка, обеспечивающее квадратичную зависимость от двух параметров.

Регрессионные модели описываются уравнением (10):

$$R(x, y) = k_1 + k_2 \cdot x + k_3 \cdot y + k_4 \cdot x^2 + k_5 \cdot x \cdot y + k_6 \cdot y^2, \quad (3.31)$$

где x – параметр температуры, °C, y – параметр объема прокачиваемого защитного газа, м³/час, $k_1 \dots k_6$ – коэффициенты регрессионного уравнения.

Регрессионный анализ, выполненный в математическом пакете MATLAB, позволил получить коэффициенты уравнения описывающие зависимость прочности асфальтобетонной смеси от температуры приготовления смеси и объема подаваемого защитного газа.

Значения коэффициентов множественной корреляции, свидетельствует о наличии сильной линейной связи между величиной указанных пределов прочности и включенными в модели факторами.

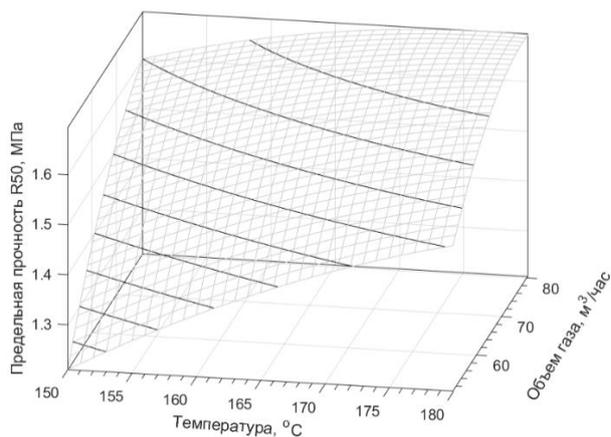
Модель соответствуют основным критериям значимости при $v \leq 0,05$, что подтверждает правильность организации экспериментального исследования. Выборка соответствует G - критерию Кохрена. Критерий Фишера F-критерий, свидетельствует об адекватности построенной модели, а полученные значения t-критерия Стьюдента показывает на влияние практически всех членов регрессионной модели.

Таблица 3.17 – Коэффициенты регрессионного уравнения

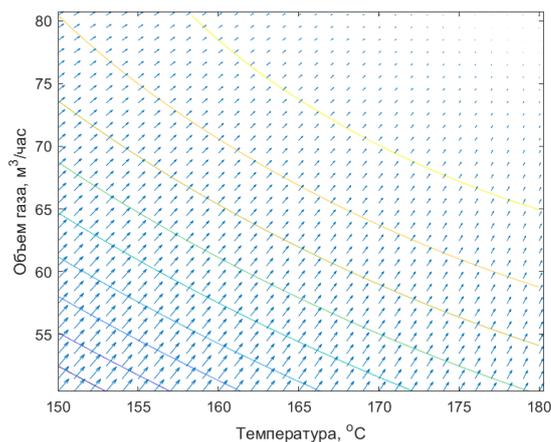
	Коэффициенты регрессионного уравнения, *10					
	k1	k2	k3	k4	k5	k6
Y50	-71,863	0,64989	0,78331	-0,00133	-0,0022	-0,00244
Y20	-30,416	0,57979	0,28913	-0,00133	-0,0008	-0,00089
Y0	59,024	0,08545	0,28671	0,00000	-0,0010	-0,00067
YRp	-11,382	0,34000	0,26443	-0,00074	0,0000	-0,00163

В процессе математического моделирования была установлена нелинейность физического процесса старения, вызванного влиянием температуры и связанной с ней реологии. Для этого были введены звездные точки необходимые для получения нелинейного уравнения.

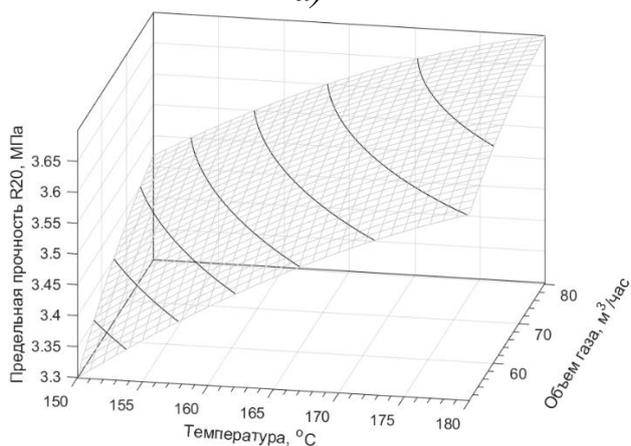
На рисунке 5 а), в) и г) показаны поверхности, описывающие изменение прочности сжатия при 50°C (R50), 20°C (R20), 0°C (R0), нарастание предельной прочности образцов с температурой носит нелинейный характер это вызвано влиянием реологических свойств горячей асфальтобетонной смеси, а также старением (термоокислением) битумного вяжущего. Также отмечается рост прочности образцов с увеличением объемов прокачиваемого защитного газа (при температурах, близких к 165°C). Анализ графика зависимостей 5 а) показывает, что при перемешивании с более высокой температурой и объемами происходит более полное взаимодействие компонентов смеси и при градиентном переходе рисунке 5 б), области факторов (155 °C, 165°C; 50 м3/ч, 80 м3/ч) величина градиента составляет 0,0064 МПа/°C и 0,0097 МПа/м3/ч.



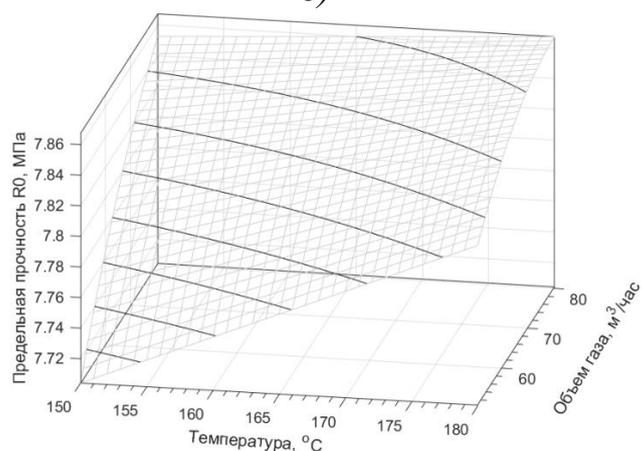
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.34 – Графики поверхностей, описывающих изменение прочности при сжатии и температурах а) 50°C (R50), в) 20°C (R20), г) 0°C (R0) и градиент φ поля изменения характеристик прочности для б) 50°C (R50)

С уменьшением температуры испытания образцов наблюдается аналогичная тенденция увеличения прочности образцов с увеличением температуры приготовления, рисунок 5 в) и наблюдается более линейная зависимость прочности от температуры при сохранении влияния объема прокачиваемого защитного газа, при этом влияние температуры увеличивается, а влияние объемов прокачиваемого защитного газа уменьшается. При более низких температурах приготовления смеси усложняется вовлечение газа более мелкими частицами и термоокислительные процессы происходят при начальном не вытесненном газе. Воздействие высоких температур приводит к потере упруго-пластичных свойств асфальтобетонного покрытия и интенсивному

трещинообразованию при отрицательных температурах. На рисунке 6 а) показана поверхность отклика на раскалывание образца, тенденция изменения прочности сохраняется и градиентное поле рисунке 6 б) близко к гипотетическому R10. Такое физическое поведение образца свидетельствует о влиянии упругих процессов при малой пористости сформированных образцов.

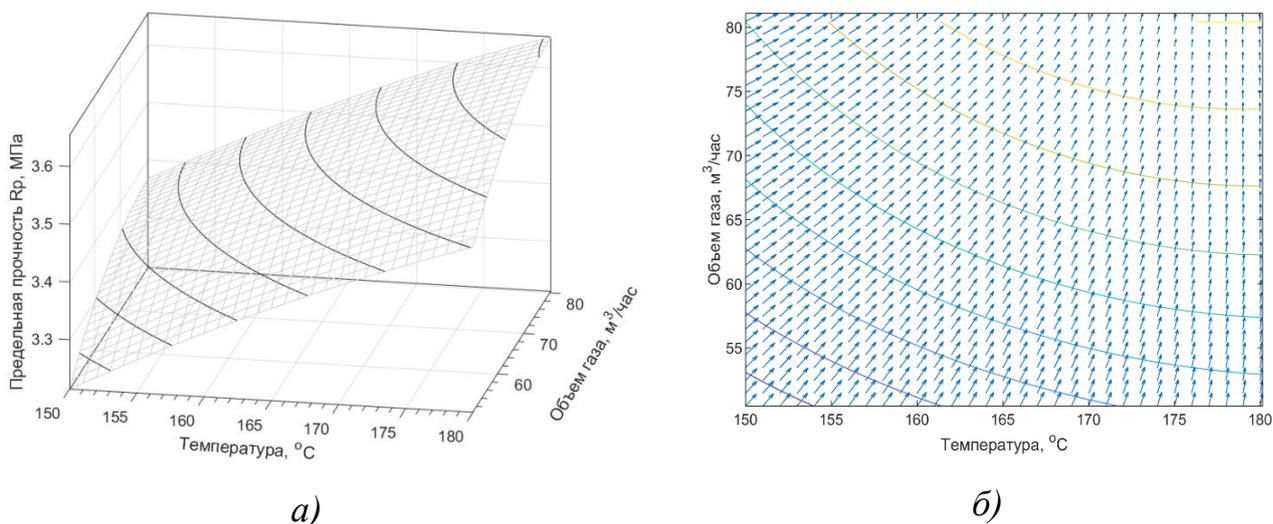


Рисунок 3.35 – График зависимости изменения предела прочности на растяжение при расколе при 0°C (R_p) а) и градиент его изменения б)

Таким образом, как на основании результатов экспериментов, так и на основе анализа регрессионной модели **можно сделать вывод**, что наличие инертной среды при обычной температуре приготовления смеси ($160^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$) замедляет процессы старения. При температуре 180°C влияние инертной среды уже незначительно, то есть температура приготовления имеет критическое значение для качества для качества асфальтобетонной смеси.

3.7. Испытания образцов в климатической камере

Третьим этапом исследований отобранных образцов было изучения влияния эксплуатационно-климатических факторов на интенсивность старения вяжущего в асфальтобетонных образцах [91, 94, 97].



Рисунок 3.36 – Образцы асфальтобетона в климатической испытательной камере М-60/100-1000 КТВХ

В работе [86] предлагается оценивать степень ухудшения характеристик асфальтобетона по показателю все той же трещиностойкости, но после различных климатических воздействий, смоделированных в климатической камере для климатической зоны, в которой будет эксплуатироваться покрытие.

Согласно этому принципу, испытания отобранных образцов проводились в климатической испытательной камере М-60/100-1000 КТВХ, предназначенной для проведения исследований асфальтобетона как при отрицательных, так и при положительных температурах. Были отформованы образцы-цилиндры из горячей асфальтобетонной смеси тип Б марка II на доломитовом минеральном порошке (время приготовления $t = 2$ мин., температура приготовления $T = 165^{\circ}\text{C}$ и 180°C :

– из смеси, которая подвергалась термоокислению и хранилась 2 часа в термосбункере;

– из смеси, которая подвергалась термостарению в условиях инертной среды и хранилась 2 часа в термосбункере.

Данные для результатов при $T=150^{\circ}\text{C}$ были взяты из проведенных лабораторных опытов.

– Образцы подвергались высоким температурам (70°C , имитации солнечного излучения (в течение 300, 600, и 900 часов), затем определялся предел прочности при расколе при 0°C $R_{\text{раск}}$ и соответствующий значению прочности коэффициент старения.

Результаты приведены в табл. 3.6 и на диаграмме (рис. 3.37)

Таблица 3.18 – Значения предела прочности при расколе R°_p при 0°C и коэффициента старения для асфальтобетонных образцов марки Б2 после имитации длительного старения в климатической камере М-60/100-1000 КТВХ

Образцы	Температура приготовления смеси, $^{\circ}\text{C}$	Предел прочности при расколе R°_p , МПа после выдерживания образцов в течение, ч				Коэффициент старения $K_{\text{ст}}$ после выдерживания образцов в течение, ч		
		0	300	600	900	300	600	900
Асфальтобетон марки Б2 в присутствии инертной среды	150	3,10	3,33	3,55	4,10	0,07	0,15	0,32
	165	3,60	3,95	4,10	4,20	0,27	0,32	0,35
	180	4,30	4,40	4,50	4,60	0,42	0,45	0,48
Асфальтобетон марки Б2 в присутствии кислородосодержащей среды	150	3,30	3,68	3,93	4,20	0,19	0,27	0,35
	165	3,90	4,11	4,18	4,32	0,33	0,35	0,39
	180	4,53	4,60	4,70	4,80	0,48	0,52	0,55

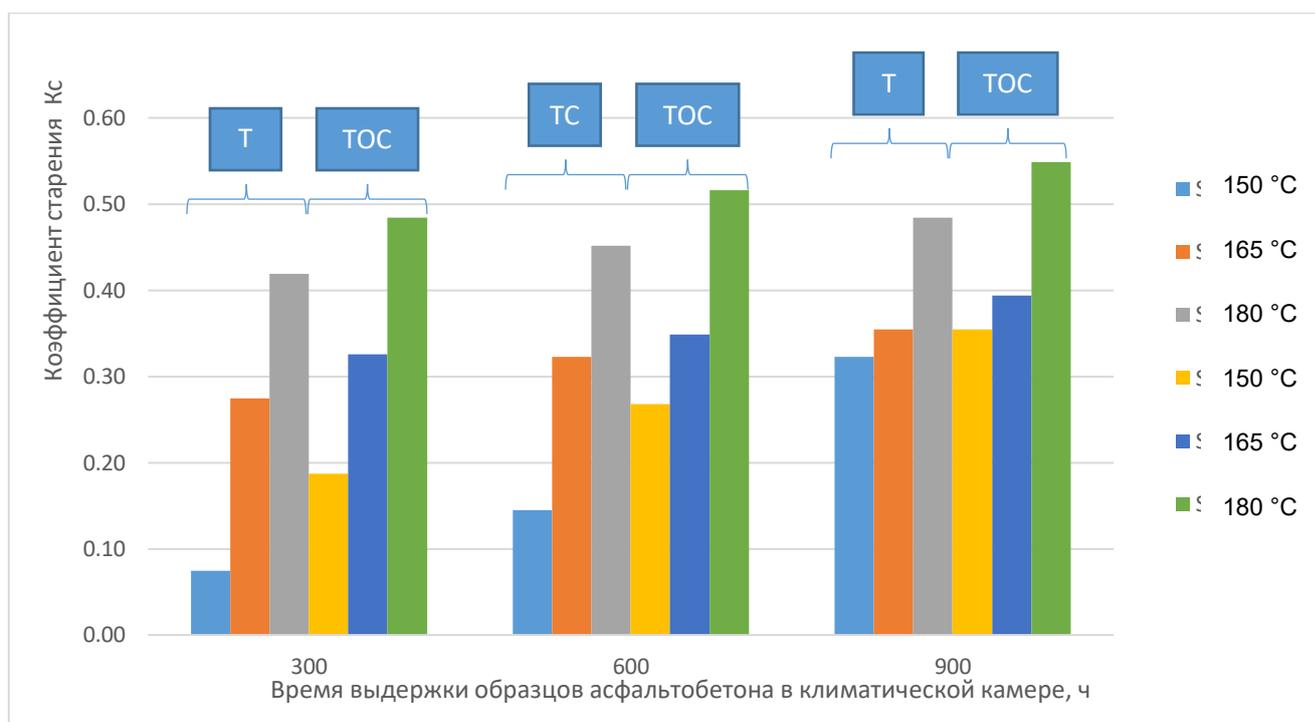


Рисунок 3.37 – Зависимость коэффициента старения K_s от температуры приготовления асфальтобетонной смеси, вида газовой среды в технологических емкостях и времени выдержки образцов асфальтобетона в климатической камере

Коэффициент старения определяется по формуле:

$$K_{ст} = (R^{\circ p_i} - R^{\circ p_0}) / R^{\circ p_0}, \quad (3.32)$$

где $R^{\circ p_0}$ – предел прочности при расколе цилиндрического образца до помещения в климатическую камеру;

$R^{\circ p_i}$ – предел прочности после выдержки образца в климатической камере в течение i часов.

Анализ данных показывает, что интенсивность старения при выдерживании образцов в климатической камере менее значительна, если смесь производилась при более низкой температуре для всех образцов и гораздо интенсивнее, если температура приготовления была высокой. Наличие инертной среды замедляет данный негативный процесс для образцов смеси, приготовленной при рабочей $T=165$ °C в среднем на 9 %, что согласуется с ранее полученными данными. Эффективность наличия защитного газа падает с ростом температуры приготовления и при $T=180$ °C не превышает 1-2%.

Таким образом, проведенные по ГОСТ Р 58406.3-2020 испытания на сопротивление колееобразованию показали, что полученные величины релевантны ГОСТам и для всех образцов асфальтобетона равновелики между собой. Исследование трещиностойкости по ГОСТ Р 58401.18-2019 после необходимого количества циклов «замораживание-оттаивание» показало повышение коэффициента водостойкости образцов с вяжущим после ТС по сравнению с ТОС и составило 8-9%.

3.8. Выводы по Главе 3

1. Проведено поэтапное кратковременное и долговременное лабораторное состаривание и испытания битума, а также подготовка образцов асфальтобетона и их испытания.

2. В ходе проведения экспериментов исследованы реологические характеристики битумов, состаренных в разных газовых средах.

3. Остаточная пенетрация при состаривании в кислородосодержащей ниже, чем в инертной.

4. С увеличением удельного расхода воздуха остаточная пенетрация пропорционально снижается, поскольку чем больше объем подаваемого кислорода, тем интенсивнее происходит состаривание.

5. Потеря массы в инертной среде замедлилась, а температура размягчения повысилась менее значительно, чем при старении в условиях окисления воздухом.

6. После старения снижение дуктильности значительно в обоих случаях, но изменения при термостарении (без присутствия кислорода) менее выражено.

7. Регрессионные модели изменения вязкости битумных структур подтвердили, что формирующаяся коагуляционная структура становится прочнее при термостарении (в присутствии защитного газа) и разрушается при термоокислительных процессах (в присутствии кислорода воздуха).

8. Комплексный модуль жесткости G^* при ТОС RTFOT вырос примерно в 2 раза, а после PAV – в 6500-7000 раз. При ТС RTFOT состаривании без кислорода G^* меньше примерно на 20%.

9. Усталостная устойчивость после состаривания в инертной среде показала лучший результат примерно на 20%.

10. Фазовый угол при традиционном кислородном состаривании уменьшается от показателей исходного битума в среднем на 4° - 6° после RTFOT и на 10° - 16° после PAV. Это изменение фазового угла менее выражено при состаривании в инертной среде в среднем на 2 - 3° .

11. При низких температурных режимах RTFOT-состаривание в кислородосодержащей среде приводит к росту жесткости битума примерно 1,5 раза, а PAV-состаривание после ТОС RTFOT закономерно вызывает рост жесткости до 2,5-3 раз. В инертной среде этот показатель меньше примерно на 100 мПа (в среднем на 30 %).

12. Прогиб балочки для более жесткого битума меньше, его сопротивление деформации – выше. Однако, потеря пластичных свойств при низких температурах приведет к ускоренному разрушению по причине роста хрупкости.

13. Скорость отклика образцов БНД 60/90 на изменение температуры после состаривания в инертной среде закономерно выше, так как возможность для релаксации такого битума выше, чем более жесткого.

14. Испытания на колееобразование асфальтобетона показали почти одинаковые результаты, зато коэффициент водостойкости у образцов с вяжущим после термостарения битума выше, чем у образцов после термоокислительного старения: снижение трещинообразования составило, в среднем, 8,15%.

15. По результатам теоретических исследований и лабораторных экспериментов разработаны технологический процесс и схема АБЗ с применением защитных газов.

16. Проведены натурные испытания в условиях асфальтобетонной установки малой мощности, проведены замесы при разных температурах как в кислородосодержащей, так и в инертной средах. Для дальнейших лабораторных исследований отобраны образцы асфальтобетонных смесей как сразу после замешивания, так и после выдержки в бункере хранения в течение 2 часов.

17. Установлено, что значения всех пределов прочности при сжатии

закономерно возрастают для всех образцов, что указывает на старение асфальтобетонной смеси на каждом технологическом этапе.

18. Если смесь готовилась при $T_{пр} = 165^{\circ}\text{C}$, то предел прочности на изгибе заметно ниже как при термоокислительном старении, так и в присутствии инертной среды, чем при $T_{пр} = 180^{\circ}\text{C}$. Предел прочности на растяжение при расколе при повышенных температурах производства выше, чем при стандартной, и приближается к верхним допустимым границам. Воздействие высоких температур приводит к потере упруго-пластичных свойств асфальтобетонного покрытия и интенсивному трещинообразованию при отрицательных температурах.

19. Количество циклов до усталостного разрушения закономерно падает, причем, этот процесс происходит тем скорее, чем выше первоначальная температура приготовления смеси. Разница этого показателя для всех испытанных образцов невелика.

20. На основании полученных результатов экспериментальных исследований и регрессионного анализа были получены математические модели испытания, корректно описывающие функции отклика от варьируемых факторов, установлены рациональные области ограничений их значений и спрогнозирована степень влияния на показатели эксплуатационных свойств асфальтобетонной смеси.

21. Испытания образцов асфальтобетона в климатической камере окончательно подтвердили, что наличие инертной среды при обычной температуре приготовления смеси ($160^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) замедляет процессы старения в среднем на 9 %. При температуре 180°C влияние инертной среды уже незначительно (не превышает 1-2%).

ГЛАВА 4. ОБОСНОВАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Техничко-экономическое обоснование применения обработки асфальтобетонной смеси защитными газами

Обеспечение азотом для обработки асфальтобетонной смеси возможно следующими способами:

1. Приобретение криогенного резервуара.
2. Мобильная модульная азотная станция адсорбционного типа в блоке (для работы в полевых условиях).

Разделение воздуха на составляющие – азот и кислород позволит не только получать собственный условно защитный газ – азот, а также чистый кислород, который так же можно применять как независимо на стороне, так и в собственных нуждах производства.

3. Переработка оксида азота, который выделяется при работе АБЗ в огромных количествах.
4. Система рекуперации, предусматривающая замкнутый цикл (возврат азота, использованного в бункере-смесителе).
5. Гибридный вариант.

Обеспечение углекислотой для обработки асфальтобетонной смеси возможно следующими способами:

1. Приобретение цистерны для жидкой углекислоты.
2. Применение генератора CO₂.
3. Переработка монооксида углерода и двуокиси углерода (дымовые газы), который выделяется из-за неполного сгорания топлива, используемого при работе АБЗ.
4. Система рекуперации, предусматривающая замкнутый цикл (возврат CO₂, использованного в бункерах хранения).
5. Гибридный вариант, который в перспективе позволил бы не только реализовать рекуперацию CO₂ из дымовых газов, но и разработать технологию

самообеспечения АБЗ непосредственно дизтопливом в процессе переработки углекислого газа.

В рамках данной работы рассматривались: для азота – первый и второй варианты, для углекислоты – первый вариант.

Собственное производство азота из воздуха с применением азотной станции показало свою эффективность. Собственное производство CO₂ на базе генератора газа на дизтопливе неэффективно, поэтому на данный момент в линию включена криоцистерна.

Целью данного исследования была оценка влияния обработки защитными газами асфальтобетонной смеси на долговечность и износостойкость дорожных одежд. Технологическое решение, касающееся непосредственно получения и подачи защитных газов, требует дальнейших разработок по рекуперации отводимых дымовых газов, что в дальнейшем позволит решить возникающие экологические проблемы как по монооксидам углерода, так и по оксидам азота.

Был проведен анализ результатов:

- лабораторных экспериментов по искусственному состариванию битумного вяжущего БНД 60/90, которое проводилось как в кислородосодержащей среде, так и в инертной среде, и дальнейшим испытаниям образцов асфальтобетона типа Б марки П,

- натуральных испытаний на АБЗ (ООО «Дорожник»).

Были сделаны следующие выводы (таб. 4.1):

1. Степень колееобразования асфальтобетона почти не изменилась при термоокислении и термостарении битума.

2. Усталостная устойчивость увеличилась на 20%.

3. Температурное трещинообразование (в среднем для сухих и водонасыщенных образцов) снизилось на 8-9%.

На основании полученных данных был выведен суммарный коэффициент, влияния качества битумного вяжущего, состаренного в разных средах, на износостойкость и эксплуатационные характеристики асфальтобетонного дорожного покрытия, который равен 1,16.

Таблица 4.1 – Влияние качества битума на качество асфальтобетона

Основные показатели качества асфальтобетона	Показатель для асфальтобетона с битумом, состаренным по ГОС, %	Качество битума, состариваемого по ТС, %	Прирост качества	Степень влияния качества битума на показатель асфальтобетона (стандартные "Росавтодора"), %	Степень влияния качества битума, состариваемого по ТС, %	Коэффициент влияния всех факторов
Колесобразование асфальтобетона	100,00%	101,00%	0,01	0,40	0,41	
Усталостная устойчивость	100,00%	120,00%	0,20	0,60	0,80	
Температурное трещинообразование (в среднем для сухих и водонасыщенных образцов)	100,00%	109,00%	0,09	0,90	0,99	

На основании данных Приложений А и Б приведем основные расчеты для технико-экономического обоснования применения технологии обработки асфальтобетонных смесей защитными газами.

Расход азота, углекислого газа и суммарный расход защитных газов, необходимый для вытеснения воздуха из бункеров, определялся в зависимости от мощности АБЗ отражен в диаграммах на рисунках 4.1 – 4.3. Сравнивались данные для заводов различной мощности.

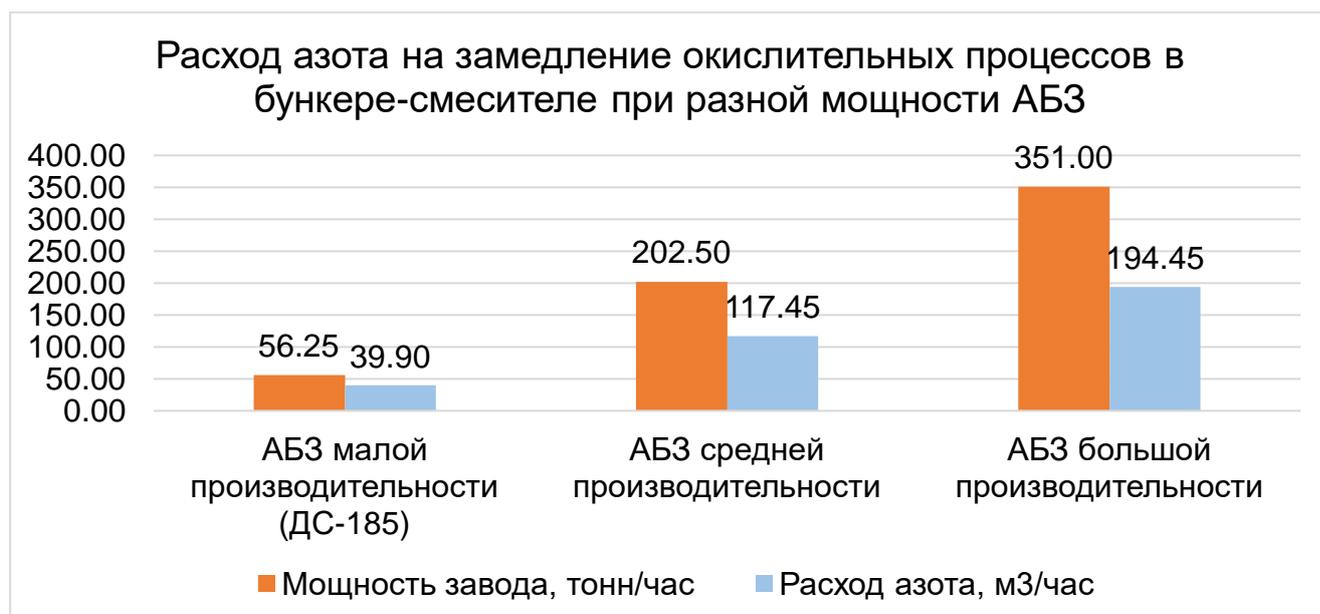


Рисунок 4.1 – Расход азота на замедление окислительных процессов в бункере-смесителе при разной мощности АБЗ

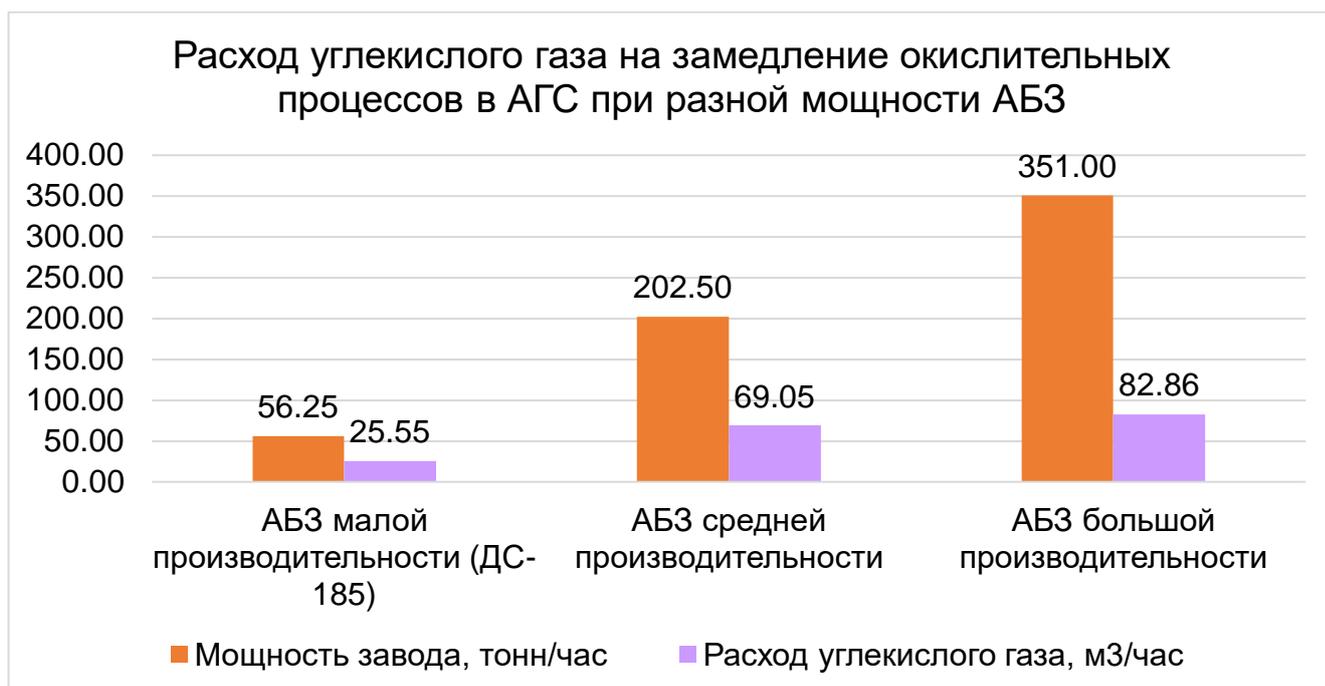


Рисунок 4.2 – Расход углекислого газа на замедление окислительных процессов в бункерах хранения при разной мощности АБЗ

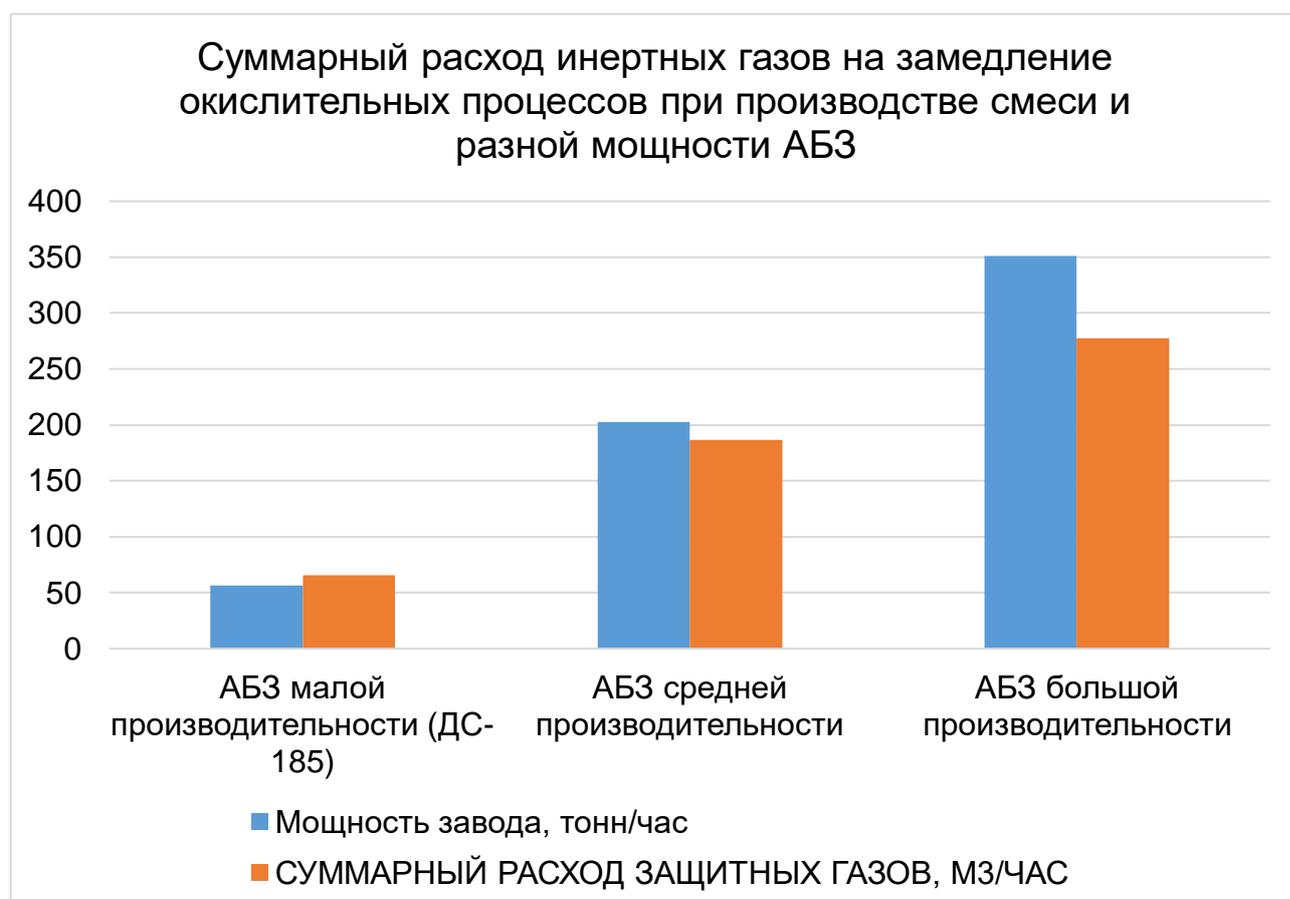


Рисунок 4.3 – Суммарный расход защитных газов на замедление окислительных процессов при производстве смеси и разной мощности АБЗ

Далее была поставлена задача по определению способа получения защитных газов на АБЗ: рассматривались варианты регулярной покупки защитных газов и собственного производства азота из воздуха. Ниже приведены диаграммы с расчетными показателями. Можно сделать вывод, что единовременные капитальные затраты при покупке газа ниже, чем при собственном производстве (рис. 4.4, 4.5).

Однако анализ диаграммы на рисунке 4.6 выявил, что себестоимость и отпускная цена 1 тонны асфальтобетонной смеси при обработке защитным газом и собственном производстве азота будет ниже, чем при его закупке, для заводов малой мощности, но с ростом объемов выпуска стоимость практически уравнивается.

Очевидно, что решающим фактором при окончательном выборе способа получения защитного газа должна быть экономия при эксплуатации покрытия, уменьшение общих потерь, а также экологические факторы, которые можно полностью решить только при рекуперации газов.

В рамках данной работы учитывалась экономия при эксплуатации дорожного покрытия и уменьшение социально-экономических потерь от плохого качества дорог. Установлено, что фактический 5-летний межремонтный срок будет сокращен на 9,5 месяцев при данной обработке асфальтобетонной смеси, снизятся и социально-экономические потери на 15,8% (таблица Б.7 Приложения Б).

Изменение срока эксплуатации и стоимости покрытия при применении обработки асфальтобетонной смеси защитным газом (исходя из стоимости асфальтобетонной смеси, выпускаемой за час, и стоимости укладки 1 м^2 покрытия толщиной 4 см) отражено на рис. 4.8.

Анализ диаграммы показывает, что экономия на ремонте дорожного покрытия будет вдвое выше роста стоимости строительства. Причем стоимость строительства дорог в среднем незначительно дешевле при собственном производстве азота, чем при покупке газа.



Рисунок 4.4 – Капитальные единовременные затраты на оснащение АБЗ системой подачи азота в бункер-смеситель, руб.

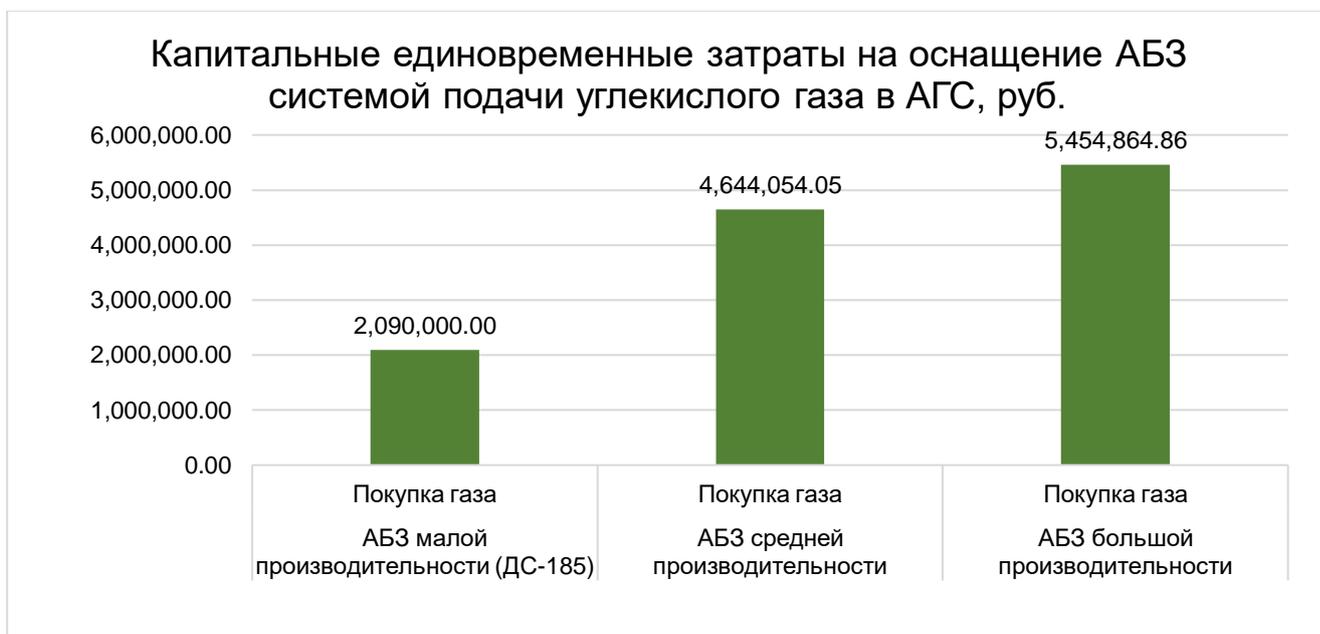


Рисунок 4.5 – Капитальные единовременные затраты на оснащение АБЗ системой подачи углекислого газа в АГС, руб.

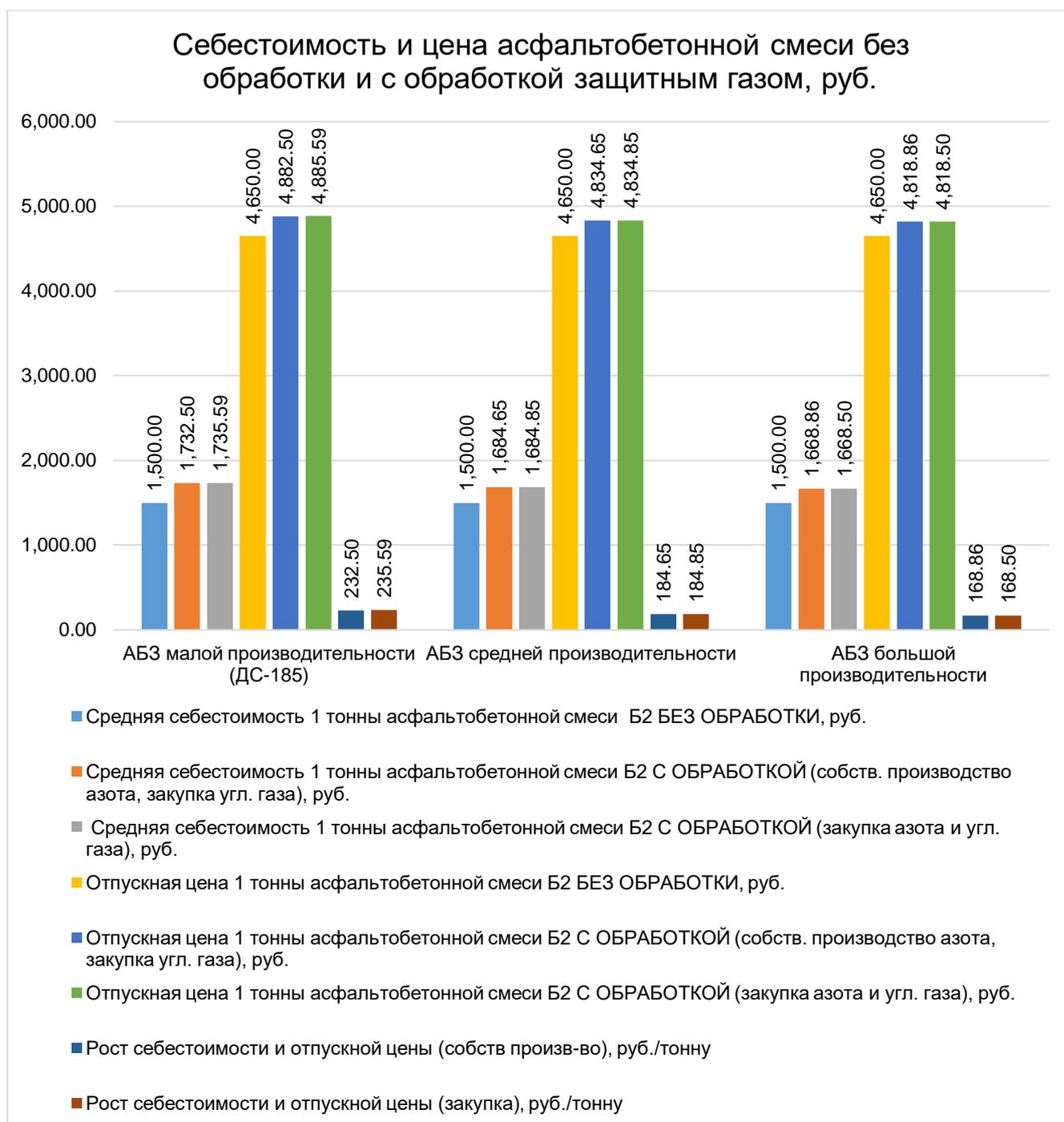


Рисунок 4.6 – Себестоимость и цена асфальтобетонной смеси без обработки и с обработкой защитным газом, руб. на 1 тонну

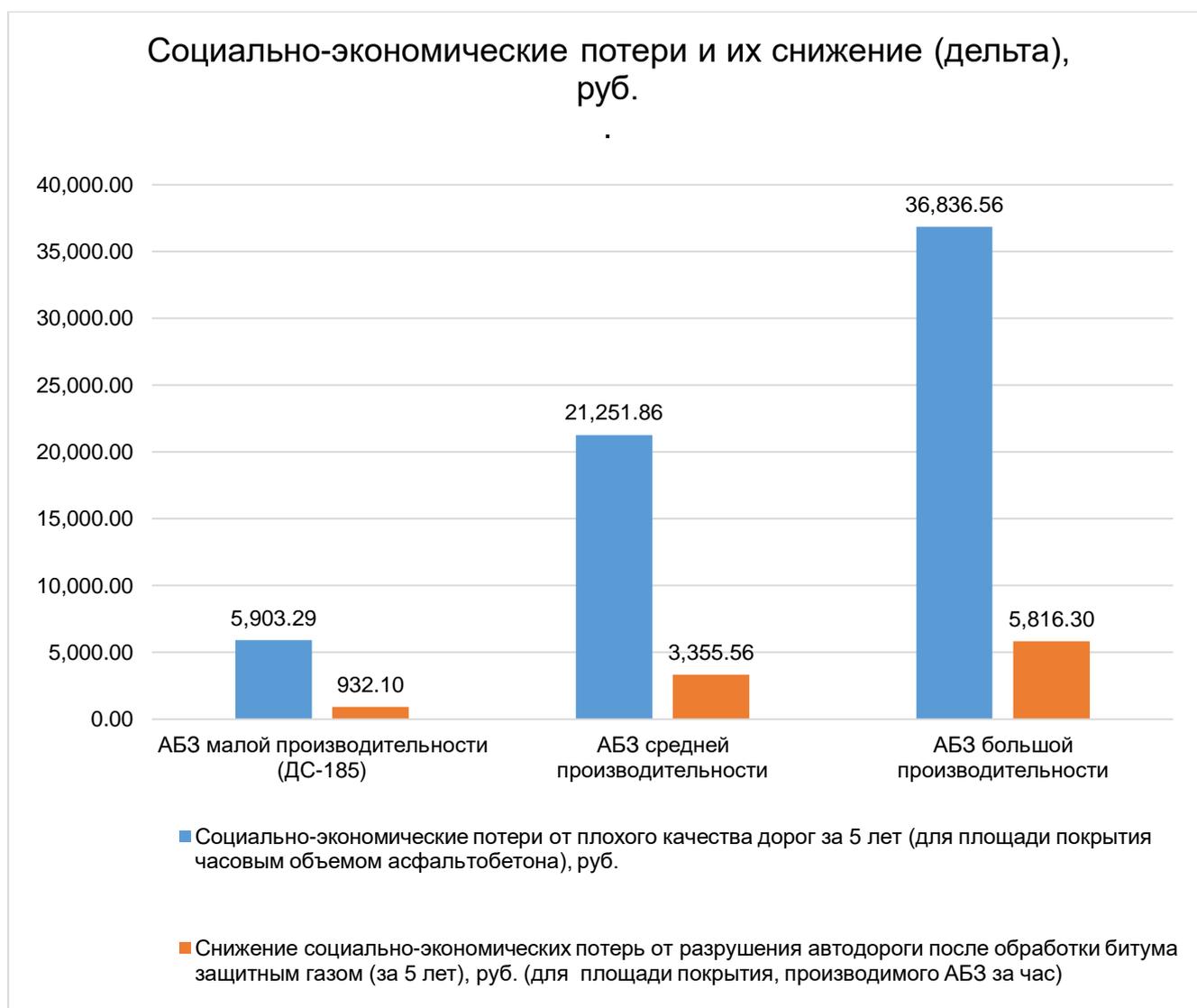


Рисунок 4.7 – Изменение (дельта) социально-экономических потерь, руб.

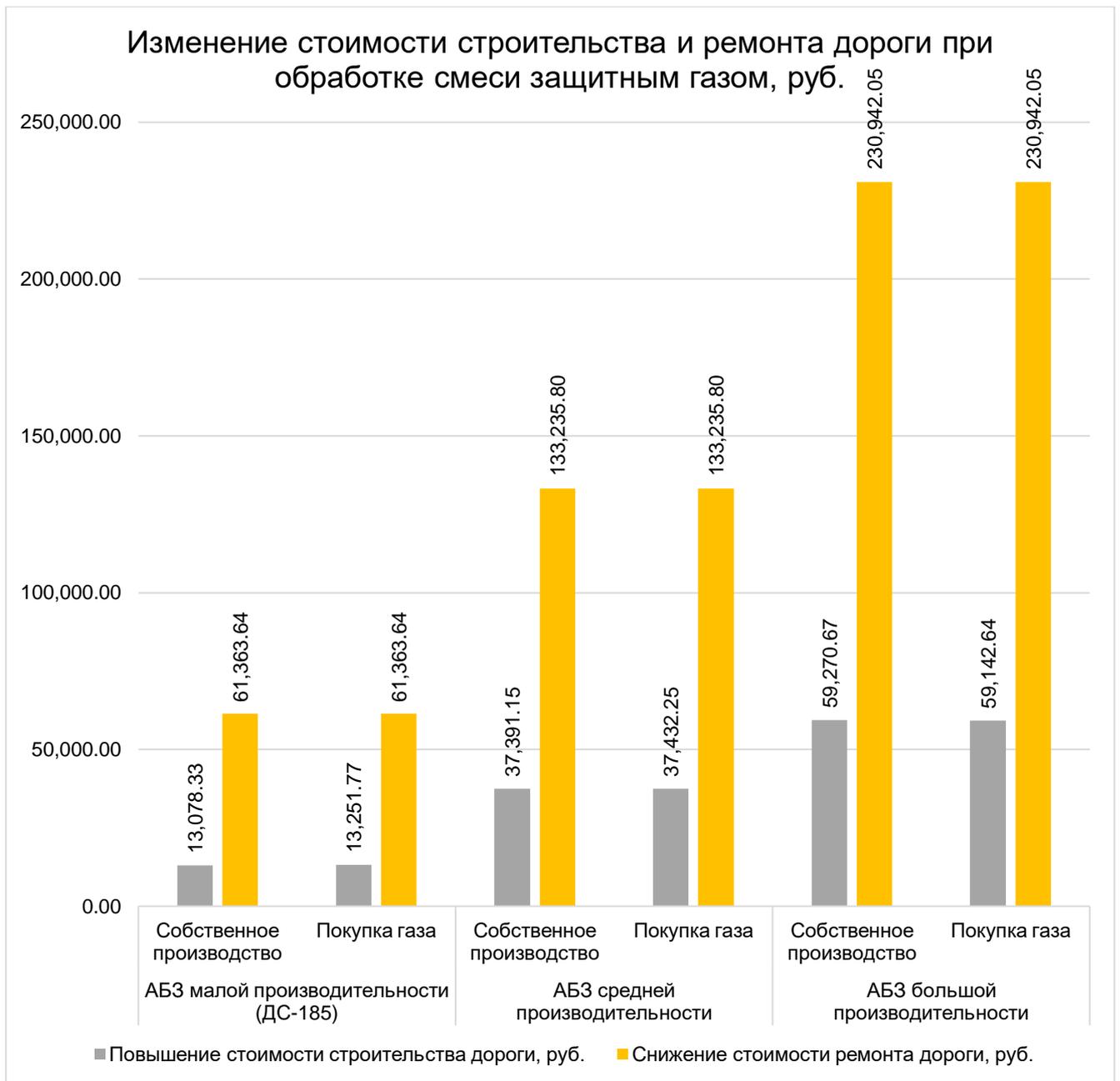


Рисунок 4.8 – Изменение стоимости строительства и ремонта дороги при обработке смеси защитным газом, руб.

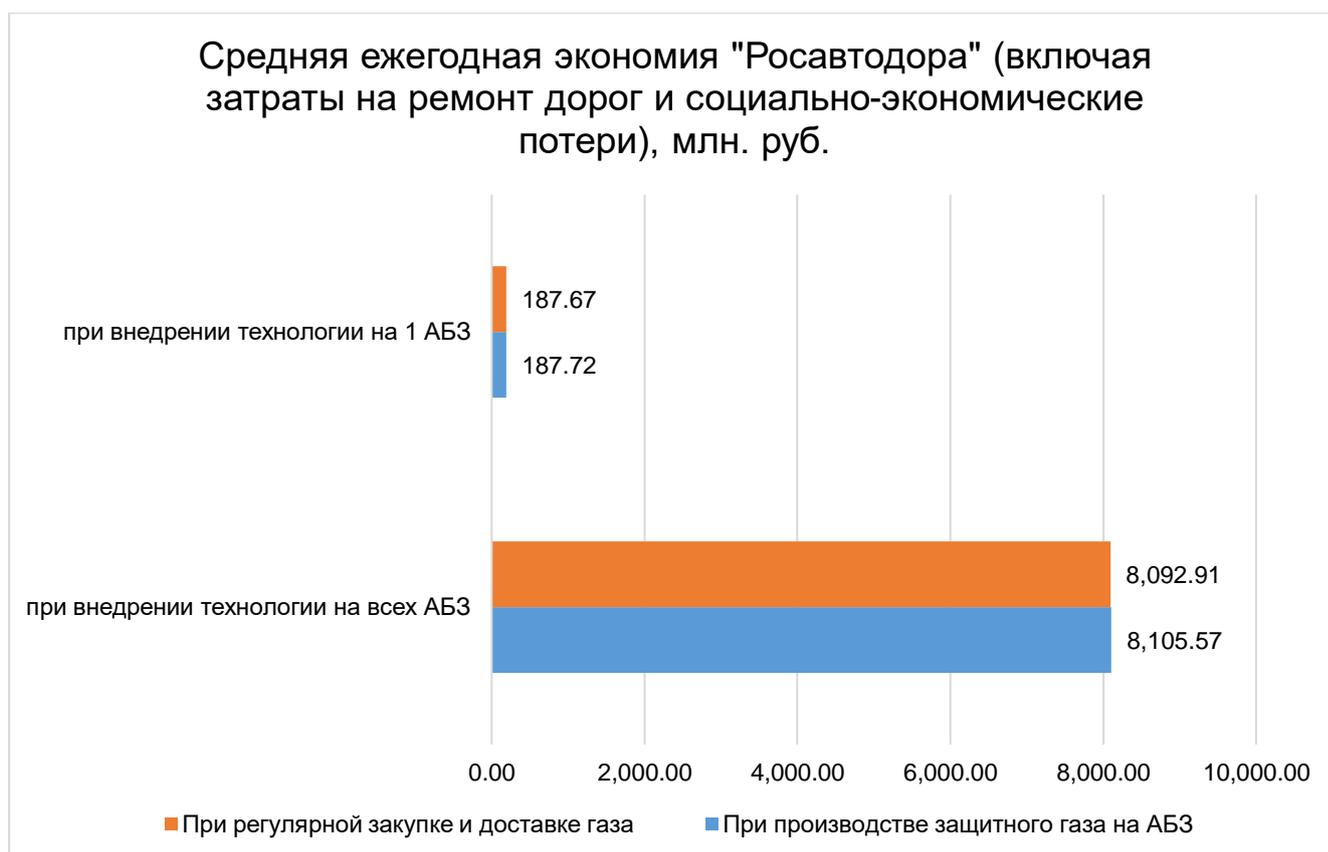


Рисунок 4.9 – Средняя ежегодная экономия ООО «Росавтодор» (включая затраты на ремонт дорог и социально-экономические потери), млн. руб.

Общая средняя ежегодная экономия средств ООО «Росавтодор» при применении обработки смеси защитным газом (из расчета интегрального коэффициента влияния качества битума на качество асфальтобетона, а также включая затраты на ремонт дорог и социально-экономические потери) представлена на рис.4.9. Анализ диаграммы показывает, что:

- при внедрении технологии обработки защитными газами на 1 АБЗ экономия на ремонте дорожного покрытия составит 187,67 млн. руб. в год – при регулярной закупке газа, 187,72 млн. руб. в год – при собственном производстве;
- при внедрении технологии на всех АБЗ – 8 092,91 млрд. руб. и 8 105,57 млрд. руб.

Таким образом экономия при собственном производстве азота незначительно выше.

Процесс перемешивания асфальтобетонной

4.2. Рекомендации по прогнозированию долговечности асфальтобетона при применении инертной газовой среды

В процессе приготовления асфальтобетонных масс на этапе смешивания происходит максимальное соприкосновение кислородосодержащего газа (воздух) с разогретым битумом (до температуры, превышающей 180 °С), который в виде тонких пленок распределяется по поверхности твердого наполнителя. Основная часть жидкой фракции битума представляет собой масла. В основном речь идет о смеси нафтенов, полинафтенов и углеводородов метанового ряда. При этом происходит максимальное окислительное превращение с образованием перекисных групп (или гидроокисильных). Данный процесс сходен с процессами, происходящими в жирах растительного и животного происхождения. Следовательно, сделано предположение о применимости методов исследования перекисного числа (то есть содержания активного кислорода) в растительных жировых маслах к битумам, таким образом, оценивая его окисленность и количество накопленных перекисей.

Предварительные анализы вяжущего в разных агрегатных состояниях показали явные изменения перекисного числа искусственно состаренного битума относительно стандартного. Однако необходимо учитывать множество процессов, связанных со старением битума, таких, как:

- образование ароматических асфальтенов;
- окислительные реакции;
- последующие процессы разрушения асфальтенов;
- образование макромолекул;
- изменение физических структурных свойств материала и др.

Следовательно, принимать единственно верным способом оценки старения битума определение изменения перекисного числа невозможно. Однако, сделав предположение относительно изменения битума по перекисному числу, мы можем принять решение о необходимости дополнительных испытаний, приняв во внимание данный метод как косвенную экспресс-методику определения старения битумов.

Основной задачей исследования было определение эффективности внесения защитного газа в основные технологические процессы приготовления асфальтобетонной массы, при которых происходят окислительные процессы и, следовательно, процессы старения битума.

Рассматривались различные варианты инертных газов, как замещающих кислород воздуха. Классические инертные газы неприменимы по причине их высокой стоимости и экономической неэффективности такого способа, именно поэтому были выбраны защитные газы, обладающие свойствами инертности, но к данной группе не относящиеся.

В качестве защитного газа рассматривался углекислый газ. Его преимущество состоит в более высоком молярном весе относительно воздуха и способности заполнять свободное пространство в зоне смешивания асфальтобетонных масс. Тем не менее, на основной стадии смешивания не рекомендовано применение углекислого газа, что связано с возможными множественными химическими реакциями, начиная от различных углекислотных образований и заканчивая образованием радикальных соединений с ароматическими группами, которые могут приводить к последующему накоплению нежелательных веществ, включая канцерогены (присоединение метильных групп к ароматическим кольцам с образованием толуола и других производных).

Таким образом, наиболее перспективным с точки зрения экономики применимости метода является использование азота, как наиболее защитного и доступного газа именно в технологическом процессе смешивания при производстве асфальтобетонных масс. В последующем при хранении свежей

асфальтобетонной массы преимущество более тяжелого углекислого газа будет превалировать по сравнению с более летучим азотом. Поэтому для промышленного производства асфальтобетонной смеси рекомендовано применение азота на этапе смешивания асфальтобетонных масс и углекислого газа на этапе накопления и хранения в бункерах перед отгрузкой.

Методы введения данных защитных газов могут быть осуществлены за счет барботирования миксера-смесителя перфорированными трубчатыми распылителями, установленными в нижней части смесителя, в мертвых зонах относительно рабочих лопастей в случае применения азота. И распыления углекислого газа сверху при наполнении и хранении в емкостях накопителях.

В ходе проведения испытаний зафиксирована разница в перекисном числе окисленного и неокисленного битума составила 4 единицы. Данный показатель может варьироваться в исходном битуме до процесса смешивания, что не позволяет применять данный метод, как универсальный для всех видов битума. Следовательно, необходимо проведение серии экспериментальных исследований с установлением предельных параметров изменений перекисного числа в различных технологических процессах смешивания на различном оборудовании, а также составление атласа значений перекисного числа исходного битума всех его типов.

Прогнозируя изменение долговечности асфальтобетонного покрытия при применении защитного газа в производстве асфальтобетонной смеси, мы смогли оценить основные колебания контролируемых параметров – колееобразование, коэффициент пенетрации и прочие, включая изменения перекисного числа. Проведенные исследования показали положительные тенденции и эффективность применения защитных газов, однако оценить численное изменение долговечности асфальтобетонных покрытий на данном этапе невозможно. Данное обстоятельство связано с нелинейностью вносимых изменений относительно изменений структуры асфальтобетонных покрытий.

Для анализа долговечности асфальтобетонного покрытия рассмотрим основные факторы влияющие на долговечность покрытия и возможные пути нахождения численного значения долговечности при внесении изменений.

Качество дорожного покрытия и его долговечность — это баланс между нагрузкой и структурой покрытия. Оценивая влияние добавок в составе асфальтобетонной смеси, мы вносим изменения в структуру покрытия. Прежде чем перейти к оценке данных изменений рассмотрим данный баланс.

Нагрузку можно разделить на два основных фактора:

- Природный – все физико-химические воздействия. Ультрафиолетовое излучение, перепады температур, осадки, подвижность грунтов, возможные подземные изменения, включая тектонические сдвиги и землетрясения, могут быть в виде не фиксируемых приборами воздействий, которые оказывают влияние только по прошествии определенного времени;

- Техногенный – непосредственное механическое влияние внешних факторов нагрузки на структуру дорожного покрытия. Такие как автотранспорт, дорожные работы, химические реагенты и прочее.

Можно рассмотреть каждый фактор влияния по отдельности и выполнив научную работу с серией экспериментов, определить его степень влияния на выбранный стандартный образец асфальтобетонного покрытия. Также повторить данную серию экспериментов при внесении определенных добавок в рецептуру смеси выбранного стандартного образца. Данная работа при условии выполнения однозначного анализа качества покрытия, несмотря на масштабность факторов, была бы возможна, если бы не взаимное влияние техногенных и природных факторов друг на друга, т. е. синергизма процессов. Когда влияние одного из факторов нагрузки увеличивает или уменьшает воздействие другого фактора. Таким образом, с научной точки зрения стремясь к точности оценки, мы приходим практически бесконечному количеству вариаций.

Однако на практике мы обобщаем влияние факторов и выводим какую-то среднюю величину воздействия в зависимости от географического расположения автодороги и степени техногенной нагрузки. И далее, исходя из этого

определения и эмпирической составляющей оценки долговечности, т. е. оценки качества покрытия, а также из его реального срока службы на данном участке, определяем его долговечность и регламент ремонтно-профилактических работ.

Рассмотрим влияние структуры. В определении структуры покрытия также сталкиваются два понятия – изготовление образца асфальтобетонного покрытия и инструментально-методологическая оценка полученного результата.

Инструментально-методологическая оценка может не показать реальные изменения структуры покрытия по множеству причин. Тут можно привести различные примеры. Так, влияние от вносимой модифицирующей добавки на целостность покрытия может быть сформировано не только в процессе формирования смеси, но и гораздо позже [42, 43]. Влияние добавления серы, которое при первичном анализе структуры с такой добавкой дает положительный результат, не учитывает дальнейшего сильнее окислительного воздействия, которое может привести к состариванию битумной составляющей и, соответственно, к последующему разрушению всей структуры. Понятно, что химия процессов в данной ситуации объяснит ее капсулирование и снижение активности, за счет малых температур и высокой вязкости структуры, однако учесть все факторы дальнейшего влияния будет невозможно.

Данные закономерности позволяют на сегодняшний день выявить принципиальное воздействие добавок на конечную структуру, а дальнейшее применение в промышленном масштабе на некоторых участках автодорог даст примерную практическую оценку применимости и степени полезного эффекта. Однако численно в лаборатории провести оценку влияния вносимых добавок на срок службы дорожного покрытия пока невозможно. Решение этой проблемы в данный момент находится в развитии технических способов оценки.

В рамках научной работы одним из методов оценки качества структуры покрытия, как наиболее полной и технически доступной, осуществляем с помощью установки для испытания асфальтобетона на колееобразование. На установке имитируется процесс деформации дорожных покрытий под действием многократных колесных нагрузок транспортных средств.

Испытания проводятся в автоматическом режиме с индикацией и запоминанием как промежуточных параметров (количество циклов воздействия, глубина колеи, температура испытаний), так и их окончательных результатов.

Полученные результаты можно сравнивать с контрольными образцами составов без внесения добавок, а изменения глубины колеи дает нужную нам численную характеристику. Однако данные изменения влияния добавок не могут быть привязаны к изменениям сроков эксплуатации автодорог, так как нет количественной привязки к стандартам образцов, а, главное, к параметрам влияния и степени данных изменений. Влияние внесенных образцов на изменение глубины колееобразования является нелинейным. И, например, при прочих равных условиях **дополнительное** определенное количество добавки может вызывать изменение глубины колеи **дополнительно на 5 %**, но данное 5%-е изменение при реальной эксплуатации может изменить срок службы автодороги как на 1% или даже значительно меньше, так и на гораздо большую величину.

Таким образом, мы приходим к пониманию необходимости создания единой открытой базы данных результатов испытаний при стандартизации и выборе определенных констант при выполнении экспериментов. Дальнейшее математическое моделирование позволит получить правильную концепцию развития отрасли. В дальнейшем только массив достоверных данных позволит формировать новых рецептуры с оптимальными с математической точки зрения количественными и качественными рецептурными компонентами, позволит избежать плагиата и не нужных повторений известных испытаний и с другой стороны учесть влияние стохастических воздействий. Кроме того, здесь необходимо законодательное регламентирование оценки качества дорожного покрытия.

Также целесообразно внесение показателей перекисного числа во все нормативные документы для битума и смесей содержащих битум и продукты его переработки.

Отметим негативные факторы разработанной технологии:

1. Рост выбросов CO₂ и азота;

2. Возможность попадания в рабочую зону защитных газов, вытесняющих кислород;

3. Необходимость для АБЗ нести дополнительные затраты.

В связи с этим особое внимание следует уделить:

– возможности отвода оксида азота, монооксида углерода и двуоксида углерода при аспирации газов на АБЗ для возвратного получения азота и углекислого газа;

– разработке механизма рекуперации, то есть отвода отработанных защитных газов для повторного использования и установления циклического процесса.

Данное направление частично рассматривалось в рамках исследования, но требует дальнейшего тщательного и всестороннего изучения.

Проблема дополнительных затрат на модернизацию, связанную с подачей защитных газов, компенсируется для завода – ростом цены за 1 тонну асфальтобетонной смеси, для «Росавтодора» – сокращением затрат на ремонт дорожного покрытия и социально-экономических потерь, как уже было сказано в п. 4.1.

Все разработанные рекомендации сведены в схеме на рис. 4.10.



Рисунок 4.10 – Рекомендации по совершенствованию технологии производства асфальтобетонной смеси

4.3. Выводы по Главе 4

Основные выводы по результатам выполнения ТЭО:

1. Суммарный коэффициент, влияния качества битумного вяжущего, состаренного в разных средах, на износостойкость и эксплуатационные характеристики асфальтобетонного дорожного покрытия, равен 1,16.

2. Расчет технико-экономических показателей подтвердил незначительность роста себестоимости и цены асфальтобетонной смеси при применении обработки защитными газами, а также увеличение фактического межремонтного срока на 9,5 месяцев и, соответственно, сокращение затрат на ремонт покрытия и социально-экономических потерь от плохого качества дорог.

3. Капитальные затраты при собственном производстве азота больше, чем при покупке газа, но итоговые экономические показатели при собственном производстве выше.

В числе усовершенствований технологии производства асфальтобетонной смеси с точки зрения уменьшения окисления (старения) битумного вяжущего рекомендовано:

1. Применение защитного газа (азота) в миксере для смешивания методом барботирования смеси;

2. Применение защитного газа (углекислого) в бункерах для хранения готового асфальтобетонной смеси;

3. Применение перекисного числа в качестве косвенного показателя окисленности и старения битума;

4. Законодательное внесение метода определения перекисного числа в нормативно-техническую базу;

5. Создание единой открытой базы данных результатов испытаний при стандартизации и выборе определенных констант при выполнении экспериментов.

В числе проблем, связанных с практической реализацией и внедрением данной технологии одной из главных является рост выбросов газов, что можно решить путем рекуперации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной диссертационной работы на тему «Замедление процессов старения битумного вяжущего обработкой защитными газами при производстве асфальтобетонной смеси» решены задачи, обусловленные поставленной целью данного научного исследования, то есть найдено инновационное решение проблемы старения битума при производстве асфальтобетонной смеси, а также разработаны рекомендации по совершенствованию методов исследования в данной области.

В **первой главе** определены основные тенденции международной и отечественной практики производства и применения дорожных битумов. Так, за рубежом в дорожных одеждах применяется преимущественно не окисленный битум. Поскольку с учетом российских реалий переход на не окисленные битумы затруднен, а проблема старения битума заложена на начальном этапе его производства, именно поэтому в работе теоретически обосновано, что инновации должны касаться совершенствования технологии производства асфальтобетонной смеси на базе окисленных битумов.

Старение битума обусловлено его составом, технологическими режимами производства асфальтобетонной смеси и условиями дальнейшей эксплуатации готовой асфальтобетонной смеси.

Суть старения битумного вяжущего заключается в окислении, то есть поэтапном дегидрировании и превращении масел в смолы, а смол – в асфальтены и так далее с последующей усадкой и разрушением структур асфальтобетонного покрытия. Выявлено, что окисленный битум относится к реологическому типу «золь-гель», состарившийся – к типу «гель», то есть с высоким содержанием асфальтенов и со структурной жесткой сеткой из них.

Классическим показателем старения являются индексы пенетрации и дисперсности, причем дисперсность битума обратно пропорциональна продолжительности и температуре нагрева вяжущего.

Скорость старения (термоокисления) вяжущего является максимальной на этапе производстве асфальтобетонной смеси, поскольку технология предполагает длительный нагрев и контакт с открытым кислородом воздуха.

Во **второй главе** был сформулирован тезис о том, что термоокисление битума при смешивании и хранении асфальтобетонной смеси можно замедлить путем введения защитного газа в технологические емкости. Режим перемешивания минеральных материалов с битумом в смесителе циклического действия играет основную роль в процессе приготовления смеси. Для подтверждения научной гипотезы влияния защитного газа на качество приготавливаемой горячей асфальтобетонной смеси был разработан алгоритм исследования, включающий построение физико-математической модели влияния защитного газа на старение битумного вяжущего в технологических процессах смешивания и хранения горячей асфальтобетонной смеси для получения качественных дорожных покрытий.

Разработана физико-математическая модель, которая учитывает влияние защитных газов на термоокислительную устойчивость битумного вяжущего для получения качественных дорожных покрытий и позволяет моделировать изменение свойств горячей асфальтобетонной смеси при смешивании и хранении в инертной среде.

В **третьей главе** были проведены лабораторные, а затем производственные испытания согласно разработанному алгоритму проведения исследований.

В ходе проведения экспериментов исследованы реологические характеристики битумов, состаренных в разных газовых средах. Определено, что:

1. Остаточная пенетрация при состаривании в кислородосодержащей ниже, чем в инертной.

2. С увеличением удельного расхода воздуха остаточная пенетрация пропорционально снижается, поскольку чем больше объем подаваемого кислорода, тем интенсивнее происходит состаривание.

3. Потеря массы в инертной среде замедлилась, а температура размягчения повысилась менее значительно, чем при старении в условиях окисления воздухом.

4. После старения снижение дуктильности значительно в обоих случаях, но изменения при термостарении (без присутствия кислорода) менее выражено.

5. Регрессионные модели изменения вязкости битумных структур подтвердили, что формирующаяся коагуляционная структура становится прочнее

при термостарении (в присутствии защитного газа) и разрушается при термоокислительных процессах (в присутствии кислорода воздуха).

6. Комплексный модуль жесткости G^* при ТОС RTFOT вырос примерно в 2 раза, а после PAV – в 6500-7000 раз. При ТС RTFOT состаривании без кислорода G^* меньше примерно на 20%.

7. Усталостная устойчивость после состаривания в инертной среде показала лучший результат примерно на 7%.

8. Фазовый угол при традиционном кислородном состаривании уменьшается от показателей исходного битума в среднем на 40-60 после RTFOT и на 10°-16° после PAV. Это изменение фазового угла менее выражено при состаривании в инертной среде в среднем на 2-3°.

9. При низких температурных режимах RTFOT-состаривание в кислородсодержащей среде приводит к росту жесткости битума примерно 1,5 раза, а PAV-состаривание после ТОС RTFOT закономерно вызывает рост жесткости до 2,5-3 раз. В инертной среде этот показатель меньше примерно на 100 МПа.

10. Прогиб балочки для более жесткого битума меньше, его сопротивление деформации – выше. Однако, потеря пластичных свойств при низких температурах приведет к ускоренному разрушению по причине роста хрупкости.

11. Скорость отклика образцов БНД 60/90 на изменение температуры после состаривания в инертной среде закономерно выше, так как возможность для релаксации такого битума выше, чем более жесткого.

12. Испытания на колееобразование асфальтобетона показали почти одинаковые результаты, зато предел прочности при непрямом растяжении и коэффициент водостойкости у образцов с вяжущим после термостарения битума выше, чем у образцов после термоокислительного старения.

13. Испытания на колееобразование асфальтобетона показали почти одинаковые результаты, зато коэффициент водостойкости у образцов с вяжущим после термостарения битума выше, чем у образцов после термоокислительного старения: снижение температурного трещинообразования составило, в среднем, 8,15%.

По результатам теоретических исследований разработаны технологический процесс и технологическая схема АБЗ с применением защитных газов.

По результатам исследований отобранных образцов установлено, что:

1. Значения всех пределов прочности закономерно возрастают для всех образцов, что указывает на старение асфальтобетонной смеси на каждом технологическом этапе.

2. Если смесь готовилась при $T_{пр} = 165^{\circ}\text{C}$, то предел прочности на изгибе заметно ниже как при термоокислительном старении, так и в присутствии инертной среды, чем при $T_{пр} = 180^{\circ}\text{C}$. Предел прочности на растяжение при расколе при повышенных температурах производства выше, чем при стандартной, и приближается к верхним допустимым границам. Воздействие высоких температур приводит к потере упруго-пластичных свойств асфальтобетонного покрытия и интенсивному трещинообразованию при отрицательных температурах.

3. Количество циклов до усталостного разрушения закономерно падает, причем, этот процесс происходит тем скорее, чем выше первоначальная температура приготовления смеси. Разница этого показателя для всех испытанных образцов невелика.

4. На основании полученных результатов экспериментальных исследований и регрессионного анализа были получены математические модели испытания, корректно описывающие функции отклика от варьируемых факторов, установлены рациональные области ограничений их значений и спрогнозирована степень влияния на показатели эксплуатационных свойств асфальтобетонной смеси.

5. Испытания образцов асфальтобетона в климатической камере окончательно подтвердили, что наличие инертной среды при обычной температуре приготовления смеси ($160^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) замедляет процессы старения в среднем на 8-9 %. При температуре 180°C влияние инертной среды уже незначительно (не превышает 1-2%).

Подводя итоги по **четвертой главе**, сделаны выводы на основании результатов технико-экономического обоснования:

1. Суммарный коэффициент, влияния качества битумного вяжущего, состаренного в разных средах, на износостойкость и эксплуатационные характеристики асфальтобетонного дорожного покрытия, равен 1,16.

2. Расчет технико-экономических показателей подтвердил незначительность роста себестоимости и цены асфальтобетонной смеси при применении обработки защитными газами, а также увеличение фактического межремонтного срока на 9,5 месяцев и, соответственно, сокращение затрат на ремонт покрытия и социально-экономических потерь от плохого качества дорог.

3. Капитальные затраты при собственном производстве азота больше, чем при покупке газа, но итоговые экономические показатели при собственном производстве выше.

В числе усовершенствований технологии производства асфальтобетона с точки зрения уменьшения окисления (старения) битумного вяжущего рекомендовано:

1. Применение защитного газа (азота) в миксере для смешивания методом барботирования смеси;

2. Применение защитного газа (углекислого) в бункерах для хранения готовой асфальтобетонной смеси;

3. Применение перекисного числа в качестве косвенного показателя окисленности и старения битума;

4. Законодательное внесение метода определения перекисного числа в нормативно-техническую базу;

5. Создание единой открытой базы данных результатов испытаний при стандартизации и выборе определенных констант при выполнении экспериментов.

В числе проблем, связанных с практической реализацией и внедрением данной технологии одной из главных является рост выбросов газов, что можно решить путем рекуперации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. ГОСТ 11506-73 «Битумы нефтяные. Метод определения температуры размягчения по кольцу и шару». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200005003> (дата обращения: 18.01.2024).
2. ГОСТ 11503-74 Битумы нефтяные. Методы определения условной вязкости. – URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4294850/4294850547.htm> (дата обращения: 18.01.2024).
3. ГОСТ 11501-78 Битумы нефтяные. Методы определения глубины проникания иглы. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/4657/> (дата обращения: 18.01.2024).
4. ГОСТ 22245-90 «Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003410> (дата обращения: 18.01.2024).
5. ГОСТ Р 12801-98 Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/436/43662.pdf> (дата обращения: 18.07.2022).
6. ГОСТ 9128-2013 «СМЕСИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫЕ, ПОЛИМЕРАСФАЛЬТОБЕТОННЫЕ, АСФАЛЬТОБЕТОН, ПОЛИМЕРАСФАЛЬТОБЕТОН ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И АЭРОДРОМОВ». – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200108509> (дата обращения: 18.01.2024).
7. ГОСТ 33133-2014 «Битумы нефтяные дорожные вязкие». – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293763/4293763250.pdf> (дата обращения: 14.01.2024).
8. ГОСТ 33134-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Определение индекса пенетрации». – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293763/4293763250.pdf> (дата обращения: 14.01.2024).

18.02.2024).

9. ГОСТ 33136-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения глубины проникания иглы. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/614/61433.pdf> (дата обращения: 20.01.2024).

10. ГОСТ 33137-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения динамической вязкости ротационным вискозиметром. – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293763/4293763143.pdf> (дата обращения: 18.01.2024).

11. ГОСТ 33138-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения растяжимости. – URL: <https://meganorm.ru/Data/600/60090.pdf> (дата обращения: 18.01.2024).

12. ГОСТ 33140-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения старения под воздействием высокой температуры и воздуха (метод RTFOT). – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/601/60105.pdf> (дата обращения: 18.01.2024).

13. ГОСТ Р 33141-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения температур вспышки. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200121055> (дата обращения: 18.01.2024).

14. ГОСТ 33142-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения температуры размягчения. Метод Кольцо и Шар. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293763/4293763526.pdf> (дата обращения: 15.01.2024).

15. ГОСТ 33143-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Метод определения температуры хрупкости по Фраасу. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293763/4293763244.pdf> (дата обращения: 18.01.2024).

16. ГОСТ Р 58400.5-2019 МАТЕРИАЛЫ ВЯЖУЩИЕ НЕФТЯНЫЕ БИТУМНЫЕ. Метод старения под действием давления и

температуры (PAV). – URL: https://allgosts.ru/93/080/gost_r_58400.5-2019 (дата обращения: 18.01.2024).

17. ГОСТ Р 58400.8-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения жесткости и ползучести битума при отрицательных температурах с помощью реометра, изгибающего балочку (BBR). – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293729/4293729382.pdf> (дата обращения: 18.01.2024).

18. ГОСТ Р 58400.10-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения свойств с использованием динамического сдвигового реометра (DSR). – URL: https://allgosts.ru/93/080/gost_r_58400.10-2019 (дата обращения: 18.01.2024).

19. ГОСТ 58401.11-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения усталостной прочности при многократном изгибе. – URL: <https://npalib.ru/2019/06/06/gost-r-58401-11-2019-id177525/p13/> (дата обращения: 18.01.2024).

20. ГОСТ Р 58401.18-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения водостойкости и адгезионных свойств. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/711/71137.pdf> (дата обращения: 18.01.2024).

21. ГОСТ Р 58406.8-2019 ДОРОГИ АВТОМОБИЛЬНЫЕ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ. СМЕСИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫЕ ДОРОЖНЫЕ И АСФАЛЬТОБЕТОН. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОМУ ТЕЧЕНИЮ ПО МЕТОДУ МАРШАЛЛА. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/709/70978.pdf> (дата обращения: 18.01.2024).

22. ГОСТ Р 58406.6-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения предела прочности на растяжение при изгибе и предельной относительной деформации растяжения. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/736/73612.pdf> (дата обращения: 18.01.2024).

18.01.2024).

23. ГОСТ Р 58406.3-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения стойкости к колееобразованию прокатыванием нагруженного колеса. – URL: https://euro-test.ru/Pub.Lib/Normativ_docs/GOSTR58406.3-20.pdf (дата обращения: 18.01.2024).

24. ГОСТ Р 58406.5-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения истираемости. – URL: <https://matest.ru/uploads/russian-standards/GOSTR58406.5-20.pdf> (дата обращения: 18.01.2024).

25. ГОСТ Р 58406.10-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. СМЕСИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫЕ ДОРОЖНЫЕ И АСФАЛЬТОБЕТОН». – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/736/73613.pdf> (дата обращения: 18.01.2024).

26. ОДМ 218.7.005-2008. Росавтодор. Рекомендации по методу определения устойчивости к старению вязких нефтяных дорожных битумов. – М., 2009. – 16 с.

27. ОДМ 218.03.20-2012 Методические рекомендации по обеспечению устойчивости битумов против старения в технологических процессах изготовления и применения асфальтобетонных смесей / Федеральное дорожное агентство Росавтодор. – 2012. – 38 с.

28. ОДМ 218.4.036–2022 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИГОТОВЛЕНИЮ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ, ИХ УКЛАДКЕ, А ТАКЖЕ ПРИЕМКЕ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ ПО СИСТЕМЕ ОБЪЕМНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ. – URL: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/16-odm2184036-2022.pdf> (дата обращения: 27.01.2024).

29. Об исполнении федерального бюджета Федерального дорожного агентства в 2021 году / Федеральное дорожное агентство «Росавтодор». – URL: <https://rosavtodor.gov.ru/about/upravlenie-fda/finansovo-ekonomicheskoe-upravlenie/ispolnenie-federalnogo-byudzheta/> (дата обращения: 27.01.2024).

30. Приказ государственной компании «Росавтодор» от 20 марта 2019 № 75. – – URL: https://russianhighways.ru/upload/iblock/031/Prikaz-_-75-ot-20.03.19_75_20_03_2019_ver1_.PDF_0.pdf (дата обращения: 18.01.2024).

31. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ на производство горячей, мелкозернистой, плотной асфальтобетонной смеси тип А, I марки с добавкой PR PLAST.S. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/493593653> (дата обращения: 18.01.2024).

УЧЕБНИКИ, НАУЧНАЯ ЛИТЕРАТУРА

32. Виноградов Г.В. Реология полимеров / Г.В. Виноградов, А.Я. Малкин. – М.: «Химия», 1977. – 438 с.

33. Гарманов, В.Н. Расчет температуры дорожного покрытия, основанный на проведенных наблюдениях / В. Н. Гарманов, И. С. Сахаров // Каталог-справочник: Дорожная техника. – Санкт-Петербург: ООО «Славутич», 2013. – С. 54-56.

34. Гезенцевей, Л.Б. Асфальтовый бетон. - М.: Изд. литературы по строительству, 1964. - 447 с.

35. Горельшева, Л.А. Новые эффективные методы ремонта, содержания и совершенствования асфальтобетонных покрытий: Обзор. информ. / Л.А. Горельшев. – М.: Информавтодор, 2006. – 104 с.

36. Дорожно-строительные материалы / И.М. Грушко, И.В. Королев, И.М. Борщ и др. // Учеб. для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1991. – 357 с.

37. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. В 2-х кн. М.: Финансы и статистика, 1986. — 366 с.

38. Дытнерский, Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов, ч.2 М: Химия, 2005. – 400 с.

39. Золотарев, В.А. Технологические, реологические и поверхностные свойства битумов. Избранные труды. Т. 1 / В.А. Золотарев. – Санкт-Петербург: Славутич, 2012. – 148 с.

40. Иваньски, М. Асфальтобетон как композиционный материал с нанодисперсными и полимерными материалами / М. Иваньски, Н.Б. Урьев // Под общ. ред. д.х.н. Н.Б. Урьева. – М.: Техполиграфцентр, 2007. – 668 с.
41. Калашникова, Т.Н. Строительство и ремонт асфальтобетонных покрытий: Учебное пособие / Т.Н. Калашникова, М.Б Сокольская. – М.: Экон-Информ, 2010. – 344 с.
42. Калгин, Ю.И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов: монография / Ю.И. Калгин. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2006. – 271 с.
43. Ковалев, Я. Н. Теплотехнологическое обеспечение качества строительства дорожных асфальтобетонных покрытий: Учебно-метод. пособие / Ковалев Я.Н., Вербило И.Н., Кравченко С.Е.; Под ред. Ковалева Я.Н. - Москва: НИЦ ИНФРА-М, Нов. знание, 2015. - 303 с. (ВО: Бакалавриат) ISBN 978-5-16-010293-1. - Текст : электронный. – URL:<https://znanium.com/catalog/product/483092> (дата обращения: 01.02.2024). – Режим доступа: по подписке.
44. Колбановская, А.С. Дорожные битумы / А.С. Колбановская, В.В. Михайлов – Москва: Транспорт, 1973. – 246 с.
45. Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы [Электронный ресурс] : сборник примеров и задач : учебное пособие / Е. В. Михеева, Н. П. Пикула; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт природных ресурсов (ИПР), Кафедра физической и аналитической химии (ФАХ). — 2-е изд., перераб. и доп.. — 1 компьютерный файл (pdf; 1.4 МВ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2013.
46. Котлярский, Э.В. Органические вяжущие: учеб. пособие / Э.В. Котлярский, Т.Н. Акимова. – М.: МАДИ, 2011. – 96 с.
47. Ладыгин, Б. И. Прочность и долговечность асфальтобетона / под ред. Б. И. Ладыгина, И. К. Яцевича. Минск: Наука и техника, 1972. - 286 с.
48. Малкин, А.Я. Реология: концепции, методы, приложения / А.Я. Малкин, А.И. Исаев // Пер. с англ. – СПб.: Профессия, 2007. – 560 с.

49. Михеева, Е.В., Пикула, Н.П., Карбаинова, С.Н. Поверхностные явления и дисперсные системы. Коллоидная химия. Сборник примеров и задач: учебное пособие для студентов ХТФ, ФТФ, ЭЭФ, ИГНД и ИДО- Томск: Изд-во ТПУ, 2008. - 116 с.
50. Мягченков, В.А. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебное пособие - 2-е изд., перераб.. — Москва: КолосС, 2007. – 188 с.
51. Органические вяжущие для дорожного строительства: Учеб. пособ. для вузов по специальности «Автомобильные дороги и аэродромы» / С.К. Илиополов, И.В. Мардиросова, Е.В. Углова и др. – Ростов-на-Дону. – 2003. – 428 с.
52. Печеный Б.Г. Битумы и битумные композиции / Б.Г. Печеный. – М.: Химия. – 1990. – 256 с.
53. Печеный, Б.Г. Оптимизация технологии приготовления асфальтобетонных смесей / Б.Г. Печеный, Е.А. Данильян // Дорожная техника. Каталог- справочник. Технологии строительства, реконструкции, ремонта и содержания автомобильных дорог. – Санкт-Петербург: ООО «Славутич», 2014. – С. 56-59.
54. Сарданашвили С. А. Расчетные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа). – М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 2005. – 577 с.
55. Силкин, В.В. Асфальтобетонные заводы: Учебное пособие / В.В. Силкин, А.П. Лупанов. – М.: Экон-Информ, 2008 г. – 266 с.
56. Современное производство битума. Технологии и оборудование. Воробьев А.Е., Воробьев К.А., Тчаро Х. – Ridero, 2018 – 460 с.
57. Строительные материалы. Учебно-справочное пособие. Под ред. Несветаева Г. В., Ростов на Дону: Феникс, 2005. – 508 с.
58. Углова, Е.В. Расчет усталостной долговечности асфальтобетонных покрытий. Учебное пособие / Е.В. Углова, О.В. Дровлева. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2008. – 104 с.
59. Углова, Е.В. Усталостная долговечность эксплуатируемых

асфальтобетонных покрытий / Е.В. Углова, С.К. Илиополов, М.Г. Селезнев. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2009. – 244 с.

60. Унгер, Ф.Г. Фундаментальные и прикладные результаты исследования нефтяных дисперсных систем / Институт нефтехимпереработки Республики Башкортостан (ИНХП). —Уфа: Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2011. –262 с.

61. Физико-химические свойства нефтяных дисперсных систем и нефтегазовые технологии: сборник статей / под ред. Р. З. Сафиевой, Р. Сюняева. — Москва: Институт компьютерных исследований, 2007. — 580 с.

62. Формирование структуры композиционных материалов и их свойств / Б.В. Гусев, В.И. Кондращенко, Б.П. Маслов и др. – М.: Научный мир, 2006. – 560 с.

63. Черножуков, Н.И. Исследование в области окисления высокомолекулярных углеводородов и нефтяных масел в жидкой фазе. В. кн.: Проблемы окисления углеводородов / Н.И. Черножуков. – М., Изд-во АН. СССР, 1954. – С. 167.

64. Ядыкина В.В. Управление процессами формирования и качеством строительных композитов с учетом состояния поверхности дисперсного сырья: монография / В.В. Ядыкина // Издательство Ассоциации строительных вузов. – М.: 2009. – 373 с.

ДИССЕРТАЦИИ

65. Адиль, Ибрагим Мохамед Эль-Хаг Атиг. Дорожные асфальтополимерсеробетоны для региональных условий Республики Судан: дис.... канд. техн. наук: 05.23.05 / Адиль Ибрагим Мохамед Эль-Хаг Атиг. – Макеевка: ДонГАСА, 1998. – 121 с.

66. Акимов, А.Е. Повышение качества асфальтобетона путем обработки битума полем сверхвысокой частоты : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.05 / Акимов Андрей Евгеньевич; [Место защиты: Белгород. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова].- Белгород, 2010.- 189 с.

67. Мелихов, О.О. Минимизация энергозатрат и сохранение качества

битума при обезвоживании: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / О.О. Мелихов. – Ростов-на-Дону, 2010. – 23 с.

68. Чан, Нят Тан Регулирование термоокислительной стабильности дорожных битумов и битумных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07 / Чан Нят Тан. – Москва, 2010. – 121 с.

СТАТЬИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВАК:

69. Чудайкин, А. Д. Экспериментально-статистическое моделирование влияния температурных режимов производства асфальтобетонной смеси и объемов подаваемых защитных газов на процесс термоокислительного старения / В. П. Подольский, А. Д. Чудайкин // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2024. – № 3(75). – С. 94-102.

70. Чудайкин, А. Д. Оценка эффективности применения защитных газов для замедления термоокислительного старения битумного вяжущего при производстве асфальтобетонных смесей состаривании / В. П. Подольский, А. Д. Чудайкин, И. В. Константинова // Вестник Московского автомобильно-дорожного института (государственного технического университета). – 2024. – № 1(76). – С. 3-10.

71. Чудайкин, А. Д. Формирование инертной среды при производстве асфальтобетонной смеси с целью замедления процессов деградации битума / В. П. Подольский, А. Д. Чудайкин // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2024. – № 2(74). – С. 68-76.

72. Чудайкин, А. Д. Влияние инертных газов на свойства битумного вяжущего при RTFOT-состаривании / В. П. Подольский, А. Д. Чудайкин, И. В. Константинова // Строительная механика и конструкции. – 2024. – № 1(40). – С. 120-128.

73. Чудайкин А.Д. Изменения свойств асфальтобетонов в процессе старения / А. Д. Чудайкин, О. В. Рябова, А. С. Минаков, Р. С. Поляков //

Строительная механика и конструкции. – 2023. – № 2(37). – С. 98-107.

В других научных изданиях:

74. Чудайкин А.Д. Влияние поверхностно-активных веществ на взаимодействие битумов с минеральными материалами / Чудайкин А.Д., Строкин А.С. // Высокие технологии в строительном комплексе. 2021. № 2. С. 195-200.

75. Чудайкин А.Д. Пористые асфальтобетонные смеси с улучшенными технологическими свойствами / Чудайкин А.Д., Строкин А.С. // Высокие технологии в строительном комплексе. 2020. № 1. С. 50-55.

76. Чудайкин А.Д. Шлаковый асфальтобетон на модифицированном вяжущем / Поляков Р.С., Строкин А.С., Чудайкин А.Д. // Высокие технологии в строительном комплексе. 2019. № 2. С. 26-31.

77. Чудайкин А.Д. Каркасный асфальтобетон с повышенными деформативно-прочностными характеристиками / Чудайкин А.Д., Строкин А.С., Поляков Р.С. // Высокие технологии в строительном комплексе. 2018. № 2. С. 100-106.

СТАТЬИ В ЖУРНАЛАХ И СБОРНИКАХ

78. Барская, Е.Е., Юсупова Т.Н., Сараев Д.В.. В кн. Нефтепереработка-2008: международная научно-практическая конференция (Уфа, 21 мая 2008 г.). (Материалы! конференции). Изд-во ГУП ИНХП, Уфа, 2008. С. 62.

79. Бахрах, Г.С. Проектирование нежестких дорожных одежд по критерию усталостного растрескивания / Г.С. Бахрах // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2008. – №2. – С. 51-59.

80. Белоконь, Н.Ю. Исследование влияния группового состава гудронов на качество промышленных окисленных битумов / Н.Ю. Белоконь, В.Г. Компанец, И.В. Колпаков // Научно-технический журнал «Нефтепереработка и нефтехимия». – 2001. – №1. – С. 19-23.

81. Битумы и ПБВ для дорог: производство и потребление в современном мире. Результаты VII межотраслевой конференция «PRO Битум и ПБВ. Актуальные вопросы 2018». – URL:

https://dorinfo.ru/99_detail.php?ELEMENT_ID=64025 (дата обращения: 25.01.20224).

82. Братчун, В.И. Модифицированные горячие литые асфальтополимербетонные смеси / В.И. Братчун, Н.А. Столярова, В.Л. Беспалов // Современные проблемы строительства 2006: Ежегодный научно-технический сборник. – Донецк: Государственный НИИ, 2006. – №4. – С. 199-203.

83. Вайнбендер, В.Р. Требования к гудронам для производства дорожных битумов / В.Р. Вайнбендер, В.Т. Ливенцев // Научно-технический журнал «Химия и технология топлив и масел». – 2003. – №4. – С. 45-47.

84. Вафин, А. Р., Мингалеева, Г. Р. Исследование основных свойств мазутоугольных топлив // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. №5-6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-osnovnyh-svoystv-mazutougolnyh-topliv> (дата обращения: 19.03.2024).

85. Галдина, В.Д. Кинетика термоокислительного старения битумов различной природы / В.Д. Галдина // Вестник ТГАСУ. – 2011. – №3. – С. 133-139.

86. Галдина, В.Д. Г – 15 Модифицированные битумы: учебное пособие. – Омск: СибАДИ, 2009. – 228 с.

87. Голдина, В.Д. Прогнозирование свойств асфальтобетона во времени / В.Д. Голдина // Ускорения научно-технического прогресса, повышение производительности труда и качества дорожных работ тезисы докладов и сообщений VII Всесоюзного совещания дорожников. – М.: Министерство транспортного строительства. Государственный Всесоюзный дорожный научно-исследовательский институт (СоюздорНИИ). – С. 18-19.

88. Ганеева, Ю.М. Асфальтеновые наноагрегаты: структура, фазовые превращения, влияние на свойства нефтяных систем / Ю.М. Ганеева. Т.Н. Юсупова, Г.В. Романов // Успехи химии. - 2011. - Т. 80. - №10. — С. 1034-1050.

89. Ганеева, Ю.М. Твёрдые парафины в окисленных битумах / Ю.М. Ганеева, Т.Н. Юсупова. Е.С. Охотникова, И.Н. Фролов // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. - 2012. - № 2. - С. 20-24.

90. Гохман, Л.М. Прочная взаимосвязь качества битумов и структуры сырья, применяемого для их производства / Л.М. Гохман, Е.М. Гурарий, А.Р. Давыдова // Автомобильные дороги. – 2011. – №1(950). – С. 77-83.

91. Джумаева, О., Солодова Н.Л., Емельянычева Е.А. Основные тенденции производства битумов в России // Вестник Казанского технологического университета. 2015. №20. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-tendentsii-proizvodstva-bitumov-v-rossii> (дата обращения: 25.01.20224).

92. Ефремов, С.В. Влияние агрессивных сред на долговечность асфальтобетонов с различным содержанием вяжущего / С.В. Ефремов // Материалы междунар. науч.-практ. интернет-конф. «Современные методы строительства дорог и обеспечение безопасности движения», БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2007. – С. 120-126.

93. Илиополов, С.К. Старение битума в рабочем котле АБЗ / С.К. Илиополов, Ю.Я. Никулин, С.С. Саенко //Дороги и мосты. – 2009. – Вып. 21/1. – С. 208-219.

94. Как устроен мировой рынок битума / Официальный сайт ООО «Инфратест». – URL:<https://infratestrus.ru/news/kak-ustroen-mirovoy-rynok-bituma/>(дата обращения: 27.01.2024).

95. Калгин, Ю.И. Прогнозирование работоспособности модифицированного асфальтобетона в дорожном покрытии / Ю.И. Калгин, А.С. Строкин, Е.Б. Тюков // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2014. – №2(34). – С. 83-92.

96. Касаткин, Ю.Н. Старение и структурная долговечность битумоминеральных материалов в конструкции / Ю.Н. Касаткин // Строительные материалы. – 2001. – № 9. – С. 30-33.

97. Котлярский, Э.В. Изменение свойств асфальтобетона в присутствии химически агрессивных сред / Э.В. Котлярский // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2008. – № 2. – С. 21-24.

98. Леонович, И.И., Пожах, Н.В. Современные проблемы экологии асфальтобетонных заводов // Наука и техника. 2010. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-problemy-ekologii-asfaltobetonnih-zavodov> (дата обращения: 18.02.2024).

99. Лукашевич, В.Н. Исследование влияния технологии приготовления асфальтобетонных смесей на процессы старения асфальтового вяжущего при использовании волокнистых сорбентов в качестве дисперсной арматуры / В.Н. Лукашевич, И.Н. Ефанов // Вестник ТГАСУ. – 2012. – № 2. – С. 191-196.

100. Лукашевич, В.Н. Увеличение срока службы асфальтобетонных покрытий за счет двухстадийного введения органических связующих в процессе производства асфальтобетонных смесей / В.Н. Лукашевич // Строительные материалы. – 2003. – №1. – С. 24-25.

101. Максимов, М.В., Анищенко, О.В. ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА БИТУМА ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА И СПОСОБЫ ИХ РЕШЕНИЯ // Международный студенческий научный вестник. – 2018. – № 2.; – URL:<https://eduherald.ru/ru/article/view?id=18137> (дата обращения: 25.02.2024).

102. Мурашкина, А.В. Влияние технологических параметров процесса окисления гудронов на показатели качества битумов / А.В. Мурашкина, Е.А. Мещерякова, Н.М. Лихтерова // Вестник МИТХТ. – 2010. – т. 5, № 4. – С. 63-69.

103. Николенко, М.А. Повышение длительной трещиностойкости асфальтобетона дорожных покрытий / М.А. Николенко, Б.В. Бессчетнов // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 2. – С. 665-671.

104. Обухов А.Г., Высоцкая М.А. ЭФФЕКТИВНЫЕ БИТУМНЫЕ ВЯЖУЩИЕ ДЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2021. №11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnyye-bitumnyye-vyazhuschie-dlya-asfaltobetonnih-pokrytiy> (дата обращения: 19.03.2024).

105. Осиновская, В.А. Прогнозирование долговечности асфальтобетонных покрытий на основе уровней их вибронагруженности // Наука и техника. 2015. №6. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-dolgovechnosti>

обращения: 11.02.2024).

106. Охотникова, Е.С. Высокомолекулярная фракция асфальтенов и ее влияние на структуру и устойчивость окисленных битумов / Е.С. Охотникова, Ю.М. Ганеева, Т.Н. Юсупова, В.И. Морозов, И.Н. Фролов, Г.В. Романов // Нефтехимия. - 2011. — Т. 51.-№3.-С. 199-203.

107. Охотникова, Е.С. Особенности совместимости высоковязких нефтей / Е.С. Охотникова, Е.Е. Барская, Ю.М. Ганеева, Т.Н. Юсупова, Л.В. Федонина, Г.В. Романов // Химия и технология топлив и масел. - 2015. - № 1 (587). - С. 19-22.

108. Пермяков, В.Б. Критерии уплотнения горячих асфальтобетонных смесей / В.Б. Пермяков // Автомобильные дороги. – 2010. – №8 (945). – С. 88-90.

109. Почапский, Н.Ф. Влияние химико-минералогического состава минеральных порошков на старение асфальтового бетона / Н.Ф. Почапский, Л.И. Базжин // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1972. – № 10. – С. 12.

110. Проблемы дорожных битумов и их решение [Электронный ресурс]. – URL: <https://bpn-international.com/ru/road-industry> (дата обращения: 18.02.2024).

111. Романов, С.И. Современный выбор температурного регламента производства высококачественного окисленного нефтяного дорожного битума на нефтеперерабатывающих заводах / С.И. Романов, А.И. Лескин, Б.Г. Печеный // Вестник ВолгГАСУ. – 2008. – Вып. 11(30).– С. 87-90.

112. Саенко, С.С. Изменение свойств битума в рабочем котле АБЗ / С.С. Саенко // «Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки». – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2007 – №4. – С. 105-106.

113. Саенко, С.С. Пережиток прошлого. Способы усовершенствования технологии подачи битума в дозатор / С.С. Саенко, Ю.Я. Никулин // Автомобильные дороги. – 2011. – №7 (956). – С. 84-85.

114. Солиенко О.В. Применение ИК-спектроскопии в исследовании нефтей и нефтепродуктов / О.В. Солиенко // Инструментальные методы исследования нефти. – Новосибирск: Наука, 1987. – С. 18-41.

115. Старков Г.Б., Костылевский А.В., Попов А.М., Герасимов С.И.,

Тихомиров В.М. УЧЕТ ПРОЦЕССА СТАРЕНИЯ БИТУМА ПРИ УСТРОЙСТВЕ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2017. №4 (43). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uchet-protsessa-stareniya-bituma-pri-ustroystve-asfaltobetonnih-pokrytiy> (дата обращения: 19.03.2024).

116. Сукорзец, С.В. Причины старения битумоминеральных смесей / С.В. Сукорзец, П.Б. Рапопорт, Н.А. Хухрянская и др. // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2010. – № 3. – С. 31-32.

117. Суровцев, Л.П. Принципы создания современных клеев, мастик, герметиков и заливочных компаундов на полимерной основе для длительной эксплуатации в экстремальных условиях / Л.П. Суровцев // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2007. – №2. – С. 66-67.

118. Худякова, Т.Н. Загадки российского битума, или в поисках истины, Автомобильные дороги, 2, 72-77, (2005).

119. Эволюция битумов: стратегически важный продукт от ТАИФ-НК // Бизнес-газета «Реальное время». – – URL:<https://realnoevremya.ru/articles/259449-rochemu-tak-vazhen-bitum-znakomstvo-s-proizvodstvo-na-ao-taif-nk> (дата обращения: 27.01.2024).

120. Юсупова, Т.Н. Экспресс-оценка состава парафинов асфальтосмолопарафиновых отложений по данным термического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии / Т.Н. Юсупова, Ю.М. Ганеева. Д.А. Халикова. Г.В. Романов // Нефтехимия. - 2012. - Т. 52. - № 1. - С. 17-24.

121. Якубов, М. Р., Миникаева С. Н., Борисов Д. Н., Грязнов П. И., Романов Г. В., Харлампида Х. Э. Состав и свойства продуктов взаимодействия асфальтенов тяжелых нефтей с серной кислотой // Вестник КТУ. 2010. №7. – URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/sostav-i-svoystva-produktov-vzaimodeystviya-asfaltenov-tyazhelyh-neftey-s-sernoy-kislotoy> (дата обращения: 01.01.2024).

122. IV конгресс нефтегазопромышленников России. – Уфа, 2003. – 230 с.

ИНОСТРАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

123. Claire, A. Lemarchand Cooe bitumen: Chemical aging / Claire A.

Lemarchand, Thomas B. Schroder, Jeppe C. Dyre, Jesper S. Hansen // *The Journal of Chemical Physics* 139, 124506 (2013).

124. Effect of filler on the aging potential of asphalt mixtures / R. Recasene, Martinez, F. Jimenez, H. Bianchetto // *Journal of the Transportation Research Board*. – 2005. – № 1901. – pp. 10-17.

125. Farcas, F. Etude d'une methode de simulation du vieillissement sur route des bitumes / F. Farcas // *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*. – 1996.

126. Lesueur, D. The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification / D. Lesueur // *Advances in Colloid and Interface Science*, 145(1-2). – 2009. – pp. 42-82.

127. Liu, J. Evaluation of the characteristics of Trinidad Lake Asphalt and Styrene–Butadiene–Rubber compound modified binder / J. Liu // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 202. – P. 614–621.

128. Mohammed, A.A. The effect of ageing on physical and chemical properties of asphalt cement / A.A. Mohammed, K. Morshed // *Iraqi journal of chemical and petroleum engineering*. – 2008. – vol. 9, № 2 (june). – pp. 9-15.

129. Morgan, P. *The Shell Bitumen Industrial Handbook* / P. Morgan, A. Mulder. – Surrey, U.K.: Shell Bitumen, 1995. – 338 p.

130. Petersen, J. A review of the fundamentals of asphalt oxidation: chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships / J. Petersen // *Transportation Research E-Circular* (Vol. 1). *Transportation Research Board*. – 2009.

131. Themeli, A. Molecularstructure evolution of asphaltite-modified bitumens during ageing. Comparisons with equivalent petroleumbitumens / A. Themeli, E. Chailleux, F. Farcas, C. Chazallon, B. Migault, N. Buisson // *International Journal of Pavement Research and Technology*. – 2017. – Vol. 10, issue 1. – P. 75–83.

132. Qi Y. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. I. Oxygen absorption behaviors and kinetics / Y. Qi, F. Wang // *Petroleum Science and Technology*. – 2003. – 21(1). – pp. 283-299.

133. Qi Y. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. II. Chemical group composition and structure changes / Y. Qi, F. Wang // *Petroleum Science and Technology*. – 2004. – 22(3). – pp. 263-274.

134. Qi Y. Study and evaluation of aging performance of petroleum asphalts and their constituents during oxygen absorption. III. Average molecular structure parameter changes / Y. Qi, F. Wang // *Petroleum Science and Technology*. – 2004. – 22(3). – pp. 275-286.

135. Reyes, F.A. Determination of SARA fractions of environmentally aged Colombian asphalts using liquid chromatography column / F.A. Reyes, C.E. Daza, H.A. Rondón // *Revista EIA*, (17). – 2012. – pp. 47-56.

136. Siddiqui, M.N. Investigation of chemical transformations by NMR and GPC during the laboratory aging of Arabian asphalt / M.N. Siddiqui, M.F. Ali // *Fuel*. – 1999. – 78(12). – pp. 1407-1416.

137. Siddiqui, M.N. Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts Siddiqui / M.N. Siddiqui, M.F. Ali // *Fuel*. – 1999. – 78(9). – pp. 1005-1015.

ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ

138. Портал научно-технической информации электронной библиотеки «Нефть и газ». // – URL:[https:// www.nglib.ru](https://www.nglib.ru) (дата обращения: 01.01.2024).

139. Сайт Большой энциклопедии нефти и газа. // – URL:https://www.ngpedia.ru/img_index.html (дата обращения: 01.01.2024).

140. Сайт Ежегодной конференции «ПРО Битум и ПБВ» // – URL:<https://www.bitumconference.ru/>(дата обращения: 01.01.2024).

ИСТОЧНИКИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОКИСЛЕНИЯ БИТУМОВ

141. Булгаков, В. В. Обеспечение пожаровзрывобезопасности огневых аварийно-ремонтных работ на резервуарах способом инертизации: Дис. канд. техн. наук. — М., 2001. — 220 с.

142. Денисов, В.П., Траутвайн А.И., Яковлев Е.А. Разработка математического инструмента расчета температуры смешивания и уплотнения

асфальтобетонной смеси // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №8. С. 8–13.
DOI: 10.34031/article_5d492c80c1afb8.68554681

143. Калюжный, А. А. Математическая модель непрерывного смесителя в производстве битумных вибродемпфирующих материалов / А. А. Калюжный, В. П. Бирюков. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2015. — № 24.1 (104.1). — С. 62-65. — URL: <https://moluch.ru/archive/104/24060/> (дата обращения: 12.06.2024).

144. Корнилов, А. А., Бородин, А. А., Барбин, Н. М., Зыков, П. И., Хужаев, А. Т. Исследование оптимальных схем подачи инертного газа при флегматизации горизонтальных резервуаров // Пожаровзрывобезопасность. 2014. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-optimalnyh-shem-podachi-inertnogo-gaza-pri-flegmatizatsii-gorizontalnyh-rezervuarov> (дата обращения: 12.06.2024).

145. Михеев, М. А., Михеева, И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977. 344 с.

146. Никулин, Ю. Я., Саенко С. С. Минимизация старения битума в рабочем котле абз // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2007. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/minimizatsiya-stareniya-bituma-v-rabochem-kotle-abz> (дата обращения: 11.06.2024)

147. Huh, J.-D.; Robertson, R. E. 1996. Modeling of oxidative aging behavior of asphalts from short-term, high-temperature data as a step toward prediction of pavement aging, Transportation Research Record 1535: 91–97. <http://dx.doi.org/10.3141/1535-12>

148. Witczak, M.W., Bari, J. Development of a master curve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures // Arizona State University Research Report, Tempe (Arizona, USA): Arizona State University. 2004. 29 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Исходные данные для расчета технико-экономического обоснования

Таблица А.1 – Нормы для асфальтобетонной смеси марки II тип Б

Масса асфальтобетонной смеси Б2, кг	Норма битума, %	Норма битума, кг
1000	0,06	56,00

Таблица А.2 – Показатели для асфальтобетонных заводов разной мощности

Общие показатели АБЗ	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
Мощность завода в сутки, тонн	1 350,00	4 860,00	8 424,00
Мощность завода, тонн/час	56,25	202,50	351,00
Расход азота в час, м ³	39,90	117,45	194,45
Расход углекислого газа в час, м ³	25,55	69,05	82,86
Удельный расход электроэнергии (на тонну смеси) кВт*ч/т, не более	3,80	11,40	19,00
Удельный расход электроэнергии на общий производимый объем, кВт/ч	213,75	2 308,50	6 669,00
Вес 1 м ³ асфальта, кг	2 250,00	2 250,00	2 250,00

Таблица А.3 – Смета на строительство и ремонт дорог с укладкой асфальтобетонной смеси Б2, руб./м²

Подготовка основания дорожного полотна	Цена, руб.
ИТОГО СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГИ	1 465
Выборка грунта с погрузкой, вывозом и утилизацией	400
Формирование земляного корыта под отметку	100
Планировка территории с использованием виброкатка	75
Устройство основания из крупнозернистого песка - 5 см	130
Устройство основания из гравийного щебня толщиной 15 см	320
Устройство основания из мелкозернистого щебня -10 см	200
Обработка основания битумной эмульсией БНД60/90 (0.5 л на 1м ²)	20
Укладка асфальта толщиной 4 см	220
ИТОГО РЕМОНТ ДОРОЖНОГО ПРОКРЫТИЯ	800
Замена асфальта	800

Таблица А.4 – Показатели для бункера-смесителя

Параметры бункера-смесителя	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
Бункер-смеситель, двухвальный, горизонтальный, лопастной, шт.	1,00	1,00	1,00
Мощность бункера-смесителя, м ³ /ч.	25,00	90,00	156,00
Мощность бункера-смесителя, тонн/ч.	56,25	202,50	351,00
Максимальная масса	0,73	2,50	4,30

замеса, тонн			
Время приготовления одного замеса, сек	45,00	45,00	45,00
Время приготовления одного замеса, час	0,01	0,01	0,01
Количество замесов в час	77,05	81,00	81,63
Масса битума в одном замесе, тонн	0,04	0,14	0,24
Расход битума в час, тонн	3,15	11,34	19,66
Емкость бункера, м ³	1,00	2,80	4,60
Степень заполнения емкости смешиваемыми материалами, %	0,70	0,70	0,70

Таблица А.5 – Расчет затрат на подачу азота в бункер-смеситель

ПОДАЧА АЗОТА В БУНКЕР-СМЕСИТЕЛЬ	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
Переменные затраты на подачу азота			
Атмосферное давление, Па	101 325,00	101 325,00	101 325,00
Давление азота в баллоне, Па	20 000,00	20 000,00	20 000,00
Объем азота в 1 баллоне, м ³	6,10	6,10	6,10
Расход азота на 1 замес, м ³	0,45	1,26	2,07
Необходимое количество баллонов с азотом, шт.	6,54	19,25	31,88
Расход азота в час, м ³	39,90	117,45	194,45
Стоимость 1 м ³ азота, руб.	266,00	266,00	266,00
Процент потерь азота за счет негерметичности бункера, %	15,00%	15,00%	15,00%
Расход азота, руб. в час	10 614,29	31 241,69	51 723,50
Параметры азотной станции			
Максимальная мощность, кВт/ч	15,00	30,00	50,00
Средняя производительность, м ³ /ч	50,00	150,00	250,00
Требуемый расход, м ³ /ч	39,90	117,45	194,45
Удельный расход электроэнергии на производство азота, кВт/ч	11,97	23,49	38,89
Стоимость электроэнергии на производство азота, руб./ч	119,71	234,90	388,90
Параметры электропарового испарителя жидкого азота			
Максимальная мощность, кВт/ч	75,00	75,00	75,00
Средняя производительность, м ³ /ч	310,00	310,00	310,00
Требуемый расход, м ³ /ч	39,90	117,45	194,45
Удельный расход электроэнергии на испарение азота, кВт/ч	9,65	28,42	47,04
Стоимость электроэнергии на испарение азота до газообразного состояния, руб./ч	96,54	284,15	470,44
Параметры проточного взрывозащищенного нагревателя для азота			
Номинальная потребляемая мощность	30,00	30,00	30,00

ПОДАЧА АЗОТА В БУНКЕР-СМЕСИТЕЛЬ	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
проточного взрывозащищенного нагревателя азота, кВт			
Максимальная температура выхода азота, °С	400,00	400,00	400,00
Требуемая температура выхода азота, °С	160,00	160,00	160,00
Вес азота, кг в 1 м ³	1,25	1,25	1,25
Максимальный удельный расход азота в нагревателе, кг/ч	250,00	250,00	250,00
Требуемый расход, кг/ч	49,88	146,81	243,06
Удельный расход электроэнергии на подачу и нагрев азота во взрывозащищенном проточном нагревателе, кВт/ч	5,99	17,62	29,17
Стоимость электроэнергии на подачу и нагрев азота, руб./ч	59,86	176,17	291,67
Параметры барботера			
Номинальная потребляемая мощность барботера, кВт	30,00	30,00	30,00
Максимальный удельный расход азота в нагревателе, м ³	300,00	300,00	300,00
Требуемый расход, м ³	39,90	117,45	194,45
Удельный расход электроэнергии на подачу и нагрев азота во взрывозащищенном проточном нагревателе, кВт/ч	3,99	11,74	19,44
Стоимость электроэнергии на барботирование азота, руб./ч	39,90	117,45	194,45

Таблица А.6 – Капитальные затраты на подачу азота в бункер-смеситель

Вид и стоимость оборудования	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
Испаритель жидкостной для азота, руб.	185 000,00	185 000,00	185 000,00
Стоимость испарителя жидкостного для азота, распределенная на годовой выпуск смеси, руб.	0,38	0,10	0,06
Стоимость испарителя жидкостного для азота, распределенная с учетом часового выпуска продукции, руб.	21,12	21,12	21,12
Проточный взрывозащищенный нагреватель азота, руб.	405 000,00	405 000,00	405 000,00
Стоимость нагревателя азота, распределенная на годовой выпуск смеси, руб.	0,82	0,23	0,13
Стоимость нагревателя азота, распределенная с учетом часового выпуска продукции, руб.	46,23	46,23	46,23
Барботер для азота в бункере-смесителе, руб.	100 000,00	100 000,00	100 000,00
Стоимость барботера, распределенная на годовой выпуск смеси, руб.	0,20	0,06	0,03
Стоимость барботера, распределенная с учетом часового выпуска продукции, руб.	11,42	11,42	11,42
Объем стандартного баллона с жидким азотом, л	40,00	40,00	40,00
Объем газа в баллоне на 40 л	6,10	6,10	6,10
Мобильная (модульная) передвижная азотная станция	1 200 000,00	3 600 000,00	6 000 000,00

Вид и стоимость оборудования	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
адсорбционного типа			
Мощность установки, м ³ /ч	50,00	150,00	250,00
Стоимость азотной станции, распределенная на годовой выпуск смеси, руб.	2,44	2,03	1,95
Стоимость азотной станции, распределенная с учетом часового выпуска продукции, руб.	136,99	410,96	684,93

Таблица А.7 – Параметры агрегата готовой смеси

Параметры АГС	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
Количество бункеров	2,00	2,00	2,00
Вместимость бункера №1, м ³	22,68	77,00	126,00
Вместимость бункера №1, т	51,03	173,25	283,50
Вместимость бункера №2, м ³	9,72	33,00	54,00
Вместимость бункера №2, т	21,87	74,25	121,50
Общая вместимость бункеров, м ³	32,40	110,00	180,00
Общая вместимость, тонн	72,90	247,50	405,00
Степень заполнения емкости смешиваемыми материалами, %	0,77	0,82	0,87
Количество выгрузок в час	2,00	2,00	2,00

Таблица А.8 – Расчет затрат на подачу углекислого газа в бункеры хранения

Параметры подачи углекислого газа в АГС	АБЗ малой производительности и	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
Переменные затраты на подачу углекислого газа			
Давление углекислоты в баллоне, Па	5 880,00	5 880,00	5 880,00
Объем углекислого газа в 1 баллоне, м ³	12,12	12,12	12,12
Необходимое количество баллонов с углекислотой, шт.	2,11	5,70	6,84
Расход углекислого газа в час, м ³	25,55	69,05	82,86
Стоимость 1 м ³ подаваемого углекислого газа, руб.	70,00	70,00	70,00
Удельный расход электроэнергии на подачу и нагрев углекислого газа, кВт/ч	2,00	5,41	6,49
Стоимость электроэнергии на подачу и нагрев углекислого газа, руб./ч	20,00	54,05	64,86
Процент потерь углекислого газа за счет негерметичности бункера, %	15,00%	15,00%	15,00%
Доставка жидкой углекислоты на АБЗ, руб./час	200,00	200,00	200,00
Расход углекислого газа, руб. в час	1 988,33	5 033,33	6 000,00
Параметры электропарового испарителя углекислоты			
Максимальная мощность, кВт/ч	75,00	75,00	75,00
Средняя производительность, м ³ /ч	310,00	310,00	310,00
Требуемый расход, м ³ /ч	25,55	69,05	82,86
Удельный расход электроэнергии на испарение углекислого газа, кВт/ч	6,18	16,71	20,05
Стоимость электроэнергии на испарение углекислоты до газообразного состояния, руб./ч	61,81	167,05	200,46
Параметры проточного нагревателя углекислого газа			
Потребляемая мощность, кВт/ч	21,00	21,00	21,00

Параметры подачи углекислого газа в АГС	АБЗ малой производительности и	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
Максимальная производительность, кг/ч	600,00	600,00	600,00
Вес углекислого газа, кг в 1 м ³	1,98	1,98	1,98
Требуемый расход, кг/ч	50,58	136,71	164,06
Максимальная температура выхода углекислого газа, °С	400,00	400,00	400,00
Требуемая температура выхода углекислого газа, °С	160,00	160,00	160,00
Удельный расход электроэнергии на подачу и нагрев углекислого газа, кВт/ч	1,77	4,78	5,74
Стоимость электроэнергии на подачу и нагрев углекислого газа, руб./ч	17,70	47,85	57,42
Расчет экономии за счет подачи углекислого газа			
Мощность электронагревателей для обогрева стенок агрегата готовой смеси, кВт/ч	40,00	135,80	222,22
Удельный расход электроэнергии на подогрев стенок в бункерах хранения готовой смеси, кВт/ч	21,38	230,85	666,90
Затраты на электроэнергию, расходуемую на подогрев стенок, руб.	213,75	2 308,50	6 669,00
Приrost температуры при содержании углекислого газа 100 %, °С.	5,00	5,00	5,00
Экономия на подогреве стенок АГС, руб.	10,69	115,43	333,45

Таблица А.9 – Капитальные затраты на подачу углекислого газа в бункеры хранения

Вид и стоимость оборудования	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
1	2	3	4
Испаритель жидкостной для углекислоты, руб.	185 000,00	185 000,00	185 000,00
Стоимость испарителя жидкостного для углекислоты, распределенная на годовой выпуск смеси, руб.	0,38	0,10	0,06
Стоимость испарителя жидкостного для углекислоты, распределенная с учетом часового выпуска продукции, руб.	21,12	21,12	21,12
Проточный нагреватель углекислого газа, руб.	405 000,00	405 000,00	405 000,00
Стоимость нагревателя углекислого газа, распределенная на годовой выпуск смеси, руб.	0,82	0,23	0,13
Стоимость нагревателя углекислого газа, распределенная с учетом часового выпуска продукции, руб.	46,23	46,23	46,23
Расчет цистерны с углекислотой			
Стандартный баллон с углекислотой, л.	40,00	40,00	40,00
Объем газа в стандартном баллоне с жидкой углекислотой на 40 л, м ³	12,00	12,00	12,00
Объем газа в стандартном баллоне с жидкой	12 000,00	12 000,00	12 000,00

Вид и стоимость оборудования	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
углекислотой на 40 л, л			
Масса жидкой углекислоты в стандартном баллоне на 40 л., кг.	25,00	25,00	25,00
Объем цистерны с углекислотой, необходимой для часового выпуска асфальтобетонной смеси, литров	74,05	200,14	240,17
Объем цистерны с углекислотой, необходимой для суточного выпуска асфальтобетонной смеси, литров	1 777,22	4 803,31	5 763,97
Криоцистерна с углекислотой, руб.	1 500 000,00	4 054 054,05	4 864 864,86
Стоимость цистерны, распределенная на годовой выпуск смеси, руб.	3,04	2,29	1,58
Стоимость цистерны, распределенная с учетом часового выпуска продукции), руб.	171,23	462,79	555,35

Таблица А.10 – Показатели прибыли и окупаемости

Показатели прибыли и окупаемости	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
Средняя годовая чистая прибыль АБЗ, руб.	106 651 776,00	385 660 440,00	668 478 096,00
Сумма капитальных затрат при применении защитного газа, руб.	3 880 000,00	8 834 054,05	12 044 864,86
Простой срок окупаемости, лет	0,04	0,02	0,02

Таблица А.11 – Суммарные затраты на подачу защитных газов

Показатель	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
Мощность завода, тонн/час	56,25	202,5	351
СУММАРНЫЙ РАСХОД ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ, М ³ /ЧАС	65,45	186,50	277,31
Затраты капитальные - азот, руб.	1 890 000,00	4 290 000,00	6 690 000,00
Затраты переменные - азот, руб./час.	10 930,30	32 054,36	53 068,96
Затраты капитальные, распределенные на годовой выпуск - азот, руб.	215,75	489,73	763,70
Итого, переменные затраты, азот, руб./час.	11 146,06	32 544,09	53 832,66
Затраты капитальные - углекислый газ, руб.	2 090 000,00	4 644 054,05	5 454 864,86
Затраты переменные - углекислый газ, руб./час.	2 057,16	5 132,81	5 924,43
Затраты капитальные, распределенные на годовой выпуск – углекислый газ, руб./час.	238,58	530,14	622,70
Итого, переменные затраты, углекислый газ, руб./час.	2 295,74	5 662,95	6 547,13
ИТОГО, переменные затраты на подачу защитного газа в 1 год, руб./час.	13 441,80	38 207,04	60 379,79
ИТОГО, переменные затраты на подачу защитного газа в последующие 4 года, руб./час.	12 987,46	37 187,17	58 993,39
ИТОГО, средние переменные затраты на	13 078,33	37 391,15	59 270,67

Показатель	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
Мощность завода, тонн/час	56,25	202,5	351
СУММАРНЫЙ РАСХОД ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ, М ³ /ЧАС	65,45	186,50	277,31
подачу защитного газа за 5 лет, руб./час.			
ИТОГО, средние переменные затраты на подачу защитного газа за 5 лет, руб./на 1 тонну.	232,50	184,65	168,86
СУММАРНЫЕ ЗАТРАТЫ НА ПОДАЧУ ЗАЩИТНОГО ГАЗА, РУБ./ЧАС (в первый год с целью окупаемости капзатрат)	13 441,80	38 207,04	60 379,79
СУММАРНЫЕ ЗАТРАТЫ НА ПОДАЧУ ЗАЩИТНОГО ГАЗА, РУБ./НА 1 ТОННУ (в первый год с целью окупаемости капзатрат)	238,97	188,68	172,02
СУММАРНЫЕ ЗАТРАТЫ НА ПОДАЧУ ЗАЩИТНОГО ГАЗА, РУБ./ЧАС (в остальные 4 года между ремонтами покрытия)	12 987,46	37 187,17	58 993,39
СУММАРНЫЕ ЗАТРАТЫ НА ПОДАЧУ ЗАЩИТНОГО ГАЗА, РУБ./НА 1 ТОННУ (в остальные 4 года между ремонтами покрытия)	230,89	183,64	168,07

Таблица А.12 – Себестоимость и цены асфальтобетонной смеси

Показатель	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
Средняя себестоимость 1 тонны асфальтобетонной смеси Б2 БЕЗ ОБРАБОТКИ, руб.	1 500,00	1 500,00	1 500,00
Средняя себестоимость 1 тонны асфальтобетонной смеси Б2 С ОБРАБОТКОЙ, руб.	1 732,50	1 684,65	1 668,86
СУММАРНАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ ЧАСОВОГО ОБЪЕМА ВЫПУСКАЕМОЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ (БЕЗ ОБРАБОТКИ), РУБ./ЧАС	84 375,00	303 750,00	526 500,00
СУММАРНАЯ СЕБЕСТОИМОСТЬ ЧАСОВОГО ОБЪЕМА ВЫПУСКАЕМОЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ (С ОБРАБОТКОЙ), РУБ./ЧАС	97 453,33	341 141,15	585 770,67
Отпускная цена 1 тонны асфальтобетонной смеси Б2 БЕЗ ОБРАБОТКИ, руб.	4 650,00	4 650,00	4 650,00
Отпускная цена 1 тонны асфальтобетонной смеси Б2 С ОБРАБОТКОЙ (КОМПЕНСАЦИЯ ЗАТРАТ АБЗ), руб.	4 882,50	4 834,65	4 818,86
ОТПУСКНАЯ ЦЕНА ЧАСОВОГО ОБЪЕМА ВЫПУСКАЕМОЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ (БЕЗ ОБРАБОТКИ), РУБ./ЧАС	261 562,50	941 625,00	1 632 150,00
ОТПУСКНАЯ ЦЕНА ЧАСОВОГО ОБЪЕМА ВЫПУСКАЕМОЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ (С ОБРАБОТКОЙ), РУБ./ЧАС	274 640,83	979 016,15	1 691 420,67

Таблица А.13 – Нормативы расхода на асфальтобетонное покрытие

Показатель	АБЗ малой производи тельности	АБЗ средней производи тельности	АБЗ большой производи тельности
Расход асфальтобетона марки Б2 в тонн/ кв.м при слое в 4 см (норматив)	0,10	0,10	0,10
Потенциальная площадь покрытия часовым объемом выпущенной асфальтобетонной смеси, кв.м	562,50	2 025,00	3 510,00
Средняя стоимость укладки 1 м2 дорожных одежд толщиной 4 см (без стоимости асфальтобетона), руб.	1 465,00	1 465,00	1 465,00

Таблица А.14 – Затраты на обустройство и ремонт асфальтобетонного покрытия (ИСХОДЯ ИЗ СТОИМОСТИ ВЫПУСКАЕМОЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ В ЧАС И СТОИМОСТИ УКЛАДКИ 1 М² ТОЛЩИНОЙ 4 СМ), РУБ.

Показатель	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
СУММАРНАЯ СТОИМОСТЬ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД БЕЗ ОБРАБОТКИ, РУБ.	1 085 625,00	3 908 250,00	6 774 300,00
СУММАРНАЯ СТОИМОСТЬ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД С ОБРАБОТКОЙ ЗАЩИТНЫМ ГАЗОМ, РУБ.	1 098 703,33	3 945 641,15	6 833 570,67
СТОИМОСТЬ РЕМОНТА ДАННОГО УЧАСТКА АВТОДОРОГИ (ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕЗ ОБРАБОТКИ ЧЕРЕЗ 5 ЛЕТ), РУБ. - 25% от стоимости строительства	450 000,00	977 062,50	1 693 575,00
СТОИМОСТЬ РЕМОНТА ДАННОГО УЧАСТКА АВТОДОРОГИ (ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ С ОБРАБОТКОЙ ЧЕРЕЗ 5 ЛЕТ), РУБ.	424 243,93	921 139,63	1 596 642,02

Таблица А.15 – Нормативные и фактические межремонтные сроки

Показатель	Количество, лет
Межремонтный срок по ГОСТ Р 58861— 2020 "Дороги автомобильные общего пользования КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ И РЕМОНТ Планирование межремонтных сроков", лет	12,00
Средний фактический межремонтный срок дорожного покрытия из асфальтобетона марки Б2	5,00

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Расчет технико-экономической эффективности технологии (сравнение вариантов приобретения газов и собственное производство азота)

Таблица Б.1 – Затраты на постоянную подачу азота, руб./час

Показатель	АБЗ малой производительности		АБЗ средней производительности		АБЗ большой производительности	
	Собственное производство	Покупка газа	Собственное производство	Покупка газа	Собственное производство	Покупка газа
Расход азота, м3/час	39,90	39,90	117,45	117,45	194,45	194,45
Расход азота, руб. в час	10 614,29	0,00	31 241,69	0,00	51 723,50	0,00
Расход азота (с доставкой), руб. в час	0,00	10 914,29	0,00	31 541,69	0,00	6 000,00
Стоимость электроэнергии на производство азота, руб./ч	119,71	0,00	234,90	0,00	388,90	0,00
Стоимость электроэнергии на испарение азота до газообразного состояния, руб./ч	96,54	96,54	284,15	284,15	470,44	470,44
Стоимость электроэнергии на подачу и нагрев азота, руб./ч	59,86	59,86	176,17	176,17	291,67	291,67
Стоимость электроэнергии на барботирование азота, руб./ч	39,90	39,90	117,45	117,45	194,45	194,45
Суммарные затраты на подачу азота, руб./час	10 930,30	11 110,59	32 054,36	32 119,46	53 068,96	52 980,07

Таблица Б.2 – Капитальные затраты на оснащение АБЗ системой подачи азота в бункер-смеситель, руб.

Показатель	АБЗ малой производительности		АБЗ средней производительности		АБЗ большой производительности	
	Собственное производство	Покупка газа	Собственное производство	Покупка газа	Собственное производство	Покупка газа
Испаритель жидкостной для азота, руб.	185 000,00	185 000,00	185 000,00	185 000,00	185 000,00	185 000,00
Проточный взрывозащищенный нагреватель азота, руб.	405 000,00	405 000,00	405 000,00	405 000,00	405 000,00	405 000,00
Барботер для азота в бункере-смесителе, руб.	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00	100 000,00
Криогенный резервуар для хранения жидкого азота, руб.	0,00	900 000,00	0,00	2 649 024,00	0,00	4 385 704,19
Мобильная (модульная) передвижная азотная станция адсорбционного типа	1 200 000,00	0,00	3 600 000,00	0,00	6 000 000,00	0,00
Суммарные капзатраты, руб.	1 890 000,00	1 590 000,00	4 290 000,00	3 339 024,00	6 690 000,00	5 075 704,19

Таблица Б.3 – Затраты на постоянную подачу углекислого газа (покупка газа), руб./час

Показатель	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
Расход углекислого газа, м ³ /час	25,55	69,05	82,86
Расход углекислого газа, руб. в час	1 988,33	5 033,33	6 000,00
Стоимость электроэнергии на испарение углекислоты до газообразного состояния, руб./ч	61,81	167,05	200,46
Стоимость электроэнергии на подачу и нагрев углекислого газа, руб./ч	17,70	47,85	57,42
Экономия на подогреве стенок АГС, руб.	10,69	115,43	333,45
Суммарные затраты на подачу углекислого газа, руб./час	2 082,71	5 201,85	6 007,29

Таблица Б.4 – Капитальные затраты на оснащение АБЗ системой подачи углекислого газа в бункеры хранения (покупка газа), руб.

Показатель	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
Испаритель жидкостной для углекислоты, руб.	185 000,00	185 000,00	185 000,00
Проточный нагреватель углекислого газа, руб.	405 000,00	405 000,00	405 000,00
Криоцистерна с углекислотой, руб.	1 500 000,00	4 054 054,05	4 864 864,86
Суммарные капзатраты, руб.	2 090 000,00	4 644 054,05	5 454 864,86

Таблица Б.5 – Средние затраты на подачу защитного газа, руб. /час.

Показатель	АБЗ малой производительности		АБЗ средней производительности		АБЗ большой производительности	
	Собств. производство	Покупка газа	Собств. производство	Покупка газа	Собств. производство	Покупка газа
ИТОГО, средние переменные затраты на подачу защитного газа за 5 лет, руб./час.	13 078,33	13 251,77	37 391,15	37 432,25	59 270,67	59 142,64
ИТОГО, средние переменные затраты на подачу защитного газа за 5 лет, руб./на 1 тонну.	232,50	235,59	184,65	184,85	168,86	168,50

Таблица Б.6 – Себестоимость и цена асфальтобетонной смеси без обработки и с обработкой защитным газом (при собственном производстве азота и покупке всех газов)

Показатель	АБЗ малой производительности	АБЗ средней производительности	АБЗ большой производительности
Средняя себестоимость 1 тонны асфальтобетонной смеси Б2 БЕЗ ОБРАБОТКИ, руб.	1 500,00	1 500,00	1 500,00
Средняя себестоимость 1 тонны асфальтобетонной смеси Б2 С ОБРАБОТКОЙ (собств. производство азота, закупка угл. газа), руб.	1 732,50	1 684,65	1 668,86
Средняя себестоимость 1 тонны асфальтобетонной смеси Б2 С ОБРАБОТКОЙ (закупка азота и угл. газа), руб.	1 735,59	1 735,59	1 735,59
Отпускная цена 1 тонны асфальтобетонной смеси Б2 БЕЗ ОБРАБОТКИ, руб.	4 650,00	4 650,00	4 650,00
Отпускная цена 1 тонны асфальтобетонной смеси Б2 С ОБРАБОТКОЙ (собств. производство азота, закупка угл. газа), руб.	4 882,50	4 834,65	4 818,86
Отпускная цена 1 тонны асфальтобетонной смеси Б2 С ОБРАБОТКОЙ (закупка азота и угл. газа), руб.	4 885,59	4 885,59	4 885,59
Рост себестоимости и отпускной цены (собств. произв-во), руб./тонну	232,50	184,65	168,86
Рост себестоимости и отпускной цены (закупка), руб./тонну	235,59	235,59	235,59

Таблица Б.7 – Изменение срока эксплуатации и стоимости покрытия при применении обработки асфальтобетонной смеси защитным газом (исходя из стоимости асфальтобетонной смеси, выпускаемой за час, и стоимости укладки 1 м² покрытия толщиной 4 см.), руб.

Показатель	АБЗ малой производительности		АБЗ средней производительности		АБЗ большой производительности	
	Собственное производство	Покупка газа	Собственное производство	Покупка газа	Собственное производство	Покупка газа
Срок эксплуатации необработанного асфальтобетонного покрытия, лет	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Срок эксплуатации обработанного асфальтобетонного покрытия, лет	5,79	5,79	5,79	5,79	5,79	5,79
Увеличение срока эксплуатации обработанного покрытия, месяцев	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50	9,50
Повышение стоимости строительства дороги, руб.	13 078,33	13 251,77	37 391,15	37 432,25	59 270,67	59 142,64
Снижение стоимости ремонта дороги, руб.	61 363,64	61 363,64	133 235,80	133 235,80	230 942,05	230 942,05
Социально-экономические потери от плохого качества дорог за 5 лет (для площади покрытия часовым объемом асфальтобетона), руб.	5 903,29	5 903,29	21 251,86	21 251,86	36 836,56	36 836,56
Снижение социально-экономических потерь от разрушения автодороги после обработки битума защитным газом (за 5 лет), руб. (для площади покрытия,	932,10	932,10	3 355,56	3 355,56	5 816,30	5 816,30

Показатель	АБЗ малой производительности		АБЗ средней производительности		АБЗ большой производительности	
	Собственное производство	Покупка газа	Собственное производство	Покупка газа	Собственное производство	Покупка газа
производимого АБЗ за час)						
Снижение социально-экономических потерь, %	15,79%	15,79%	15,79%	15,79%	15,79%	15,79%

Таблица Б.8 – Сокращение затрат ООО «Росавтодор» на ремонт дорожного покрытия при применении обработки асфальтобетонной смеси защитным газом

Общая ежегодная экономия, исходя из интегрального коэф-та влияния	АБЗ малой производительности		АБЗ средней производительности		АБЗ большой производительности	
	Собственное производство	Покупка газа	Собственное производство	Покупка газа	Собственное производство	Покупка газа
на 1 тонну асфальтобетонной смеси, руб.	175,00	174,38	97,98	97,93	101,13	101,21
для часового объема асфальтобетонной смеси, руб.	9 843,48	9 808,79	19 840,04	19 831,82	35 497,53	35 523,14
для суточного объема выпуска смеси, руб.	236 243,56	235 411,04	476 160,99	475 963,69	851 940,82	852 555,40
для месячного выпуска смеси, руб.	7 087 306,66	7 062 331,21	14 284 829,81	14 278 910,66	25 558 224,64	25 576 662,07
для годового объема выпуска смеси, руб.	85 047 679,88	84 747 974,50	171 417 957,74	171 346 927,92	306 698 695,70	306 919 944,81

Таблица Б.9 – Среднее сокращение затрат ООО «Росавтодор» на ремонт дорожного покрытия при применении обработки асфальтобетонной смеси защитным газом

	Для обработки при производстве азота на АБЗ	Для обработки при регулярной закупке и доставке газа на АБЗ
Средний выпуск асфальтобетонной смеси в России, млн. тонн	65,00	
Средние ежегодные расходы ООО «Росавтодор» на ремонт дорог в России, млн. руб.	330 000,00	330 000,00
Средняя ежегодная экономия ООО «Росавтодор», млн. руб.		
при внедрении технологии на 1 АБЗ	187,72	187,67
при внедрении технологии на всех АБЗ	8 105,57	8 092,91

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство на Секрет производства (ноу-хау) от 25 марта 2024 г. № 2024001 «Способ обеспечения инертной среды для замедления термоокислительного старения битумного вяжущего при производстве асфальтобетонных смесей», утв. Приказом № 01-1-08/196 от 25.03.2024 г.



СВИДЕТЕЛЬСТВО

на
Секрет производства (ноу-хау)
№ 2024001

«Способ обеспечения инертной среды для замедления термоокислительного старения битумного вяжущего при производстве асфальтобетонных смесей»

Правообладатель: ФГБОУ ВО «ВГТУ»

Авторы: Подольский Владислав Петрович
Чудайкин Анатолий Дмитриевич
Константинова Ирина Владимировна

Дата регистрации: «25» марта 2024 г.
Приказ № 01-1-08/196 от 25.03.2024 г.

Проректор по науке и инновациям



Башкиров А. В.

Воронеж 2024

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акты о внедрении

ООО «ДОРОЖНИК»
ОГРН 1023601315870, ИНН 3628007540, КПП 362801001, ОКПО 53148116
396902, Воронежская область, Семилукский район, г. Семилуки, ул. Транспортная, зд. 1

№ исх. 1
от «02» 04 2024 г.

АКТ

о внедрении результатов

кандидатской диссертационной работы

Чудайкина Анатолия Дмитриевича

«Применение защитных газов при производстве асфальтобетонной смеси»

В рамках совместной научно-исследовательской работы ООО «Дорожник» и А.Д. Чудайкина решена важная научно-практическая задача по совершенствованию процесса приготовления асфальтобетонной смеси с использованием асфальтосмесительной установки ДС-185.

Результаты диссертационной работы имеют большое значение для повышения качества готовой смеси и увеличения долговечности дорожных асфальтобетонных покрытий. Разработанная технологическая карта производства асфальтобетонной смеси с применением обработки защитными газами была внедрена на АБЗ ООО «Дорожник», которая позволила выпустить опытную асфальтобетонную смесь и применить в слое покрытия на участке автомобильной дороги в Семилукском районе.

Выводы и предложения данной НИР рекомендованы к внедрению при реализации дальнейших строительных проектов ООО «Дорожник».

Генеральный директор



Черных П.И.



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «ВГТУ», ВГТУ)

20-летия Октября ул., д. 84, Воронеж, 394006
Тел./факс +7(473) 271-59-05
e-mail: rector@cchgeu.ru; mail@vorstu.ru; http://cchgeu.ru
ОКПО 02068083; ОГРН 1033600070448;
ИНН/КПП 3662020886/366401001

0.304.2024 N 1-3-03/111

На N _____ от _____

АКТ о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы

Чудайкина Анатолия Дмитриевича

**«ПРИМЕНЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ
АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ»**

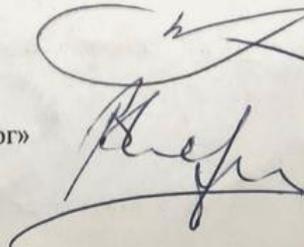
в учебный процесс

Результаты диссертации «Применение защитных газов при производстве асфальтобетонной смеси», выполненная на кафедре «Строительство и эксплуатация автомобильных дорог» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный технический университет» применяются в учебном процессе, а также в курсовом и дипломном проектировании по направлениям подготовки:

- 08.04.01 Строительство Программа "Проектирование, строительство и эксплуатация автомобильных дорог";
- 08.04.01 Строительство Программа "Строительство и эксплуатация автомобильных дорог".

Проректор по учебной работе

Зав. кафедрой «Строительство и
эксплуатация автомобильных дорог»

 А.И. Колосов

Вл.П.Подольский