

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Воронеж – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ВГТУ» ВГТУ)

Научный руководитель: **Рябова Ольга Викторовна**
Доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Бондарев Борис Александрович**
Доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», кафедра «Строительное материаловедение и дорожные технологии»

Саенко Сергей Сергеевич
Кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», кафедра «Автомобильные дороги»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова»
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

Защита состоится «18» декабря 2024 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.02, созданного на базе Воронежского государственного технического университета, по адресу: г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, корпус 2, ауд. 2226а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного технического университета и на сайте <http://ссhgeu/ru>.

Автореферат разослан «17» октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.286.02
к.т.н., доцент



Чуйкин С. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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 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 повышения 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 исследования. 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: советский нефтехимик Черножуков Н.И., доктора технических наук Колбановская А. С., Печеный Б. Г. и Гезенцвей Л. Б., канд. техн. наук Бахрах Г. С.; зарубежные специалисты с мировым именем: Morgan P., Petersen J. и др., однако влияние защитных газов на свойства битумного вяжущего при производстве готовых асфальтобетонных смесей никем ранее не изучалось.

Объект исследования – технология производства асфальтобетонной смеси в среде защитных газов.

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.

Для достижения поставленной цели необходимо решить 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 и хранения, 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 с 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 ($T_{пр} = 160^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) 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 и хранения 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.

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.

Основные 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 мероприятиях: XX Международной научно-практической конференции «Актуальные научные исследования» (г. Пенза, 2024 г.), конкурсе-выставке научно-технических достижений студентов, аспирантов и молодых ученых ВГТУ (г. Воронеж, 2024 г.), заседаниях кафедры строительства и эксплуатации автомобильных дорог, а также конференциях профессорско-преподавательского состава ВГТУ (г. Воронеж, 2023-2024 гг.).

Степень достоверности результатов, положений и выводов подтверждается следующим: использованием современного, высокоточного и калиброванного оборудования; применением современных стандартных методов испытаний; сравнительным анализом экспериментальных данных и результатов теоретических исследований; сходимостью данных, полученных в результате лабораторных и производственных испытаний; соответствием полученных опытных данных теоретическим научным положениям и предпосылкам. Положения, выводы диссертационного исследования не противоречат результатам других отечественных и зарубежных авторов.

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 учебно-образовательный процесс ФГБОУ ВО «ВГТУ». Лабораторные испытания проводились на базе Центра коллективного пользования имени профессора Ю. М. Борисова (ВГТУ) и научно-образовательной лаборатории «ДорНИИ ВГТУ». Получены акты о внедрении, свидетельство на ноу-хау.

Личный вклад автора состоит в непосредственном участии во всех этапах диссертационного исследования, включая разработку методики исследования, постановку цели 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 публиковаться основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Структура и объем работы

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы; определены цели, задачи и методы исследования; обоснована научная новизна; раскрыты практическая и теоретическая значимость результатов работы.

В первой главе рассмотрены основные положения вопроса по защите битумного вяжущего в асфальтобетонной смеси при её производстве и хранении.

В основе исследования лежит изучение тенденций в международной и отечественной практике применения дорожных битумов. Так, за рубежом в дорожных асфальтобетонных покрытиях используется преимущественно не окисленный битум, обладающий высокими эксплуатационными характеристиками. В нашей стране большая часть битума производится путем окисления нефтяного сырья, а проблема старения, то есть термоокисление битума заложена на начальном этапе его производства. Хотя доля битума в общей массе материала невелика (5-9 % от общей массы готовой асфальтобетонной смеси), но именно битумное вяжущее отвечает за устойчивость к старению асфальтобетонного покрытия, и при его более высоком качестве позволяет экономить не только сам битум, но и минеральную составляющую асфальтобетона.

Процесс изучения влияния окислительных процессов связан с исследованием проблемы старения битумного вяжущего. Одним из факторов старения является окислительный процесс, возрастающий при повышении температуры, и поэтапном дегидрировании и превращении нефтяных масел в смолы, а смол – в асфальтены и так далее с последующим разрушением структур битума. При этом значительно снижаются пластические свойства битумного вяжущего, растет его хрупкость, что приводит к трещинообразованию асфальтобетонного покрытия.

Анализ результатов ранее выполненных исследований показал, что скорость старения вяжущего является максимальной на этапе производства асфальтобетонной смеси, поскольку технология предполагает длительный нагрев её компонентов, а, главное, открытый контакт с кислородом воздуха.

Современные решения, рекомендации и требования к производству горячих асфальтобетонных смесей предполагают, что инновации должны касаться технологии производства асфальтобетонных смесей на базе наиболее широко применяемых окисленных битумов. Обзор технических решений раскрыл возможность применения эффективных технологических усовершенствований с замедлением старения битумного вяжущего на этапе приготовления и хранения асфальтобетонной смеси.

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 проведения исследований, включающий построение физико-математической модели влияния защитного газа на старение битумного вяжущего в технологических процессах

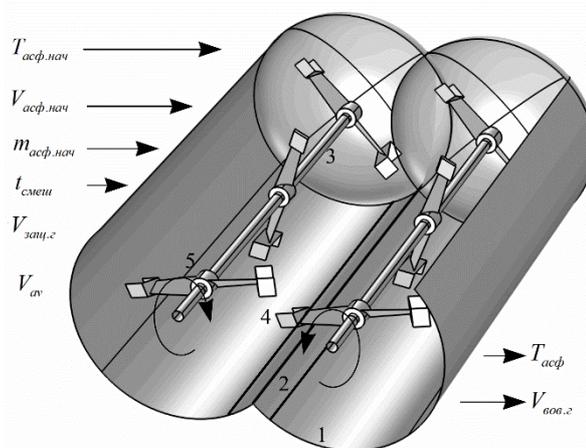


Рисунок 1 - Модельная схема многолопастного двухвального смесителя (аналог ДС-185(ДС-158)) 1 – корпус, 2 – затвор, 3 – вал (смесителя), 4 – лопасть, 5 – стойка левая

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 котором происходит начальное вытеснение воздуха горячей асфальтобетонной смесью с последующим его насыщением защитным газом в процессе смешения. На рисунке 1 показана модельная схема 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 опосредованно 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.

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.1) 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 (1):

$$n_V = \frac{(V_{общ} - V_{мин} - V_{бит})}{V_{общ}}, \quad (1)$$

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 защитным газом.

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

Первично задаются параметры смесителя: в программу вводятся его геометрические формы.юа также величины, которые отвечают за перемешивание (диаметр хода лопастей, радиальная скорость, количество оборотов вала и т.д.).

Внутренний диаметр осей не рассматривается и в приближении составляет порядка 10% от R_d . Поскольку лопасти делают один оборот, то необходимо учесть время пребывания материала в этой части смесителя. 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 и мелкий заполнитель, пылевые остатки, а также битум. В начале фракционный состав имеет высокую пористость (для расчета принимаем 40%) с гравитационным расслоением. Вводимый битум в процессе перемешивания способствует обволакиванию крупных частиц с последующей увязкой мелких. Этот случай описывается дифференциальным уравнением концентрации C_i , изменяющейся во времени (2):

$$\frac{dC_i}{dt} = \gamma_i \cdot (C_{i-1}), \quad (2)$$

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, а также высвобождение воздуха из межструктурных компонентов – фракций.

Кинетику процесса перемешивания описывем уравнением типа (3):

$$K_c(t) = a \cdot K_{сн} \cdot e^{-bt}, \quad (3)$$

где $K_{сн}$ – 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 взяты из характеристик, полученных в лабораторных условиях.

Процесс моделирования перемешивания с учетом диффузии изначально показал неравномерность концентрации газа (рис. 2).

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). Потенциал давления на границе перемешивания стремится к нулю. Тогда закон Дарси можно записать:

$$W = -k_{\text{гоз}}(G) \cdot \text{grad } p(G), \quad (4)$$

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

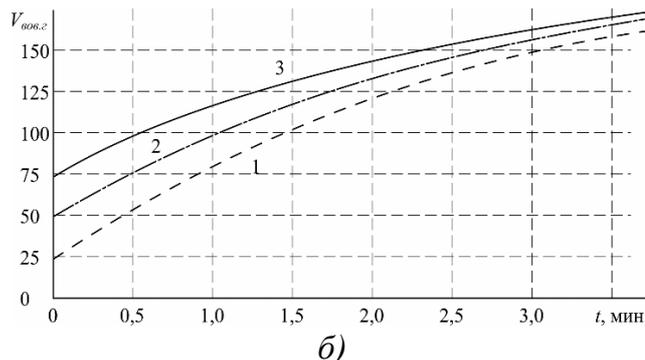
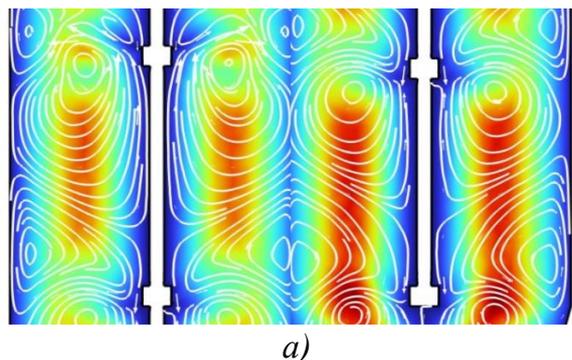


Рисунок 2 – Процесс перемешивания асфальтобетонной смеси в присутствии защитного газа: а) визуализация процесса; б) зависимости вовлеченного газа в процессе перемешивания от объема, прокачиваемого через смеситель: 1 – 30 м³/ч, 2 – 60 м³/ч, 3 – 90 м³/ч

Этот процесс близок по физическому смыслу к растворению газа в объеме дисперсного материала, в котором промешивается вовлеченный азот, вытесняя кислород, содержащийся в воздухе.

Данный процесс описывается вторым законом Фика:

$$\frac{dC}{dt} = -D_m \cdot \frac{d^2C}{dx^2}, \quad (5)$$

где D_m – диффузионный коэффициент переноса массы газа.

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

$$\eta = A \cdot e^{\varphi t}, \quad \lg \eta = \lg A + n_c \cdot t, \quad (6)$$

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.

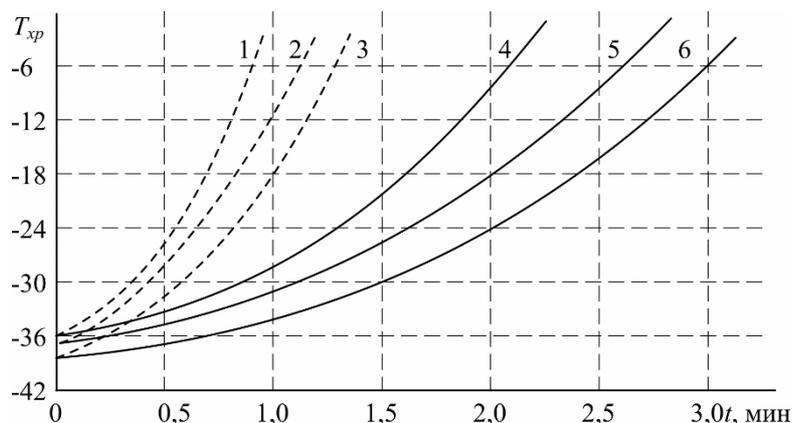


Рисунок 3 – Кинетика хрупкости битумного материала для двух температур $t_{\text{смеш}}$ (1, 2, 3 – 180 °С, 4, 5, 6 – 150 °С) и трех режимов прокачки (1, 4 – 30 м³/ч; 2, 5 – 60 м³/ч; 3, 6 – 90 м³/ч)

Моделирование показало, что с ростом температуры хрупкость растет, а увеличение объемов прокачки снижает эту характеристику, как показано на рис. 3. Отмечается экспоненциальная зависимость хрупкости от температуры и незначительная, квадратичная нелинейность, зависящая от объемов подаваемого защитного газа. Очевидно, это связано с реологическими свойствами заданного битумного материала. Изменяя факторы, влияющие на старение битума, можно получить циклическое варьирование характеристик готовой смеси.

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

В третьей главе на основе теоретического исследования выполнена серия экспериментов направленных на определение процессов изменения свойств битумного вяжущего при приготовлении горячей асфальтобетонной смеси в кислородосодержащей среде и среде защитных газов и их влияние на характеристики асфальтобетона.

Определение механических и реологических свойств образцов, сформированных из горячей асфальтобетонной смеси, опирается на свойства битумного вяжущего. Первым этапом стало проведение экспериментального исследования по методике кратковременного (RTFOT) лабораторного состаривания битума в кислородосодержащей и инертной средах в испытательной печи InfraTest с прокачкой межструктурных газов: воздуха, азота и углекислого газа. В силу влияния длительного временного фактора осуществлено состаривание по методике PAV, имитирующей старение битумного вяжущего при долговременной эксплуатации материала в покрытии.

На каждом этапе исследовались изменения базовых реологических характеристик битума (как исходного, так и состаренного в разных газовых средах), а также эксплуатационных характеристик отформованных образцов асфальтобетона.

Для экспериментального подтверждения влияния защитного газа на характеристики получаемого материала в процессе приготовления горячей асфальтобетонной смеси проведены производственные испытания в условиях асфальтобетонного завода (далее – АБЗ) на смесительной асфальтобетонной установке малой мощности с отбором смеси и дальнейшими лабораторными исследованиями.

В качестве вяжущего для опытных образцов использовался и в дальнейшем исследовался битум БНД 60/90, а также приготовленная на его основе горячая плотная асфальтобетонная смесь марки II тип Б.

В ходе проверки и сравнительного анализа свойств исследовались пенетрация и изменение массы образцов указанного вяжущего БНД 60/90 до и после состаривания с использованием пенетromетра марки ПН-10Б (по ГОСТ 33136-2014). Полученные зависимости пенетрации позволяют сделать вывод, что нормативному показателю удовлетворяют оба результата, но остаточная пенетрация при состаривании в кислородосодержащей среде ниже, чем в инертной среде. Потеря массы в инертной среде уменьшилась, а температура размягчения повысилась незначительно по сравнению с результатами термоокислительного старения (ТОС). Температура размягчения определена с использованием прибора «КиШ-20». Указанное проявление свойств битума с одновременным ростом термостойкости вызвано изменением отношения насыщенных соединений к асфальтенам.

При смешивании компонентов горячей асфальтобетонной смеси важной реологической характеристикой является динамическая вязкость вяжущего, которую измерили в процессе вращательной вискозиметрии с помощью ротационного вискозиметра по методике ГОСТ 33137-2014. Состаривание приводит к увеличению в 3 раза при ТОС и в 2 раза при термостарении (ТС) в присутствии защитных газов.

Эффективная вязкость битума, состаренного в инертной среде, изменилась значительно меньше относительно показателей для исходного битума, чем приращение вязкости в присутствии кислорода:

$$|k_{\Delta T, \text{ТОС}}| > |k_{\Delta T, \text{ТС}}| \quad (7)$$

Вязкость тех битумных структур, которые не подверглись разрушению, имеет симбатную, то есть схожую зависимость с пределами текучести, то есть относительно исходного битума неразрушенные структуры вяжущего после термостарения становятся прочнее, а после термоокисления – разрушаются:

$$\eta_{\text{ТОС}} < \eta_{\text{исх}} < \eta_{\text{ТС}}, \quad \tau_{\text{Т}}/\text{ТОС} < \tau_{\text{Т}}/\text{исх} < \tau_{\text{Т}}/\text{ТС} \quad (8)$$

С повышением скорости сдвига динамическая вязкость исследованных образцов снижается, а при скорости сдвига близкой к $\gamma' \geq 1620 \text{ c}^{-1}$ стремятся к пределу. Для эффективного использования в дальнейшем построены линейные регрессионные зависимости изменения эффективной вязкости битума $\eta_{\text{эфф}}$ (таблица 1).

Таблица 1 – Изменение эффективной вязкости битума $\eta_{\text{эфф}}$ при ТС и ТОС в широком диапазоне скоростей сдвига

Образцы битума БНД 60/90	Эффективная вязкость в полном диапазоне сдвига $\eta_{\text{эфф}}$ по де Ваале ($\lg \eta_{\text{эфф}} = \lg \eta_1 - k_{\Delta T} \cdot \lg \gamma'$; $\gamma' = 2 \dots 1620 \text{ c}^{-1}$)	Коэффициент корреляции
1. Исходный	$\lg \eta = 2,022 - 0,436\gamma'$	0,993
2. Состаренный по ТС	$\lg \eta = 1,937 - 0,414\gamma'$	0,982
3. ТОС	$\lg \eta = 3,247 - 0,867\gamma'$	0,984

Регрессионные модели подтверждают формирование коагуляционной структуры вяжущего, упрочняющейся при термостарении в атмосфере защитного газа и наблюдается деструкция при термоокислительных процессах в присутствии кислорода воздуха. Сдвиговая и усталостная реакция вяжущего определялась сдвиговым реометром DSR по ГОСТ Р 58400.10-2019. Его данные показали, что комплексный модуль жесткости G^* при ТОС RTFOT вырос примерно в 2 раза, а после применения методики 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° в ходе исследования по RTFOT и на 10° - 16° при применении методики PAV. Это изменение фазового угла менее выражено при состаривании в инертной среде в среднем на 2 - 3° .

Прочностные характеристики вяжущего в массиве непосредственным образом влияют на качество приготавливаемой смеси. Так анализ результатов исследования показателей изгибовой жесткости и ползучести в битумной балочке (по ГОСТ Р 58400.8-2019) на реометре BBR 20-44220 выявил, что:

1. При низкотемпературных режимах RTFOT-состаривание в кислородосодержащей среде приводит к росту жесткости битума примерно 1,5 раза, а PAV-состаривание после ТОС RTFOT вызвало рост жесткости в 2,5-3 раза. Применение инертной среды уменьшило указанный показатель на 100 МПа (в

среднем на 30 %).

2. Деформационный прогиб балочки из более жесткого битума меньше, однако низкотемпературная потеря пластичных свойств приводит к её хрупкому разрушению.

Образцы получаемого материала и в последующем их характеристики получены на усовершенствованной технологической установке, которая была разработана на основе технологической схемы АБЗ с применением защитных газов. Предложено в технологическую линию добавить перфорированную трубчатую форсунку - барботер защитного газа 16, который размещен в мертвых зонах под лопастями, в нижней части миксера-смесителя, где происходит смешивание компонентов асфальтобетонной смеси. Снабжение АБЗ азотом в необходимом объеме обеспечивается мобильной (модульной) передвижной азотной станцией адсорбционного типа 17 мощностью генерации от 50 до 100 м³/час. Далее газ поступает в испарительный модуль жидкого азота 19 с проточным подогревом азота (для подогрева от 150 до 180°С) 20. Нагнетание с помощью барботера азота в смеситель вытесняет воздух, ингибируя окислительные процессы. Для обеспечения сохранности готовой смеси в бункерах подается углекислый газ. Объем подаваемого газа составил 20 м³ на бункер. Углекислый газ тяжелее воздуха, он, вытекая через форсунки, вытесняет воздух и препятствует процессам окисления при хранении и выгрузке асфальтобетонной смеси. Предлагаемые изменения представлены на технологической схеме (рис. 4).

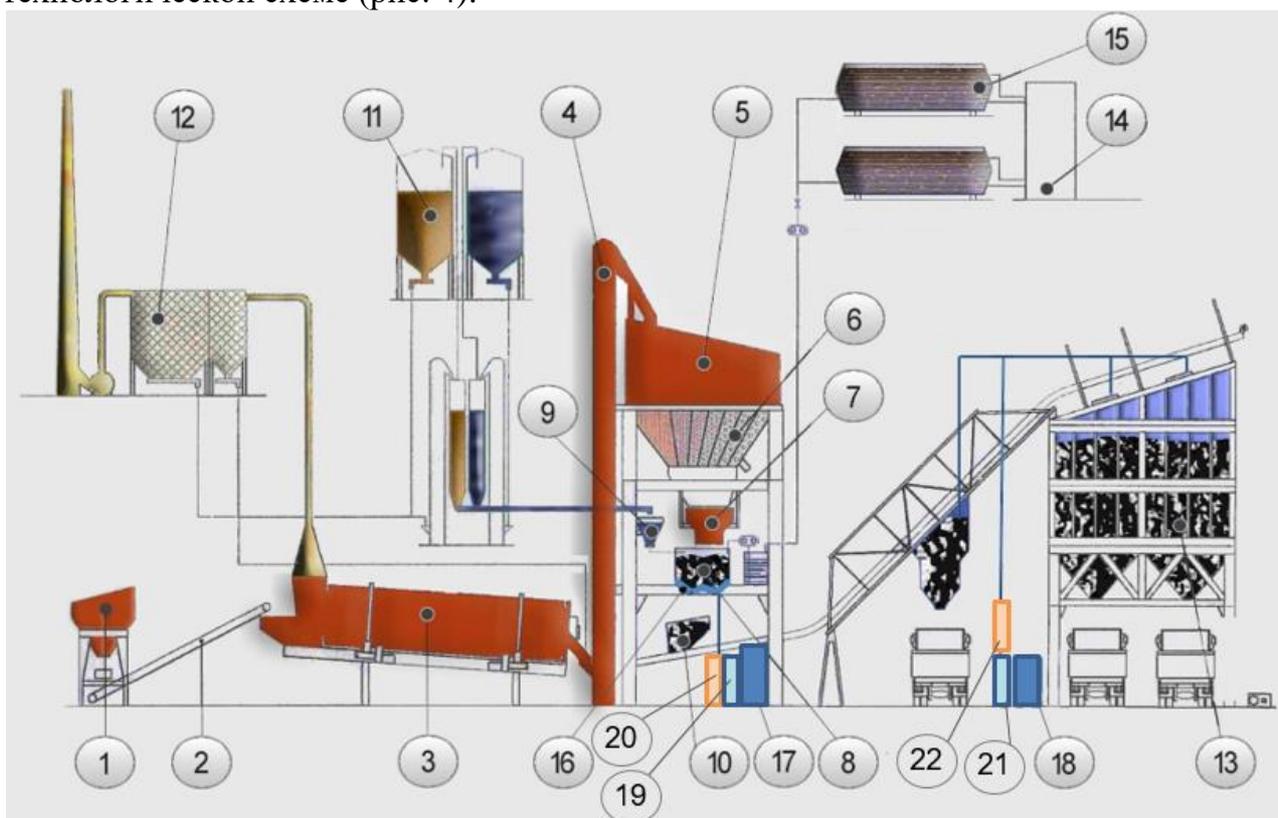


Рисунок 4 – Технологическая схема АБЗ с применением защитных газов

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 – ковшовой 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 – емкость хранения в твердой фазе углекислого газа; 19 – испаритель азота; 20 – проточный нагреватель азота; 21 – испаритель углекислого газа; 22 – проточный нагреватель углекислого газа

Экспериментальное апробирование образцов выполнено по стандартной технологии получения горячей асфальтобетонной смеси. Под контролем технолога АБЗ и соблюдении мер безопасности в смеситель и бункеры хранения подавался защитный газ. Приготовление смеси выполнено при температурах 150, 165 и 180°C, отобраны пробы после остановки и вывала смеси, а также после выдерживания в бункере хранения в течение 2 часов. Для дополнительной верификации приняты результаты исследования образцов ранее проводившихся лабораторных испытаний приготовления и формования смеси при 150°C.

Были отформованы стандартные образцы асфальтобетона для определения его деформационной устойчивости в зависимости от условий старения вяжущего.

Дальнейшие испытания образцов асфальтобетона в климатической камере М-60/100-1000 КТВХ подтвердили результаты теоретических расчетов.

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. Варьируемые параметры: X_1 – температура производства асфальтобетонной смеси ($165 \pm 15^\circ\text{C}$); X_2 – объем подаваемого защитного газа ($65,45 \pm 15 \text{ м}^3/\text{час}$). 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.

Параметры оптимизации: пределы прочности при сжатии при 50°C (R_{50}), 20°C (R_{20}), 0°C (R_0), предел прочности на растяжение при расколе при 0°C (R_p). Расчетные значения n_c коррелируют с результатами предела прочности при непрямом растяжении, полученными в лабораторных условиях, что подтверждает сходимость прогнозируемых и экспериментальных значений трещиностойкости.

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

Модель соответствует основным критериям значимости при $p \leq 0,95$, 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.

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

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

Регрессионные модели описываются уравнением (9):

$$R(x, y) = k_1 + k_2 \cdot x + k_3 \cdot y + k_4 \cdot x^2 + k_5 \cdot x \cdot y + k_6 \cdot y^2, \quad (9)$$

где x – параметр температуры, °C, y – параметр объема прокачиваемого защитного

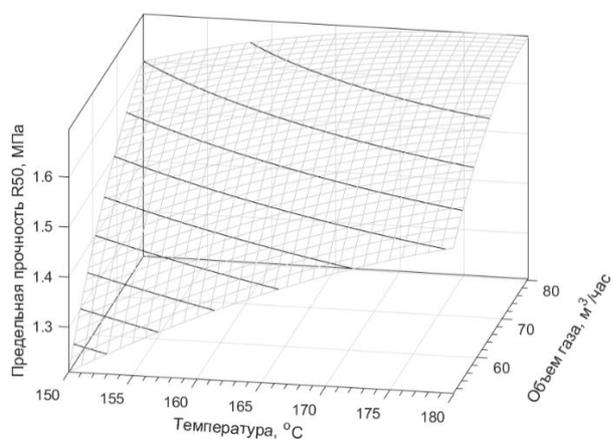
газа, м³/час, $k_1 \dots k_6$ – коэффициенты регрессионного уравнения.

В таблице 2 показаны коэффициенты регрессионного уравнения.

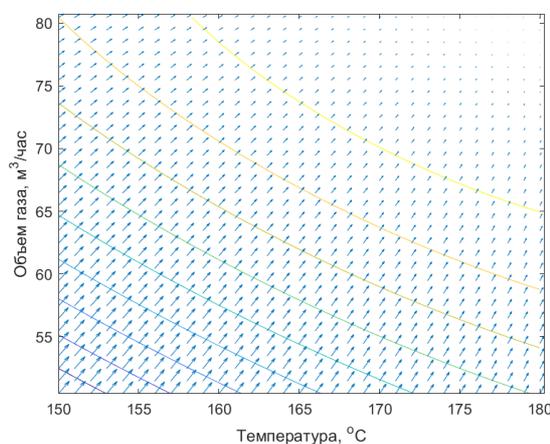
Таблица 2 – Коэффициенты регрессионного уравнения

	Коэффициенты регрессионного уравнения, *10					
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
Y_{50}	-71,863	0,64989	0,78331	-0,00133	-0,0022	-0,00244
Y_{20}	-30,416	0,57979	0,28913	-0,00133	-0,0008	-0,00089
Y_0	59,024	0,08545	0,28671	0,00000	-0,0010	-0,00067
Y_{Rp}	-11,382	0,34000	0,26443	-0,00074	0,0000	-0,00163

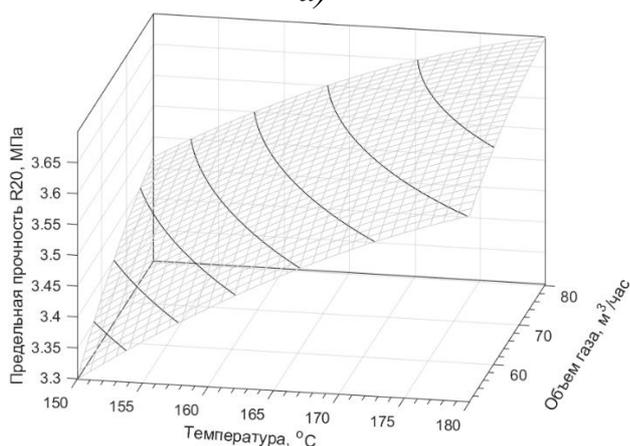
На рисунке 5 а), в) и г) показаны поверхности, описывающие изменение прочности сжатия при 50°C (R_{50}), 20°C (R_{20}), 0°C (R_0), нарастание предельной прочности образцов с температурой носит нелинейный характер это вызвано влиянием реологических свойств горячей асфальтобетонной смеси, а также старением (термоокислением) битумного вяжущего. Также отмечается рост прочности образцов с увеличением объемов прокачиваемого защитного газа (при температурах, близких к 165°C).



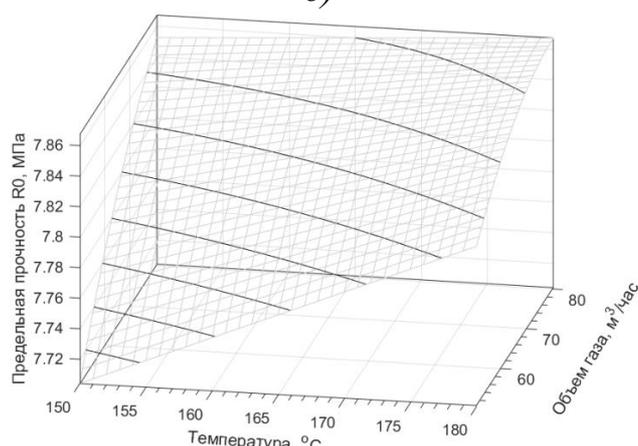
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5 – Графики поверхностей, описывающих изменение прочности при сжатии и температурах а) 50°C (R_{50}), в) 20°C (R_{20}), г) 0°C (R_0) и градиент φ поля изменения характеристик прочности для б) 50°C (R_{50})

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

°С, 165°С; 50 м³/ч, 80 м³/ч) величина градиента составляет 0,0064 МПа/°С и 0,0097 МПа/м³/ч.

С уменьшением температуры испытания образцов наблюдается аналогичная тенденция увеличения прочности с увеличением температуры приготовления, как показано на рисунке 5 в). Отмечается преимущественно линейная зависимость прочности от температуры при сохранении влияния объема прокачиваемого защитного газа. При этом воздействие температуры увеличивается, а влияние объемов прокачиваемого защитного газа уменьшается. При низких температурах приготовления смеси усложняется вовлечение газа более мелкими частицами, а термоокислительные процессы происходят на начальном этапе процесса, до вытеснения 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, градиентное поле рисунке 6 б) близко к гипотетическому R_{10} . Такое физическое поведение образца свидетельствует о влиянии упругих процессов при малой пористости сформированных образцов.

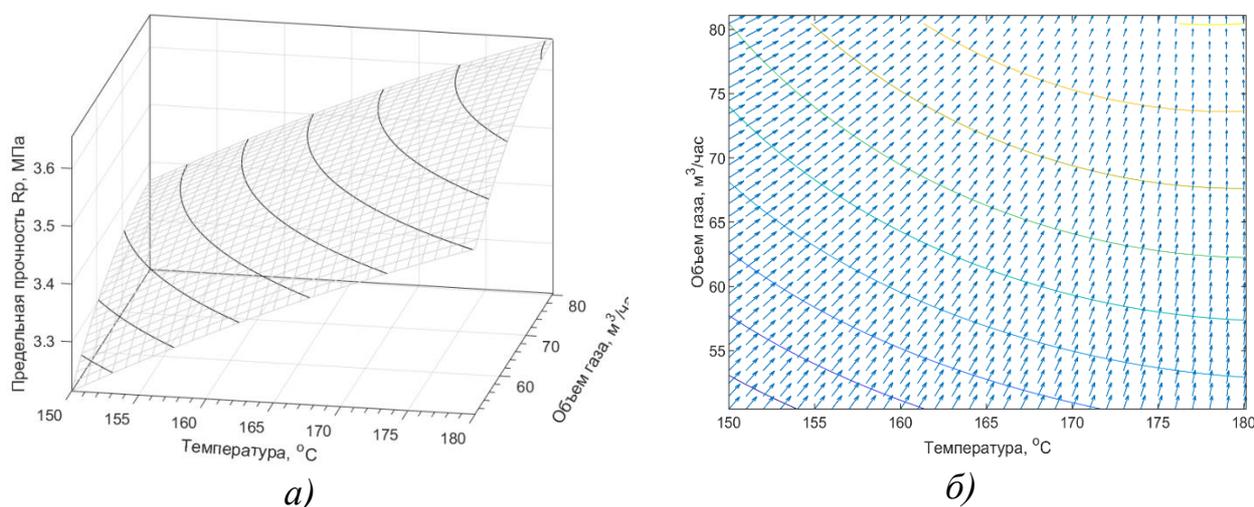


Рисунок 6 – График зависимости изменения предела прочности на растяжение при расколе при 0°С (R_p) а) и градиент его изменения б)

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 165°C , и приближается к верхним допустимым границам.

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%.

В четвертой главе приведено технико-экономическое обоснование технологии применения защитных газов при производстве горячей асфальтобетонной смеси. В основе расчетов лежат данные, полученные в результате математического моделирования и натурных испытаний получаемых смесей. Расчеты проводились для

заводов малой, средней и большой мощностей с учетом стоимости закупки газа, так и сравнительная стоимость при отделении азота из воздуха.

Был определен суммарный коэффициент влияния на качество битумного вяжущего, используемого при приготовлении горячей асфальтобетонной смеси в разных случаях использования защитного газа, а также влияние на износостойкость асфальтобетонного дорожного покрытия.

Расчет технико-экономических показателей подтвердил незначительность роста себестоимости и цены асфальтобетонной смеси при применении обработки защитными газами, а также увеличение фактического межремонтного срока дорожного покрытия на 9,5 месяцев (на каждые 5 лет). Средняя ежегодная экономия ООО «Росавтодор» за счет сокращения затрат на ремонт покрытия и снижения социально-экономических потерь от плохого качества дорожных покрытий при внедрении предложенной технологии на одном АБЗ составит 187,72 млн. руб., а на всех российских АБЗ – 8 105,57 млн. руб.

Практические рекомендации применения результатов работы.

Усовершенствование технологии производства горячей асфальтобетонной смеси в среде защитного газа с целью уменьшения термоокисления (старения) битумного вяжущего даны рекомендации:

1. Технологические.

- введение технологических решений по применению защитного газа (азота) в смесителе методом барботирования смеси;
- использование защитного газа (углекислого) и технологических решений для защиты готовой смеси в бункерах для хранения.

2. Нормативно-технические и законодательные.

- использование величины перекисного числа в качестве критериального значения косвенного показателя окисленности и старения битума в готовой смеси;
- разработка нормативных актов для законодательного закрепления метода определения перекисного числа в рабочую документацию;
- создание и модерирование единой открытой базы результатов испытаний при стандартизации методик и использовании данных при выполнении экспериментов.

3. Научно-исследовательские.

- разработка механизма рекуперации, то есть отвода отработанных защитных газов для повторного использования;
- разработка технологии отвода оксида азота, монооксида углерода и двуоксида углерода при аспирации дымовых газов на АБЗ для соблюдения экологических норм производства.

Основным направлением **дальнейшей разработки темы**, является введение газообразных ингибиторов и катализаторов течения реакций, включая добавки, повышающие физико-механические и химические свойства асфальтобетонов. Частью исследований может стать разработка технологии и методики по рекуперации использованных защитных газов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании проведено обобщение научных и практических достижений, решены поставленные задачи. По результатам работы сделаны выводы об эффективности применения защитных газов при производстве асфальтобетонной смеси:

1. На основе анализа результатов исследования отечественных и зарубежных авторов установлено, что эффективное решение проблемы старения битумов состоит в исключении доступа кислорода воздуха на этапе производства асфальтобетонной смеси, что позволяет замедлить термоокислительные реакции в битумном вяжущем за счет применения защитных газов.

2. Разработана физико-математическая регрессионная модель, которая учитывает процессы старения в разных газовых средах (позволяет оценивать процессы возрастания прочности в присутствии защитного газа и разрушения при наличии кислорода воздуха).

3. Проведенные лабораторные и производственные испытания позволили усовершенствовать технологию защиты асфальтобетонной смеси, исследовать влияние присутствия защитных газов на реологию как битумного вяжущего, так и образцов готового асфальтобетона.

4. Разработан технологический режим применения защитных газов в агрегатах смешивания и хранения горячих асфальтобетонных смесей.

5. Технико-экономическое обоснование предлагаемой технологии позволяет сделать вывод о том, что несмотря на некоторое удорожание процесса приготовления асфальтобетонной смеси, применение защитных газов позволяет увеличить межремонтный срок дорожных одежд за счет замедления термоокисления битумного вяжущего и на 16% сократить общие экономические затраты на этапе эксплуатации.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

Статьи в других изданиях

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

ЧУДАЙКИН АНАТОЛИЙ ДМИТРИЕВИЧ
ЗАМЕДЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ БИТУМНОГО ВЯЖУЩЕГО
ОБРАБОТКОЙ ЗАЩИТНЫМИ ГАЗАМИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ
АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ
АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 16.10.2024. Формат 60 *84 1/16. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 250

Отпечатано: отдел оперативной полиграфии ФГБОУ ВО «ВГТУ»
394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84