

На правах рукописи



Медведев Дмитрий Викторович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

Специальность 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов,
аэродромов, мостов и транспортных тоннелей
(технические науки)

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».

Научный руководитель: **Калгин Юрий Иванович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Тиратурян Артем Николаевич,**
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», кафедра «Автомобильные дороги», профессор

Вельсовский Анатолий Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет», кафедра «Автомобильные дороги», заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное автономное учреждение «Российский дорожный научно-исследовательский институт»
(ФАУ «РосдорНИИ»)

Защита состоится «18» декабря 2024 г. в 10-00 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://сshgeu/ru>.

Автореферат разослан «17» октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



С. В. Чуйкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В Российской Федерации и других странах широкое применение геосинтетических материалов в дорожном строительстве с конца XX века связано с увеличением объёмов и ускорением темпов строительства транспортных объектов. В XXI веке это инициировало необходимость регламентирования единых требований к геосинтетическим материалам для дорожного хозяйства, которые обеспечат обоснованный выбор и необходимый уровень контроля качества на всех стадиях жизненного цикла.

Актуальность совершенствования порядка использования геосинтетических материалов в дорожном строительстве обусловлена увеличением эксплуатационных нагрузок на автомобильные дороги и стратегической важностью этих материалов. Геосинтетические материалы выполняют функции армирования и разделения конструктивных слоёв дорожных одежд, защиты от эрозии земляного полотна, тем самым влияя на долговечность и надёжность дорожных конструкций. Таким образом, поиск оптимальных решений для повышения качества и долговечности объектов транспортной инфраструктуры путем применения при их строительстве геосинтетических материалов является актуальной темой.

Выбор темы обусловлен необходимостью создания новых методологических подходов к идентификации и оценке свойств геосинтетических материалов. Проведенное исследование включает комплексный анализ с интеграцией методологии, статистики и новых технологий при разработке и улучшении методик испытаний геосинтетических материалов, совершенствовании предъявляемых к ним технических требований.

Исследование выполнено в рамках научных работ по заданию Федерального дорожного агентства Министерства транспорта Российской Федерации в период 2008 – 2024 гг.

Степень разработанности темы. Тема исследования по применению геосинтетических материалов в строительстве представляет собой широкий и комплексный научный дискурс, детально рассмотренный как отечественными, так и зарубежными учеными. Работы выдающихся отечественных и иностранных исследователей, включая В.Д. Казарновского, Э.М. Доброва, А.Ю. Баранова, О.Н. Столярова, Е.В. Федоренко, В.Ю. Гладкова, А.П. Фомина, А.В. Петряева, Е.С. Ашпиза, Г.М. Левашова, Е.Ю. Крашенинина, А.Н. Девятилова, А. Elsing, N. Meyer, J.G. Zornberg, H. Koo, D. Bergado, C. Chen, H. Cho, J.R. Carneiro и др., анализируют различные аспекты этой темы, начиная от разработки методов идентификации и оценки материалов до решения практических проблем усиления конструкций.

Объект исследования - методология идентификации геосинтетических материалов в контексте их применения в дорожном строительстве.

Предмет исследования – комплекс воздействующих факторов при строительстве и эксплуатации автомобильной дороги на физико-механические, эксплуатационные и химико-биологические свойства геосинтетических материалов в соответствии с областью их применения в дорожной конструкции.

Рабочая гипотеза: предполагается, что системное исследование воздействия комплекса факторов, включающего физико-механические, эксплуатационные и химико-биологические аспекты, на геосинтетические материалы при их применении в дорожном строительстве позволит разработать усовершенствованную методологию идентификации материалов. Предполагается, что полученные результаты будут способствовать повышению надежности и долговечности конструкций автомобильных дорог.

Целью диссертационной работы является развитие научных основ применения в дорожном строительстве геосинтетических материалов путем разработки методологического аппарата для их идентификации, предусматривающего комплексный подход к инструментальной оценке их характеристик и разработку системы критериев для оценки эффективности их использования в дорожном строительстве.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить комплексный аналитический обзор для выявления и систематизации ключевых параметров, определяющих эффективное применение геосинтетических материалов в дорожном строительстве;
- выполнить математическое моделирование армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды и расчеты дорожной конструкции с применением геосинтетического материала;
- разработать оптимизированную номенклатуру критериев для эффективного использования геосинтетических материалов при армировании и разделении конструктивных слоев дорожной одежды и борьбы с эрозией на откосах земляного полотна;
- провести натурные испытания геосинтетических материалов, применяемых для повышения качества и надежности дорожных конструкций, и обосновать пути повышения эффективности использования геосинтетических материалов за счет комплексного подхода к инструментальной оценке их характеристик и использования системы критериев;
- разработать и усовершенствовать методики оценки физико-механических, эксплуатационных и химико-биологических характеристик геосинтетических материалов для дорожного строительства, методики полевых испытаний на повреждаемость геосинтетических материалов при укладке в конструктивные слои из минеральных материалов.

Научная новизна заключается в разработке усовершенствованной методологии идентификации геосинтетических материалов, отличающейся системным подходом к определению конкретной функции, которую выполняет материал в дорожной конструкции, что позволило сформулировать соответствующие эксплуатационные требования к нему. **И включает в себя:**

- разработку и обоснование системного подхода к анализу каждой функции применения геосинтетических материалов в дорожном строительстве, отличающегося применением математических или физических моделей для определения расчетной прочности, соответствующих четырем основным функциям использования геосинтетических материалов: армированию асфальтобетонных слоев дорожной одежды, армированию слоев дорожной одежды из дискретных материалов, разделению конструктивных слоев из дискретных материалов и борьбе с эрозией на откосах. Предложенные модели включают в себя комплексные процедуры, обеспечивающие более точное и адаптированное представление об эффективности геосинтетических материалов в конкретных условиях их применения;
- разработку математической модели армирования геосинтетических материалов асфальтобетонных слоев дорожной одежды, показавшей снижение вероятности образования в них низкотемпературных трещин за счет уменьшения растягивающих напряжений на 25-35 %, и расчеты дорожной конструкции с применением геосинтетического материала, выполняющего функцию армирования несвязанных конструктивных слоев, подтвердивших эффективность применения геосинтетических материалов для улучшения эксплуатационных характеристик дорожных одежд;
- развитие научной основы применения геосинтетических материалов путем разработки новых методик их испытаний, которые впервые систематизированы и представлены в форме национальных стандартов, содержащих комплексные процедуры оценки и идентификации, адаптированные к условиям применения и требованиям дорожного строительства;
- установление впервые определённых минимальных количественных значений технических требований для обеспечения каждой функции, что позволяет повысить эффективность применения геосинтетических материалов в соответствии с конкретными условиями эксплуатации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концепция методологии идентификации геосинтетических материалов, ориентированная на функциональную роль данных материалов в дорожной конструкции, включающая в себя комплексный подход к оценке эксплуатационных характеристик геосинтетических материалов с учетом воздействующих факторов. Теоретическая значимость указанной концепции

заключается в формировании научной основы для установления взаимосвязи между функциональным назначением геосинтетических материалов и их эксплуатационными характеристиками, практическое значение проявляется в повышении эффективности применения этих материалов в дорожном строительстве;

2. Математическая модель армирования геосинтетических материалов асфальтобетонных слоев дорожной одежды, показавшая снижение вероятности образования в них низкотемпературных трещин, и результаты расчетов дорожной конструкции с применением геосинтетического материала, выполняющего функцию армирования несвязанных конструктивных слоев. Значимость моделей и расчетов заключается в подтверждении эффективности применения геосинтетических материалов для улучшения эксплуатационных характеристик дорожных конструкций;

3. Разработанные и усовершенствованные методики испытаний, позволяющие оценивать широкий спектр параметров геосинтетических материалов при воздействии различных факторов. Теоретическая значимость указанных методик обусловлена развитием научных основ методов испытаний, а практическое значение в обеспечении единого системного подхода к оценке характеристик геосинтетических материалов, что способствует повышению качества и надежности дорожных конструкций;

4. Методика определения расчетной прочности, учитывающая разнообразные факторы, которые влияют на эффективность применения геосинтетических материалов. Методика позволяет заменить использование исходных характеристик геосинтетических материалов на более объективный показатель расчетной прочности, учитывающий снижение их исходных характеристик в процессе укладки и эксплуатации в конструкции. Теоретическое значение заключается в развитии научного понимания процессов деградации и адаптации геосинтетических материалов в различных условиях их эксплуатации, в то время как практическая значимость выражается в повышении качества проектирования и надежности устраиваемых дорожных конструкций;

5. Количественные критерии оценки для каждой функции применения геосинтетических материалов, обеспечивающих конкретные эксплуатационные условия для использования геосинтетических материалов в дорожных конструкциях. Теоретическая значимость данного положения проявляется в расширении научных знаний о критериях оценки эффективности применения геосинтетических материалов, а практическое значение — в оптимизации выбора и использования геосинтетических материалов для конкретных условий дорожного строительства.

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. 8**. Вопросы развития и совершенствования нормативной базы отрасли, проектирования, строительства, эксплуатации и реконструкции транспортных сооружений; **п. 10**. Системы контроля и оценки качества проектирования, строительства, эксплуатации и реконструкции транспортных сооружений; **п. 14**. Разработка новых и совершенствование существующих методов и средств математического и физического моделирования работы конструкций, технологических процессов, организации и оперативного управления строительным производством, режимов эксплуатации и оценки технических и экологических рисков при строительстве, эксплуатации и реконструкции транспортных сооружений, их элементов, объектов и производств.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в усовершенствовании методологии идентификации геосинтетических материалов, ориентированной на их функциональную роль в дорожной конструкции. Разработаны стандартизированные методики испытаний геосинтетических материалов, обеспечивающие точную и объективную оценку их характеристик. Данный подход существенно развивает систему контроля качества геосинтетических материалов, создавая надёжные основы для оценки их эффективности.

Практическая значимость работы проявляется в создании номенклатуры критериев для эффективного использования геосинтетических материалов в дорожном строительстве. Разработанный комплекс критериев учитывает функциональное назначение материалов, такие как армирование, разделение слоёв и борьба с эрозией на откосах, предоставляя индивидуальные подходы к оценке эффективности и применимости конкретного материала в каждом сценарии применения.

Результаты исследования вносят комплексный вклад в развитие методологии использования геосинтетических материалов в дорожном строительстве, совмещая теоретические и практические аспекты, способствуя повышению качества и надёжности дорожных конструкций. Результаты исследования позволяют проектным организациям выбирать геосинтетические материалы с заданными характеристиками для выполнения конкретных функций, стимулируя производителей изготавливать материалы под задачи отрасли, а также закупать и эффективно контролировать качество материалов, поступающих на объект транспортного строительства.

Методология и методы. В исследовании геосинтетических материалов применён системно-структурный подход, включающий интеграцию методологии, методов математической статистики и использование современного оборудования для разработки и усовершенствования методик испытаний. Определены цели и задачи исследования, выбраны соответствующие методы, установлены критерии оценки, проведён анализ данных и интерпретация результатов. Разработанные методики и результаты исследования интегрированы в практику.

Достоверность представленных в исследовании положений и выводов подтверждается методологической базой исследований, основанной на фундаментальных теоретических положениях отечественной и зарубежной науки. Это также подкрепляется соблюдением основных принципов физического и математического моделирования, наличием достаточного объема экспериментальных данных, полученных с использованием аттестованного оборудования и поверенных (калиброванных) средств измерения. Совпадение результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также успешные результаты их опытно-производственной проверки подчеркивают надёжность исследовательских выводов и рекомендаций.

Внедрение результатов. Результаты научного исследования были успешно внедрены в практику национальной системы стандартизации и опытно-производственные процессы. Разработанные критерии, основанные на диссертационных результатах, были учтены при формировании технических требований в документах ГОСТ Р 55029, ГОСТ Р 56338, ГОСТ Р 56419, ГОСТ Р 59692 и ПНСТ 503-2020, которые применяются при проектировании автомобильных дорог.

Кроме того, разработанные и усовершенствованные методики испытаний легли в основу ГОСТ Р 55030, ГОСТ Р 55031, ГОСТ Р 55032, ГОСТ Р 55033, ГОСТ Р 55034, ГОСТ Р 55035, ГОСТ Р 56335, ГОСТ Р 56338, ГОСТ Р 56339, ГОСТ Р 58830, ГОСТ Р 59691, ГОСТ Р 59692, ГОСТ Р 70060 и ПНСТ 395 и применяются для определения качества геосинтетических материалов при строительстве автомобильных дорог.

Апробация результатов. Результаты экспериментальных исследований и теоретические разработки были презентованы и обсуждены на следующих международных и всероссийских научно-практических мероприятиях: Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа (Гомель, 2023 г.); онлайн-вебинаре «Безопасные и качественные автомобильные дороги» (сентябрь 2020 г.); II Международном практическом семинаре-конференции «Сибирские дороги» (Иркутск, февраль 2020 г.); научно-практическом семинаре «Требования современных нормативных документов в условиях реализации технического регламента Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» (Сочи, сентябрь 2019 г.); научно-практическом семинаре «Современные требования к геосинтетическим материалам и методам их испытаний» (Москва, февраль 2018 г.); МАХConference, II Международной конференции «Геосинтетика в дорожном строительстве» (Москва, 19 мая 2017 г.); 7-й Международной специализированной выставке-форуме «ДОРОГА ЭКСПО» (Москва, октябрь 2016 г.); научно-практической конференции «Актуальная

проблемы проектирования и строительства автомобильных дорог и искусственных сооружений с применением геосинтетических материалов и спиральновитых металлических труб» (Нижний-Новгород, сентябрь 2016 г.); межотраслевой конференции «Геосинтетические материалы в дорожном строительстве» (Москва, май 2014 г.); Международной конференции по техническому регулированию в Таможенном союзе (Москва, ноябрь 2011 г.).

Публикации. Основные положения диссертационного исследования изложены в 17 научных публикациях, из которых 6 опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Личный вклад. Формулировка цели и рабочей гипотезы диссертации, определение задач для достижения цели исследования выполнены непосредственно автором. Самостоятельно сделан анализ источников литературы по теме диссертационного исследования. Выполнена на основе научного подхода к планированию и осуществлению экспериментальная часть работы. Проведен анализ и обобщение полученных экспериментальных и теоретических результатов. Сформулированы выводы и основные положения диссертационного исследования. Разработаны проекты национальных стандартов на технические требования и методики испытаний геосинтетических материалов. Внесен существенный вклад в разработку более чем 15 документов национальной системы стандартизации на геосинтетические материалы для дорожного строительства на основе результатов, полученных в рамках диссертационного исследования. Автор, выступая в роли основного исполнителя работ, планировал теоретические и экспериментальные исследования, выполнял обработку их результатов, а также активно участвовал в разработке стандартов и их сопровождении до утверждения.

Структура и содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 206 страницах, содержит 97 рисунков и 23 таблицы. Список литературы включает 181 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, определены цель и задачи исследований, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен анализ отечественных и зарубежных источников литературы и опыта применения геосинтетических материалов (ГМ) в дорожной отрасли, изложены предпосылки для повышения эффективности их применения в отечественном дорожном хозяйстве. Показано, что применение в дорожной отрасли ГМ в предшествующие годы не было в достаточной степени ориентировано на их функциональную роль в дорожной конструкции, тогда как должно включать в себя комплексный подход к оценке эксплуатационных характеристик ГМ с учетом воздействующих на них факторов. Показано, что одним из путей решения проблемы повышения надежности дорожных конструкций является использование ГМ. Однако ГМ также подвержены воздействию транспортных и климатических факторов, что требует учета показателей их долговечности и разработки соответствующих методов оценки при применении этих материалов в дорожном строительстве.

Во второй главе приведены теоретические предпосылки формирования научной основы для установления взаимосвязи между функциональным назначением в дорожной конструкции геосинтетических материалов и их эксплуатационными характеристиками в целях повышения эффективности применения этих материалов в дорожном строительстве (рис. 1).

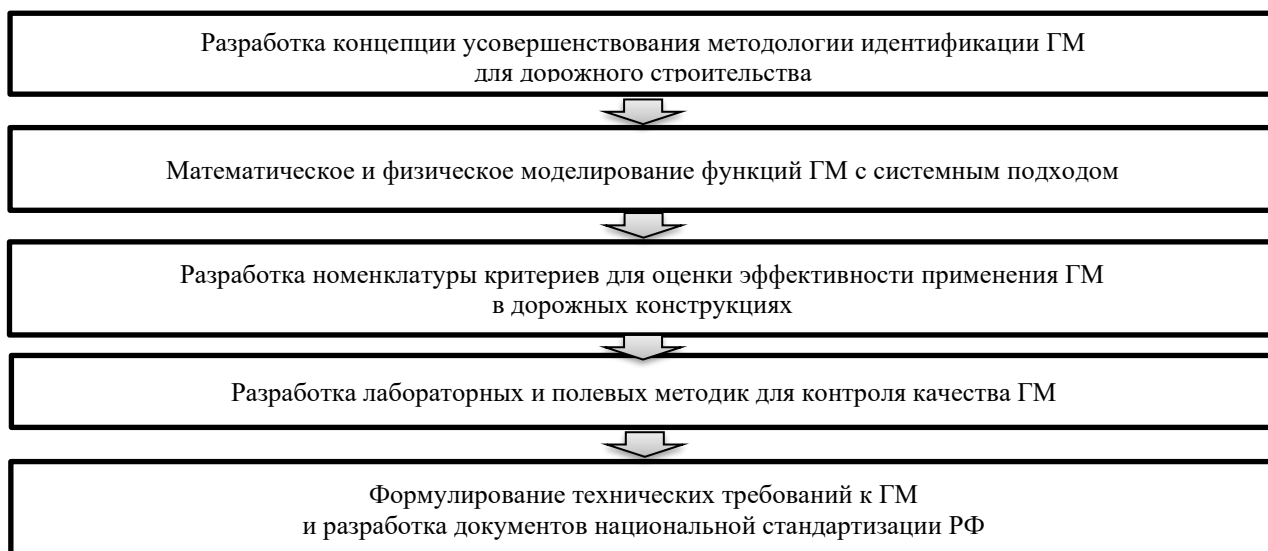


Рис. 1. Этапы формирования научной основы применения ГМ в дорожной конструкции с учетом их функционального назначения

Представлена концепция усовершенствования методологии идентификации ГМ (рис. 2). В усовершенствованной методологии учитывается взаимосвязь компонентов системы «ГМ – дорожная конструкция – природная среда», включающая два комплекса факторов, воздействующих на ГМ на всех стадиях его жизненного цикла: факторы внешней среды и техногенные факторы. Для армирования конструкций ГМ должен обладать высокой прочностью и малым удлинением, а для разделения слоев — большим удлинением при низкой прочности. При армировании слоев асфальтобетонных покрытий важно сохранение свойств ГМ при высоких температурах. Элементом методологии является набор факторов для выполнения конкретной функции ГМ с характерными их свойствами для каждой функции. Факторы, не характерные для функции, исключаются.

Использование ГМ в асфальтобетонных слоях автомобильных дорог предполагается как эффективный способ снижения интенсивности развития трещин. Основной причиной возникновения трещин являются температурные изменения, происходящие в дорожных покрытиях в зависимости от времени года и суток. В рамках исследования разработана упрощенная математическая модель, учитывающая совокупное воздействие сезонных и суточных температурных колебаний на процесс деформации дорожного покрытия.

В качестве объекта моделирования выбрана автомобильная дорога М-11 «Нева», являющаяся современной конструкцией, спроектированной и построенной в соответствии с актуальными нормативными требованиями. С 2018 года на участке дороги компанией «Автодор» введены в эксплуатацию автоматические станции мониторинга, обеспечивающие дистанционную передачу данных каждые

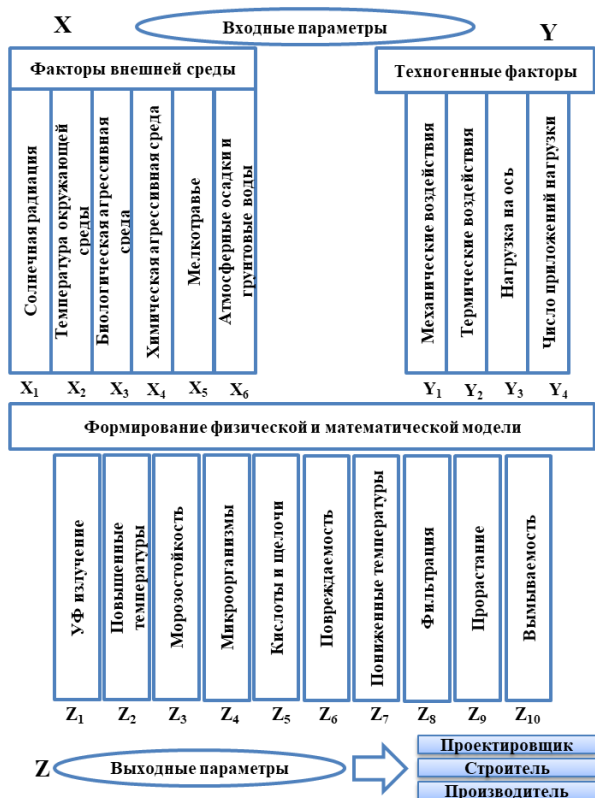


Рис. 2. Концепция усовершенствования методологии идентификации ГМ

30 минут о перемещениях, температуре и влажности дорожной одежды на всей глубине конструкции. Для измерений использовались устройства мониторинга, разработанные в Донском государственном техническом университете. Эти устройства, выполненные в виде цилиндров с чувствительными элементами, электроникой и автономной системой питания, устанавливаются в вертикальные каналы, проходящие через все сечение дорожной одежды — от асфальтобетонного покрытия до грунтового основания. Они позволяют осуществлять измерения температуры на внутренних границах между слоями дорожной одежды, а также на глубине 300 мм в грунте земляного полотна.

Для задания начальных и граничных условий использовалась информация, полученная в период с 14 января 2019 года по 16 августа 2021 года с устройства мониторинга № 118, установленного на трассе М-11 (км 60+450). Устройство не измеряет температуру поверхности дорожной одежды, поэтому в качестве граничного условия задавалась зависимость температуры от времени, измеренная на границе между верхним слоем ЩМА-20 и нижнем слое из плотного асфальтобетона (рис. 3). Модельная функция, построенная с целью выявления наиболее неблагоприятных температурных режимов, вызывающих максимальные температурные напряжения от изменения температуры, учитывает максимальное суточное понижение температуры в холодное время года (12 °С) и максимальную скорость изменения температуры (4 °С/час). При положительном знаке модель предполагает линейное увеличение температуры в течение 3 часов, затем её удержание на уровне +12 °С в течение 9 часов и возврат к 0 °С за 3 часа. При отрицательном знаке температура сначала понижается, а затем повышается. Для численного решения задачи методом сеток использовался программный модуль, написанный на языке системы инженерных вычислений «Matlab».

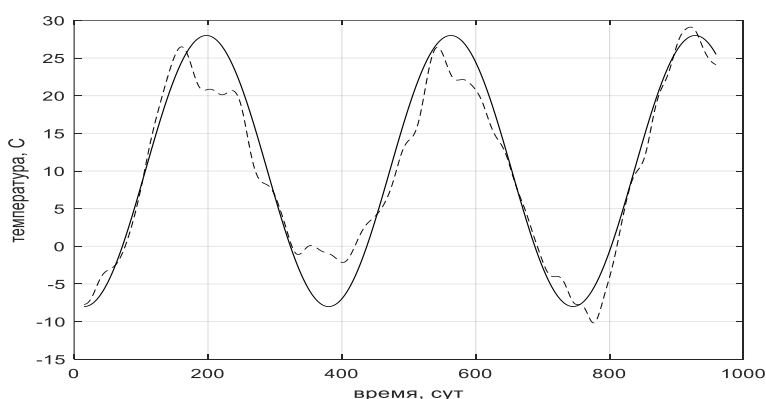


Рис. 3. Моделирование сезонных колебаний температуры на поверхности дорожной одежды (начало отсчета – 15.01.2019): пунктирная линия – действительные сезонные колебания температуры; сплошная линия – используемая в работе кусочно-линейная аппроксимация сезонных колебаний температуры

Расчет напряженно-деформированного состояния вязкоупругих материалов в условиях неоднородного и нестационарного температурного поля в двумерных и трехмерных постановках представляет собой сложную задачу. Для упрощения данной задачи используется приближенный метод Хиллса и Брайена, позволяющий свести задачу к последовательному решению упругих задач. Весь расчётный промежуток времени длительностью 1 сутки разбивался на малые интервалы времени – Δt , и напряжение в момент t_{k+1} определялось суммированием по формуле:

$$\sigma(t_{k+1}) = \alpha \sum_{p=1}^k S(\Delta t, T_p)(T_{p+1} - T_p), \quad (1)$$

где α – коэффициент температурного расширения асфальтобетона; T_p – температура в момент времени t_p ; $S(\Delta t, T_p)$ – модуль жесткости асфальтобетона в виде функции, зависящей от длительности нагружения Δt и температуры T_p .

Будем считать, что сезонные изменения температуры настолько медленные, что вследствие явления релаксации не приводят к появлению температурных напряжений. На фоне сезонного профиля возможны быстрые суточные изменения температуры, вызывающие

температурные напряжения. Объединяя максимальное наблюдаемое суточное понижение температуры в холодное время года ($\Delta T = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$) с максимальной наблюдаемой скоростью ее изменения ($\Delta T / \Delta t = 4 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{час}$), примем следующую модельную функцию суточного изменения температуры:

$$T_{\text{сут}} = \pm \begin{cases} 4t, & t \in [0,3); \\ 12, & t \in [3,12); \\ 4(15-t), & t \in [12,15); \\ 0, & t \in [15,24). \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 4 показаны результаты расчета распределения температуры по глубине асфальтобетонных слоев моделируемой дорожной одежды на 1 января при положительном знаке в формуле (2).

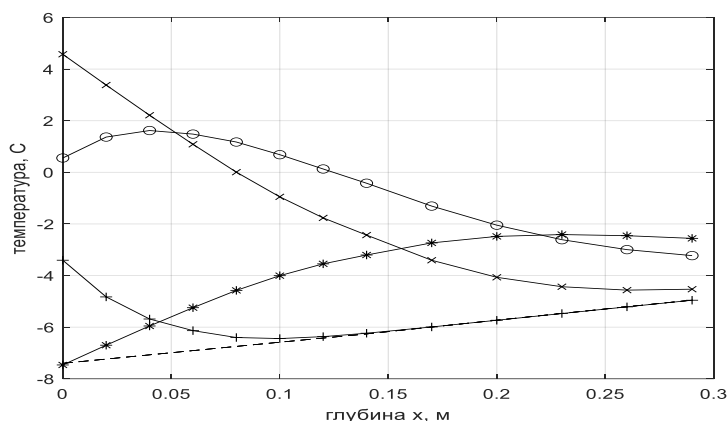


Рис. 4. Суммарное сезонное и суточное распределение температуры по глубине для выбранного участка во времени:
 (+) – через 1 час,
 (x) – через 7 часов,
 (o) – через 13 часов,
 (*) – через 19 часов

Расчёт проводился с использованием линейного уравнения теплопроводности для слоистой конструкции. На первом этапе были получены сезонные распределения температур по глубине на 1 декабря, 1 января и 1 марта. На втором этапе определялись суточные распределения температур, где граничное условие задавалось суммой сезонной и суточной температур (2) на поверхности, а начальное — сезонным распределением, найденным на первом этапе.

Влияние температурных деформаций слоев из щебеночно-песчаной смеси, песка и грунтового основания, обладающих значительно меньшей жёсткостью по сравнению с асфальтобетоном, было исключено из расчёта. Для упрощения расчётов выбрана часть ремонтируемой конструкции с продольным профилем, на старом покрытии которой имеется вертикальная поперечная трещина. В первом варианте трещина перекрывается армирующим ГМ и новым слоем асфальтобетона, во втором — только новым слоем асфальтобетона. Для расчёта температурных напряжений в исследуемой модели дорожной одежды применялся метод конечных элементов в двумерной постановке. Ввиду симметричности конструкции рассматривался ее сегмент шириной 1 м, расположенный с левой стороны от трещины (рис. 5).

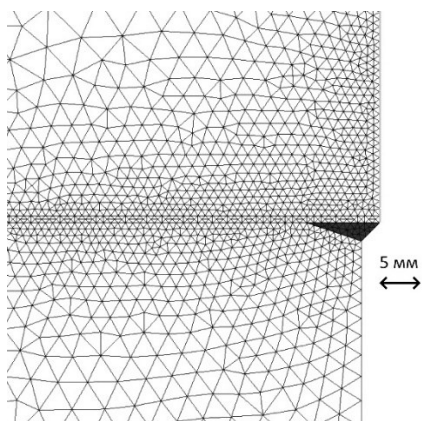


Рис. 5. Основная расчетная модель дорожной конструкции (включает внедрение армирующего ГМ между старым и новым слоями асфальтобетонного покрытия)

В области вершины вертикальной трещины выполнено сгущение треугольной расчетной сетки, с выделением треугольника ослабленного материала, моделирующего экспериментально наблюдаемую зону отслаивания нижнего слоя асфальтобетона от верхнего. Для анализа влияния армирования на напряженно-деформированное состояние конструкции проведены расчеты напряжений в верхнем слое на горизонтальном отрезке над

вершиной трещины на расстоянии 2,5 мм от нижней границы слоя для двух сценариев: с армирующим слоем и без него.

Армирующий ГМ на основе стекловолокна с прочностью 120 кН/м моделируется тонким однородным слоем толщиной 1 мм с модулем упругости $8 \cdot 10^3$ МПа. Оси координат расположены стандартно: Ox направлена горизонтально вправо, Oy – вертикально вверх, начало координат находится в левом верхнем углу сегмента. На левых и правых границах сегмента заданы нулевые горизонтальные перемещения, на нижней границе – нулевые вертикальные перемещения, остальные границы остаются свободными. Расчет напряжений, возникающих в сегменте при совокупном воздействии сезонной температуры и экстремального изменения суточной температуры (2), проводился на промежутке времени длительностью 24 часа по формуле (1).

На рис. 6 представлены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния рассматриваемого сегмента в окрестности трещины. Видна схожесть кривых, что показывает достижение максимального растягивающего напряжения в конце фазы постоянного отрицательного приращения температуры перед возвращением к сезонным значениям.

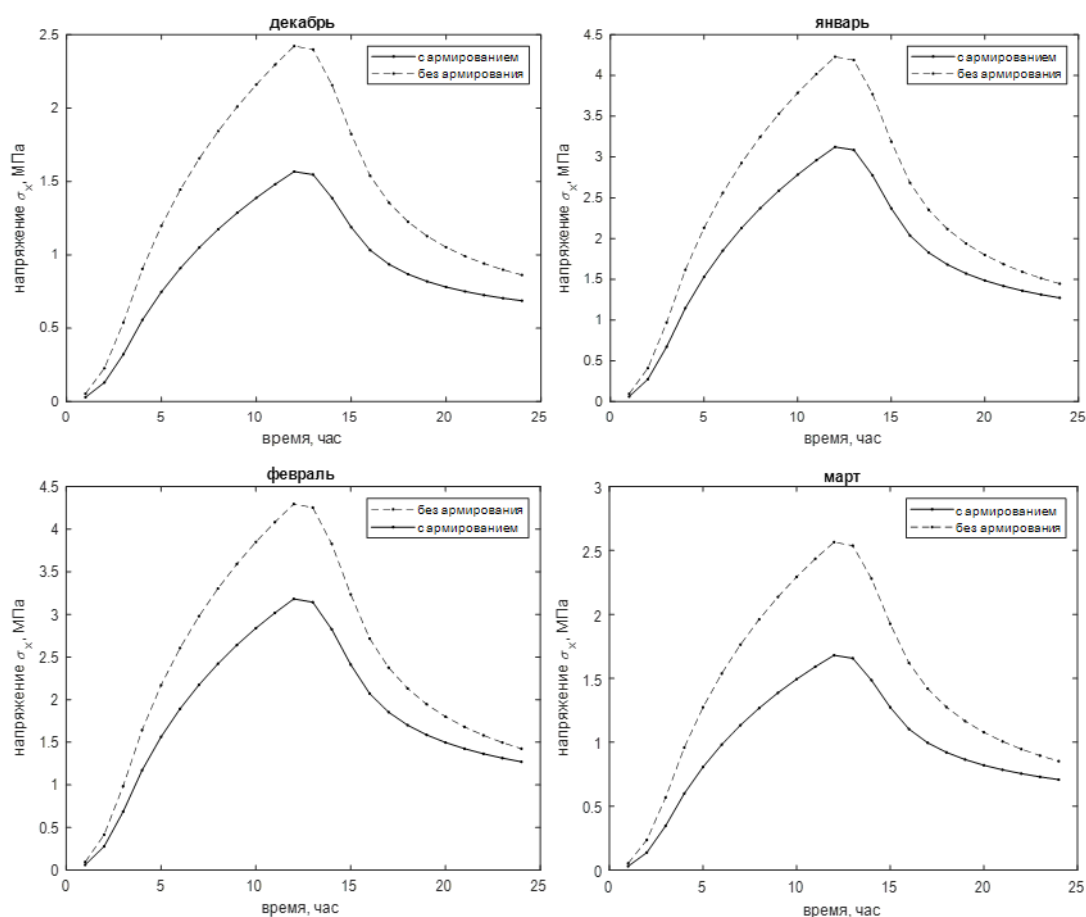


Рис. 6. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции

На рис. 7а приведено распределение напряжения на горизонтальном отрезке в окрестности вершины трещины. Из графика видно, что применение ГМ способствует ослаблению концентрации напряжений со снижением максимума напряжения на 25–35%. На рис. 7б показано влияние секущего модуля упругости ГМ при 3% удлинении на уровень растягивающих напряжений при средних температурах 4 холодных месяцев.

Были изучены теоретические особенности расчета армирования ГМ несвязанных конструктивных слоев дорожной одежды с целью улучшения эксплуатационных характеристик дорожных конструкций и повышения их долговечности. Путем использования теории упругости для многослойного полупространства было смоделировано напряженно-деформированное состояние многослойных дорожных конструкций при воздействии внешних нагрузок.

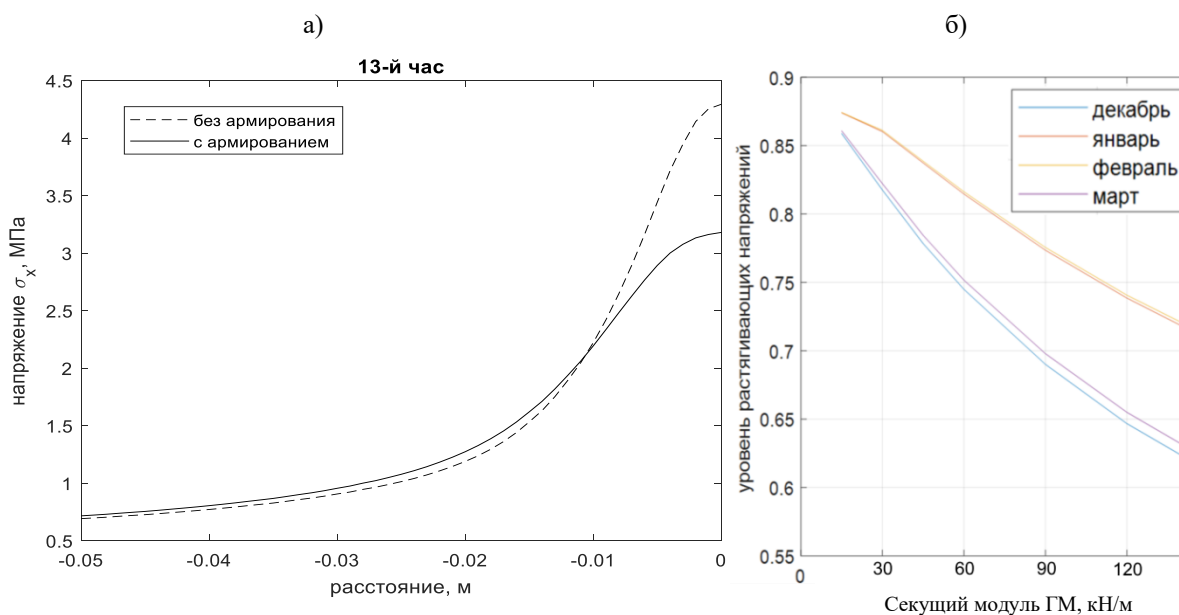


Рис. 7. Результаты математического моделирования

Основными параметрами, определяющими НДС дорожной одежды, являются напряжения и деформации, возникающие под воздействием транспортных нагрузок. Для выполнения расчетов применялось программное обеспечение «SigmaPro», разработанное АНО «НИИ ТСК» совместно с ООО НТЦ «Геотехнологии». Программное обеспечение учитывает следующие исходные данные: количество слоев дорожной одежды, виды контактов на границе слоев, давление колеса на покрытие, расчетный диаметр отпечатка колеса при динамическом и статическом воздействиях, толщины и модули упругости слоев конструкции. Основное назначение «SigmaPro» заключается в автоматизации и упрощении процессов расчета НДС многослойных дорожных конструкций, что позволяет получать более точные и надежные результаты.

Были проведены полевые испытания с целью определения модуля упругости на поверхности конструктивного слоя, армированного ГМ, а также модуля упругости нижележащего слоя. Методом обратного пересчета был определен модуль упругости слоя щебеночно-песчаной смеси толщиной 20 см с ГМ в основании. Определение модулей упругости проводилось при послойных испытаниях по методике, аналогичной представленной в ГОСТ Р 59918. Полученные данные затем использовались для оценки фактического модуля упругости материала в конструкции и его сопоставления с проектными значениями данного материала.

Результаты расчетов, выполненных в ПО «SigmaPro» и «Robur» (контрольные расчеты), показали, что применение ГМ позволяет увеличить модуль упругости дорожной конструкции. В частности, расчет в «Robur» показал, что модуль упругости конструкции без ГМ составляет 440 МПа, а конструкции, армированной ГМ, – 458 МПа, что соответствует повышению модуля упругости на 4 %. Применение «SigmaPro» позволило провести более детализированные расчеты, которые показали, что вклад ГМ составляет лишь 3 % (модуль упругости неармированной конструкции составляет 369 МПа, а армированной - 379 МПа). При этом увеличение суммарного числа приложений расчетной нагрузки составило 16 %, увеличив с 1 179 716 приложений нормированной нагрузки для неармированной конструкции до 1 411 248 приложений для армированной конструкции. Отмечено, что в исходных данных для расчета были использованы результаты натурных испытаний конкретного образца ГМ при учете вероятности деградации его свойств (утраты прочности из-за механических повреждений при укладке).

Результаты расчета дорожных конструкций подтвердили эффективность применения ГМ для улучшения эксплуатационных характеристик дорожных одежд.

В третьей главе представлены результаты разработки номенклатуры критериев эффективного использования ГМ в дорожных конструкциях в зависимости от их функции.

Для борьбы с эрозией на откосах были проведены натурные и лабораторные испытания. Натурные испытания на откосах полотна, возведенных на полигоне в г. Дзержинске. Эксперимент включал определение массы сошедшего грунта с каждого участка откоса в течение двух месяцев, наблюдения за формированием растительного слоя и мониторинг состояния. Укладка ГМ способствовала удержанию семян трав и формированию устойчивого растительного покрова на откосе.

По прошествии 4 лет был проведен отбор проб, подготовка образцов и определение остаточной прочности ГМ. На гистограмме на рис. 8 представлены данные остаточной прочности материалов, извлеченных с откоса, а также сопоставление результатов испытаний с расчетной прочностью.

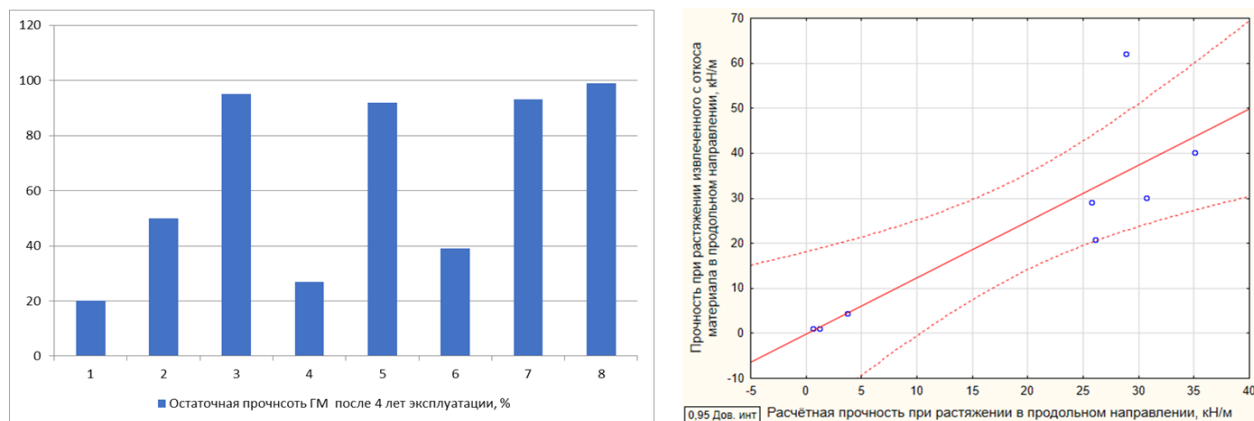


Рис. 8. Результаты 4-летних наблюдений эксплуатации ГМ на откосах

Для проверки наличия линейной зависимости между расчетной прочностью при растяжении (долговечностью) и прочностью при растяжении извлеченного с откоса материала были определены коэффициенты корреляции Пирсона. На диаграмме рассеяния визуализирована эта зависимость для продольного направления (рис. 8). Выявлена статистически значимая корреляция: 0,85 для продольного и 0,75 для поперечного направления, что подтвердило правильность коэффициентов долговечности и эффективность методик их измерения.

Разделение слоев из минеральных материалов. Эксперимент по исследованию ГМ для разделения слоев оснований из зернистых минеральных материалов был проведен на испытательном полигоне в г. Дзержинске. На левой гистограмме (рис. 9) показано влияние повреждаемости материала при укладке его в дорожной одежде между слоями щебня и песка, щебня-щебня, и песок-песок. На правой гистограмме показана устойчивость различных материалов к морозостойкости, воздействию УФ и циклическим нагрузкам. Установлен разброс снижения прочности ГМ от воздействующих факторов, свидетельствующий о необходимости контроля прогнозирования области применения материала.

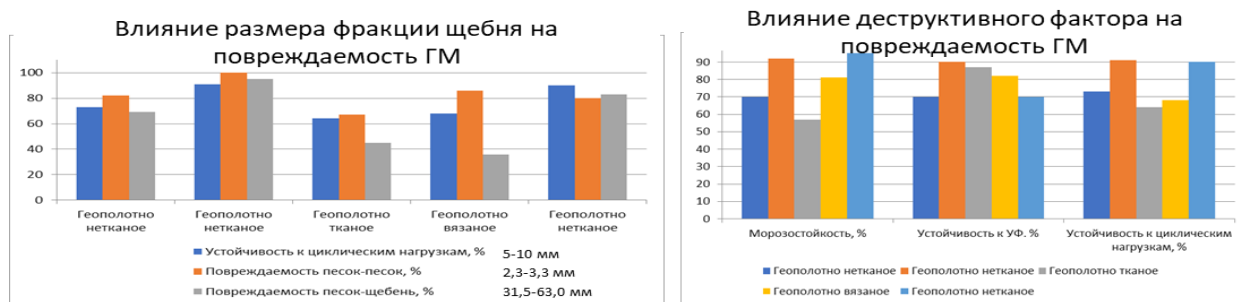


Рис. 9. Результаты испытаний ГМ для функции разделения

Результаты испытаний позволили сформировать представления о работе ГМ в конструкции, которые были использованы для формирования перечня характеристик материалов, применяемых для разделения слоев из дискретных материалов.

Армирование слоев дорожной одежды с основанием из минеральных материалов.

Для оценки воздействия факторов и установления минимальных показателей свойств для функции армирования на участке автомобильной дороги Старочернеево – Парсаты – Сявель в Рязанской области были проведены натурные испытания ГМ. Было устроено шесть участков отремонтированных дорожных одежд: пять участков с ГМ от ведущих отечественных производителей и одного зарубежного, а также контрольный участок.

В течение двух лет проводили мониторинг состояния вышеуказанных участков, оценивая модуль деформации, колееобразование и наличие трещин. По итогам двухлетней эксплуатации, в рамках которой определялись модули деформации при первичном и повторном циклах нагружения, рассчитывался общий модуль упругости на поверхности конструктивного слоя, а также отношение несущей способности первичного и повторного нагружений. На контрольном участке наблюдались более значительные деформации, что подтвердило эффективность применения ГМ (рис. 10).

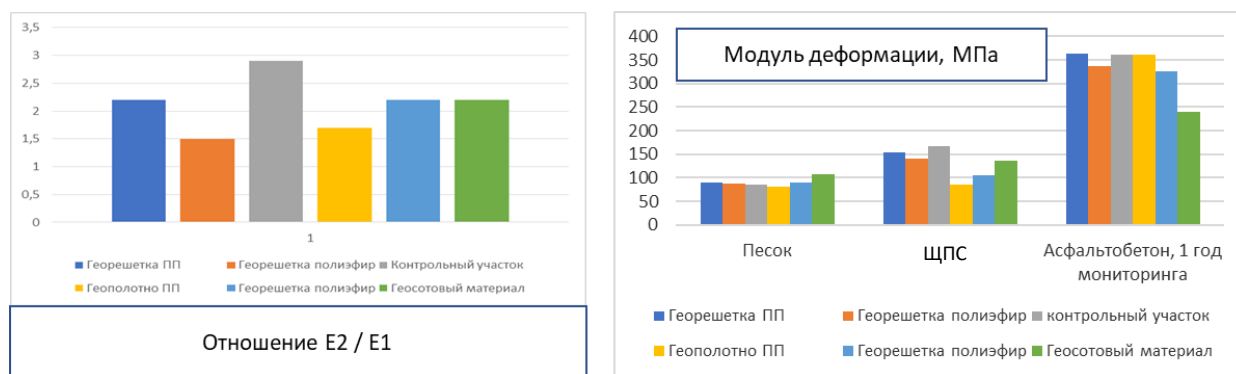


Рис. 10. Результаты эксперимента по армированию нижних слоев дорожной одежды

Армирование асфальтобетонных слоев дорожной одежды. Для проверки результатов моделирования, изложенных во второй главе, проведен натурный эксперимент на участке автодороги Рязань – Ряжск – Ал. Невский – Данков – Ефремов в Рязанской области при проведении работ по её ремонту. В эксперименте использованы 12 партий ГМ от 7 производителей (включая 2 зарубежных). Длина каждого участка дорожной одежды с ГМ составила 100 м, без ГМ — 50 м.

Результаты показали, что армированные участки после 2 лет мониторинга имели в два раза меньше трещин по сравнению с неармированными покрытиями. Среднее значение прочности материалов на участках, с применением которых модуль деформации увеличился по сравнению с контрольным, составило 40 кН/м. При этом влияние ГМ на процесс колееобразования на дорожном покрытии не обнаружено.

В четвертой главе представлены результаты практического внедрения результатов исследования, которые позволили обосновать выбор факторов, воздействующих на прочностные характеристики ГМ, применительно к области применения материала.

ГМ в течение жизненного цикла меняет свои прочностные характеристики, поэтому часть методик направлена на оценку снижения прочности от различных воздействующих факторов. За более чем 10-летний период наблюдений и контроля качества материалов обнаружены образцы ГМ, показавших наихудшие значения остаточной прочности от следующих воздействий:

- устойчивость к УФ-воздействию – 60 %;
- устойчивость к микроорганизмам – 70 %;
- устойчивость к кислотам и щелочам – 10 %;
- устойчивость к циклическим нагрузкам – 5 %;
- устойчивость к циклам замораживания и оттаивания – 10 %;
- устойчивость к повышенным температурам – 10 %;
- устойчивость к повреждаемости при укладке – 5 %.

Расчет долговременной прочности ГМ в зависимости от выполняемой функции можно рассчитать в соответствии с формулами (3) и (4) и таблицей.

$$T_{дол} = \frac{T_{нор}}{k_{общ}}, \quad (3)$$

где $T_{нор}$ – исходная прочность ГМ, кН/м; $k_{общ}$ – определяется по формуле (4)

$$k_{общ} = k_{1x} \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_{4x} \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot k_7 \cdot k_8. \quad (4)$$

Таблица

Наименование коэффициента	Функция ГМ			
	1	2	3	4
Коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений материала при укладке	k_{12}	k_{1x}	k_{1x}	k_{1x}
Коэффициент, учитывающий снижение прочности от ползучести	-	k_2^*	-	-
Коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия ультрафиолетового излучения	k_3	k_3	k_3	k_3
Коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия агрессивных сред	k_{4x}	k_{4x}	k_{4x}	k_{4x}
Коэффициент, учитывающий снижение прочности от микробиологического воздействия	-	k_5	k_5	k_5
Коэффициент, учитывающий снижение прочности от многократного замораживания и оттаивания	k_6	k_6	k_6	k_6
Коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия повышенных температур	k_7	-	-	-
Коэффициент, учитывающий прочность швов геосотовых материалов	-	k_8	-	k_8

1 – армирование асфальтобетонных слоев дорожной одежды;
 2 – армирование не асфальтобетонных слоев дорожной одежды и оснований;
 3 – разделение не асфальтобетонных слоев дорожной одежды и оснований;
 4 – борьба с эрозией на откосах;
 * - только для геосинтетического материала, выполняющего функцию армирования основания и тела земляного полотна, откосов и армогрунтовых подпорных стен.

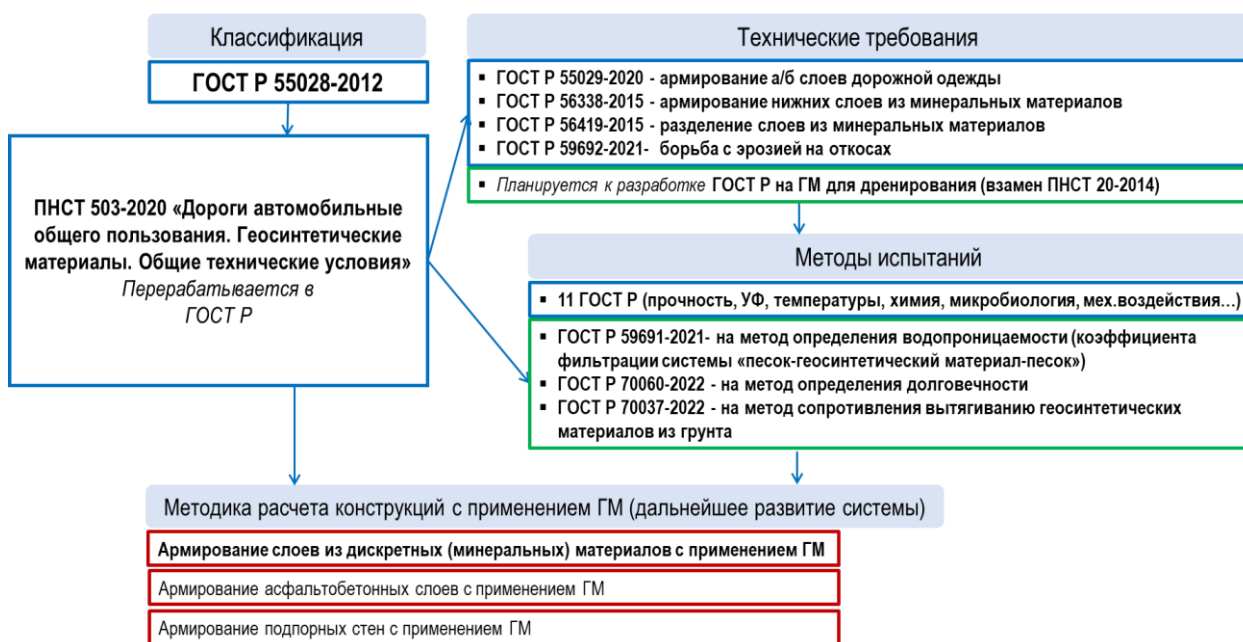


Рис. 11. Фонд документов по стандартизации на ГМ и перспективы для его развития в дорожном строительстве

Результаты исследования легли в основу разработки системы контроля и оценки качества ГМ в дорожном хозяйстве Российской Федерации. Эта система представлена в виде документов национальной системы стандартизации, основными разработчиками которых

являются АНО «НИИ ТСК», ООО «Мегатех инжиниринг» и ООО «Инновационный технический центр». Она включает 16 стандартов, определяющих 18 методик испытаний ГМ, из которых 12 адаптированы из EN, ISO и ASTM, а также стандарт по классификации и техническим требованиям к каждой функции. Созданная на настоящее время отраслевая система представлена на рис. 11.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный комплексный аналитический обзор позволил выявить и систематизировать ключевые параметры, определяющие эффективное применение геосинтетических материалов для дорожного строительства. Определены четыре основные функции использования геосинтетических материалов: армирование асфальтобетонных слоев дорожной одежды, армирование слоев дорожной одежды из дискретных материалов, разделение конструктивных слоев из дискретных материалов и борьба с эрозией на откосах земляного полотна.

2. В предложенной усовершенствованной методологии рассмотрена взаимосвязь элементов системы «геосинтетический материал – дорожная конструкция – природная среда». Учет двух групп факторов, внешних и техногенных, влияющих на геосинтетический материал на всех этапах его жизненного цикла, позволяет оптимизировать выполнение конкретных функций (армирование, разделение, борьба с эрозией на откосах). Для оценки долговечности применяются только те факторы, которые соответствуют конкретной функции, исключая нерелевантные.

3. Разработана математическая модель армирования геосинтетическими материалами асфальтобетонных слоев дорожной одежды, которая показала снижение вероятности образования в них низкотемпературных трещин, и сделаны расчеты дорожной конструкции с применением геосинтетического материала, выполняющего функцию армирования несвязанных конструктивных слоев, подтвердивших эффективность применения геосинтетических материалов для улучшения эксплуатационных характеристик дорожных конструкций.

4. Обоснован системный подход к анализу каждой функции применения геосинтетических материалов в дорожном строительстве, включающий применение математических моделей для определения расчетной прочности геосинтетических материалов. Проведена разработка и систематизация критериев эффективного использования геосинтетических материалов, что позволило определить параметры, используемые для основных их функций в конструкции, - армирования, разделения и борьбы с эрозией на откосах, что способствует более целенаправленному и обоснованному выбору материалов для конкретных условий их применения.

5. Проведенные натурные испытания подтвердили эффективность разработанных методик и предложенных критериев, что позволило провести внедрение результатов диссертационной работы при разработке национальных стандартов и их последующее применение в практике дорожного строительства для повышения качества и надежности дорожных конструкций, а также экономической эффективности процесса их строительства и эксплуатации.

6. Разработаны методики оценки физико-механических и химико-биологических характеристик геосинтетических материалов, а также методика полевых испытаний на повреждаемость геосинтетических материалов при укладке, что позволяет обеспечить создание обоснованной и стандартизированной системы для оценки их качества. Указанные методики обеспечивают повышение точности и объективности оценки характеристик геосинтетических материалов, что является важным условием для обеспечения эксплуатационной надежности дорожных конструкций.

Результаты исследования по развитию методологии идентификации и системы оценки качества геосинтетических материалов позволили повысить эффективность их использования в дорожном строительстве и обеспечили повышение надежности дорожных конструкций. Применение геосинтетических материалов в дорожном строительстве проводится в

соответствии с разработанным комплексом документов национальной системы стандартизации Российской Федерации.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

Статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ

1 **Медведев, Д.В.** Методологические подходы к определению эксплуатационных характеристик геосинтетических материалов для армирования асфальтобетонных слоев дорожных одежд / Е.Н. Симчук, Д.В. Медведев, С.А. Богомолова // Дороги и мосты. - 2021. - № 2 (46). – С. 283-300.

2 **Медведев, Д.В.** Гармонизация норм и методов испытаний геосинтетических материалов в дорожных конструкциях / Д.В. Медведев, Ю.И. Калгин // Строительная механика и конструкции – 2023. - № 2 (37). – С. 108-120.

3 **Медведев, Д.В.** Анализ свойств геосинтетических материалов, пригодных для борьбы с отраженными трещинами в асфальтобетонных покрытиях / Д.В. Медведев, Е.Н. Симчук, А.В. Бочкарев // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2023. – Т. 10, № 4. - <https://t-s.today/PDF/08SATS423.pdf>.

4 **Медведев, Д.В.** Исследование прочностных свойств геосинтетических материалов с учетом секущего модуля / Е.Н. Симчук, Д.В. Медведев // Дороги и мосты. – 2024. - № 51. – С. 155-174. - EDN: AVXNAJ.

5 **Медведев, Д.В.** Научно-технические проблемы и перспективы применения геосинтетических материалов в дорожной отрасли / Д. В. Медведев, Е. Н. Симчук, А. Е. Симчук // Путевой навигатор. – 2023. – № 57 (83). – С. 26-35. – EDN CYZJCT.

6 **Медведев, Д.В.** Влияние армирования несвязанных конструктивных слоев геосинтетическими материалами при проектировании нежестких дорожных одежд / Д.В. Медведев, Ю.И. Калгин, Е.Н. Симчук // // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2024. - № 4 (76). – В печати.

Статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ, по смежной научной специальности 2.1.5

7 **Медведев, Д.В.** Определение долговременной прочности геосинтетических материалов на основании расчета комплексного показателя долговечности / Д.В. Медведев, Ю.И. Калгин, С.А. Митрофанова // Строительные материалы. – 2023. - № 9. – С. 38-47.

Статьи в других изданиях

8 **Медведев, Д.В.** Анализ эффективности применения геосинтетических материалов в конструкциях дорожных одежд / А. В. Бочкарев, Д. В. Медведев, М. Ю. Горский // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 70-летию БелИИЖТа - БелГУТа. В 2 ч., Гомель, 16–17 ноября 2023 года. – Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2023. – С. 376-377. – EDN EIMLFI.

9 **Медведев, Д.В.** Проблемы и перспективы расчетов дорожных конструкций с применением геосинтетических материалов / Е.Н. Симчук, Д.В. Медведев, А.Е. Симчук // Автомобильные дороги и мосты. – 2023. - № 2 (32). - С. 89-95.

10 **Медведев, Д.В.** Результаты сопоставительных испытаний геосинтетических материалов для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды / Д.В. Медведев // Технический вестник дорожного хозяйства. - 2011. - № 2. - С. 18-27.

11 **Медведев, Д.В.** Стандартизация геосинтетических материалов – путь к эффективному применению / А.Ю. Баранов, А.Н. Деятелилов, Д.В. Медведев, О.Н. Столяров, А.В. Труевцев // Технический вестник дорожного хозяйства. – 2012. - № 3. - С. 41-43.

12 **Медведев, Д.В.** Полигонные испытания геосинтетических материалов / Д.В. Медведев, А.Ю. Баранов, А.Н. Деятелилов, О.Н. Столяров // Технический вестник дорожного хозяйства. -2013. - № 4. - С. 26-29.

13 **Медведев, Д.В.** Об особенностях контроля качества геосинтетических материалов / А.Ю. Баранов, А.Н. Деятелилов, О.Н. Столяров, Д.В. Медведев // Дороги. Инновации в строительстве. – 2014. - № 34. - С. 46-48.

14 **Медведев, Д.В.** Нормативно-техническое обеспечение применения геосинтетических материалов / Е.Н. Симчук, Д.В. Медведев // Мир дорог. - 2015. - № 4. - С. 57-59.

15 **Медведев, Д.В.** Практическое применение и направления совершенствования ГОСТ Р 55030-2012 / Д.В. Медведев, М.И. Никитин // Дороги. Инновации в строительстве. – 2016. - № 51.- С. 22-25.

16 **Медведев, Д.В.** История создания комплекса нормативных документов по геосинтетическим материалам / Д.В. Медведев, М.И. Никитин, А.С. Фролов // Дороги. Инновации в строительстве. – 2017. - № 59. – С. 22-25.

17 **Медведев, Д.В.** Современное развитие системы стандартов в области применения геосинтетических материалов в дорожном строительстве / Д.В. Медведев, Е.Н. Симчук, М.И. Никитин, С.А. Богомолова // Наука и технологии. – 2021. - № 3. - С. 94-101.

Медведев Дмитрий Викторович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

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 № 013.

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