

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ВГТУ», ВГТУ)



На правах рукописи

Медведев Дмитрий Викторович

РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ  
В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

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

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Калгин Юрий Иванович

Воронеж 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	13
1.1 Классификация, структура и свойства геосинтетических материалов .....	13
1.2 Анализ отечественного и зарубежного опыта применения геосинтетических материалов.....	24
1.3 Предпосылки для повышения эффективности применения геосинтетических материалов.....	35
1.4 Выводы по главе 1 .....	38
ГЛАВА 2. Теоретическое обоснование и совершенствование методологии применения геосинтетики в дорожном строительстве .....	39
2.1 Усовершенствование методологии идентификации геосинтетических материалов для дорожного строительства. Основная гипотеза исследований.....	39
2.2 Общие положения по армированию слоев из зернистых материалов .....	43
2.3 Общие положения по армированию асфальтобетонных слоев дорожной одежды .....	46
2.4 Влияние армирования на напряженное состояние образцов из асфальтобетона при одноосном растяжении и изгибе .....	47
2.5 Моделирование распределения температур по слоям дорожной одежды.....	50
2.6 Постановка задачи определения напряженного состояния дорожной одежды в окрестности трещины.....	56
2.7 Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции .....	67
2.8 Расчет конструкций с применением геосинтетических материалов и без .....	70
2.9 Выводы по главе 2 .....	79
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА НОМЕНКЛАТУРЫ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ .....	80
3.1 Геосинтетические материалы, применяемые для борьбы с эрозией на откосах.....	80
3.1.1 Общие положения по борьбе с эрозией на откосах.....	80
3.1.2 Натурный эксперимент с ГМ для борьбы с эрозией на откосах .....	81
3.2 Геосинтетические материалы, применяемые для разделения слоев из зернистых материалов.....	90
3.2.1 Общие положения по разделению слоев .....	90
3.2.2 Натурный эксперимент по разделению слоев дорожной одежды из минеральных материалов.....	92

3.3 Геосинтетические материалы, применяемые для армирования слоев дорожной одежды .	99
3.3.1 Натурный эксперимент по армированию слоев дорожной одежды из минеральных материалов.....	99
3.3.2 Геосинтетические материалы, применяемые для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды.....	103
3.4 Выводы по главе 3 .....	116
<b>ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ И ПОЛЕВЫХ МЕТОДИК ДЛЯ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ .....</b>	<b>117</b>
4.1 Метрологическое обеспечение исследований .....	117
4.2 Разработка и совершенствование лабораторных методик определения физико-механических характеристик геосинтетических материалов .....	118
4.2.1 Усовершенствование методики определения прочностных характеристик геосинтетических материалов .....	118
4.2.2 Усовершенствование методики определения устойчивости геосинтетических материалов к ультрафиолетовому излучению .....	125
4.2.3 Разработка методики определения устойчивости геосинтетических материалов к температурным переходам через ноль (морозостойкость).....	126
4.2.4 Разработка методики определения гибкости геосинтетических материалов при отрицательных температурах .....	127
4.2.5 Разработка методики определения устойчивости геосинтетических материалов к повышенным температурам.....	128
4.2.6 Усовершенствование методики определения стойкости к циклическим нагрузкам ..	129
4.2.7 Усовершенствование методики определения прочности при статическом продавливании (CBR-тест) .....	129
4.2.8 Анализ методики определения прочности при динамическом продавливании (испытание падающим конусом).....	136
4.2.9 Усовершенствование методики определения прочности швов геосотовых материалов .....	137
4.2.10 Усовершенствование методики определения прорастания.....	139
4.2.11 Усовершенствование методики определения вымываемости.....	139
4.2.12 Разработка методики определения коэффициента фильтрации.....	141
4.2.13 Разработка методики определения напряжения сдвига асфальтобетонных слоев с геосинтетическим материалом .....	145
4.3 Усовершенствование лабораторных методик определения химико-биологических характеристик геосинтетических материалов .....	150

4.3.1 Усовершенствование методики определения устойчивости геосинтетических материалов к агрессивным средам .....	150
4.3.2 Усовершенствование методики устойчивости к микроорганизмам.....	150
4.4 Усовершенствование методики определения долговечности геосинтетических материалов .....	154
4.5 Выводы по главе 4 .....	164
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	169
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	171
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акты внедрения результатов диссертационного исследования .....	186
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Подтверждение метрологического обеспечения применяемых средств измерения и испытательного оборудования.....	194

## ВВЕДЕНИЕ

С конца XX века геосинтетические материалы начали активно использоваться в дорожном строительстве как в России, так и за рубежом, что обусловлено ростом строительства транспортной инфраструктуры и необходимостью ускорения её темпов. Эти материалы выполняют важные функции в дорожных конструкциях, включая укрепление асфальтобетонных покрытий и оснований, предотвращение эрозии и разделение слоев дорожной одежды.

Использование геосинтетиков способствует повышению эксплуатационных характеристик дорог и увеличению их срока службы. В XXI веке увеличилось применение этих материалов, что потребовало разработки стандартов для их технических характеристик и методов испытаний.

Однако в России не хватает внимания к проверке геосинтетических материалов на соответствие проектным требованиям. Обычно качество подтверждается только заводским паспортом, что связано с отсутствием унифицированных методик оценки и недостаточной лабораторной базой для испытаний.

Одной из главных задач развития дорожной отрасли в России является увеличение межремонтных сроков и долговечности автомобильных дорог. Для этого необходимо шире использовать геосинтетики, однако отсутствие унифицированных классификаций и методов испытаний затрудняет этот процесс. Решение заключается в углубленном исследовании свойств материалов с целью разработки стандартов, которые обеспечат их эффективное применение в строительстве.

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

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 Казарновского В.Д., Доброва Э.М., Баранова А.Ю., Столярова О.Н., Федоренко Е.В., Гладкова В.Ю., Фомина А.П., Петряева А.В., Ашпиза Е.С., Левашова Г.М., Крашенинина Е.Ю., Деятелилова А.Н., A. 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 исследований - методология идентификации геосинтетических материалов в контексте их применения в дорожном строительстве.

Предмет исследований - 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 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;

- 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.

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 к нему соответствующие эксплуатационные требования, и включающая в себя:

- 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;

- разработку математической модели армирования ГМ 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 ГМ для улучшения эксплуатационных характеристик дорожных одежд;

- разработку и обоснование систематического 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;

- установлении 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 ГМ асфальтобетонных слоев дорожной одежды, показавшую 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 ГМ 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 Методику определения расчетной прочности, учитывающую разнообразные факторы, которые влияют на эффективность применения геосинтетических материалов. Методика позволяет заменить использование исходных характеристик ГМ 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 ГМ 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.

Результаты исследования были использованы автором при разработке критериев, которые легли в основу формирования технических требований к ГМ в документах национальной системы стандартизации РФ:

- ПНСТ 503 – общие технические требования к геосинтетическим материалам для дорожного строительства;
- ГОСТ Р 55029 – требования к армированию асфальтобетонных слоев дорожной одежды;
- ГОСТ Р 56338 – требования к армированию слоев дорожной одежды из дискретных материалов;
- ГОСТ Р 56419 – требования к разделению слоев из дискретных материалов;



- ГОСТ Р 59692 – требования по борьбе с эрозией на откосах.

Разработано 6 новых методик испытаний и 10 методик переработано из стандартов EN, ISO и ASTM. Данный комплекс стандартов является основой для использования ГМ при проектировании и строительстве конструкций автомобильных дорог.

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 надежность 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, «Функции и нормативно-технические требования к геосинтетическим материалам, методы контроля их качества», онлайн-вебинар «Безопасные и качественные автомобильные дороги», сентябрь 2020; «Основные аспекты технического регулирования, стандартизации и аккредитации в соответствии с

международным законодательством Евразийского экономического союза и национальным законодательством Российской Федерации», II Международная практическая семинар – конференция «Сибирские дороги», г. Иркутск, февраль 2020; «Основные требования и методы испытаний геосинтетических материалов для дорожного строительства», научно-практический семинар «Требования современных нормативных документов в условиях реализации технического регламента Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог», г. Сочи, сентябрь 2019; «Современные требования к геосинтетическим материалам и методам их испытаний», Москва, февраль 2018, Ассоциация производителей композиционных материалов Российского университета транспорта (МИИТ); «Геосинтетика в дорожном строительстве», Махconference, г. Москва, 19 мая 2017 года; 7-я международная специализированная выставка-форум «ДОРОГА ЭКСПО», г. Москва, октябрь 2016 года; научно-практической конференции «Актуальная проблемы проектирования и строительства автомобильных дорог и искусственных сооружения с применением геосинтетических материалов и спиральновитых металлических труб», г. Нижний-Новгород, сентябрь 2016 года; «Стандартизация и оценка соответствия геосинтетических материалов в сфере дорожного строительства», Межотраслевая конференция «Геосинтетические материалы в дорожном строительстве», Москва, май 2014 года; «Разработка нормативно-технической базы по геосинтетическим материалам», Международная конференция по техническому регулированию в Таможенном союзе, ноябрь 2011 года, Москва.

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 и 1 опубликована в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, по смежной научной специальности 2.1.5.

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, формулировка выводов и основных положений диссертационного исследования. Разработаны проекты национальных стандартов на технические требования и методики испытаний ГМ. 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, активно участвовал в планировании экспериментов, лабораторных

испытаниях и обработке результатов, а также 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 203 страницах, содержит 97 рисунков и 23 таблицы. Список литературы включает 181 наименование.

## ГЛАВА 1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

### 1.1 Классификация, структура и свойства геосинтетических материалов

Геосинтетические материалы представляют собой строительные изделия из синтетических компонентов, которые применяются в различных конструкциях при возведении автомобильных и железных дорог, аэродромов, а также в гражданском, промышленном и геотехническом строительстве. Идея использования природных материалов в строительстве, таких как тростник для укрепления дамб, известна с древних времен. Впервые синтетические материалы начали активно применять в строительстве в конце 1960-х годов для укрепления грунтовых конструкций, но впоследствии их применение значительно расширилось. В Российской Федерации и других странах активное использование геосинтетиков в дорожном строительстве началось в последней четверти XX века, что было обусловлено ускорением темпов строительства и необходимостью развития регионов с дефицитом традиционных строительных материалов.

Применение геосинтетических материалов в дорожных конструкциях наиболее оправдано в сложных климатических и грунтовых условиях. Повышение срока службы и надежности конструкции оказывается более важным в долгосрочной перспективе, чем краткосрочная экономия при строительстве дороги.

В области дорожного строительства широко применяются разнообразные геосинтетические материалы в зависимости от их классификации и специфики конструкций, в которых они используются. В настоящее время в строительстве активно используются геосинтетические материалы, изготовленные на основе полимерных волокон, включая полиэтилен, полипропилен, полиамид и полиэстер. Характеристики этих материалов, их область применения и эффективность могут значительно различаться в зависимости от исходного сырья и технологических процессов.

Дорожное строительство включает в себя различные этапы, начиная с проектирования и завершая эксплуатацией и капитальным ремонтом автомобильных дорог и дорожных сооружений. Эта отрасль была одной из первых в России, которая активно внедрила геосинтетические материалы в строительство в больших объемах, и этот тренд продолжает развиваться.

С момента начала использования геосинтетических материалов в строительстве, особенно в дорожной отрасли произошел значительный прогресс. Разработаны новые виды материалов и стандарты, регулирующие их качество и использование. Зарубежные подходы оказались более развитыми по сравнению с российскими. Ключевыми факторами, влияющими на эффективность

геосинтетиков, являются их механические, гидравлические и эксплуатационные свойства, а также устойчивость к воздействиям окружающей среды. Эти материалы значительно улучшают прочность и долговечность дорожных конструкций. Программа способствовала развитию «дорнита» и его активному применению в транспортной инфраструктуре, что положительно сказалось на качестве дорог и других объектов [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Первоначальные исследования касались геотехнических характеристик и водно-теплового режима дорожных конструкций, что стало основой для применения геосинтетиков (фильтров, армирующих и разделительных слоев) в дорожном строительстве. Внимание уделялось нетканым материалам, что определило направления их использования в дорожной инженерии [8, 9].

Исследования привели к созданию нового направления - дорожной геосинтетики. Основным принципом стало выявление проблемных зон в дорожных конструкциях для выбора соответствующих геосинтетиков, которые компенсируют нагрузки, улучшают дренаж и повышают долговечность дорог [10].

В 1977 году был разработан первый отечественный геотекстиль «Дорнит», который использовался при строительстве дорог в Западной Сибири, что ускорило их возведение и улучшило качество [11, 12].

Решения с применением геосинтетики учитывали взаимодействие между почвой и материалом, что стало основой для современных решений с использованием более прочных и жестких материалов, обертывание грунта геотекстилем [13, 14].

После завершения полевых и экспериментальных исследований их результаты были систематизированы и включены в нормативные документы, такие как [15, 16, 17, 18], что способствовало стандартизации и улучшению методов строительства с использованием геосинтетических материалов.

В конце 2000-х годов начали проводиться активные конференции, включая международные, на территории Российской Федерации, посвященные проблемам в дорожно-строительной отрасли. Одной из главных проблем была недостаточная объективность и неполноценность нормативно-технической базы, не обеспечивающей эффективное использование геосинтетических материалов и справедливую конкуренцию на строительном рынке страны.

Кроме того, к концу 2000-х годов, не только в дорожной отрасли, но и в Российской Федерации в целом, включая гражданское строительство, нефтегазовую промышленность и железнодорожное строительство, отсутствовала какая-либо классификация геосинтетических материалов [19].

Выбор технологии производства геосинтетических материалов зависит в первую очередь от свойств используемого сырья. Важным фактором при выборе технологии производства геосинтетики, также как и при выборе сырья, является его предполагаемая функция в дорожных конструкциях.

В Российской Федерации продукция классифицируется в соответствии с ОК 034-2014 (КПЕС 2008). ОКПД 2, общероссийский классификатор продукции по видам экономической деятельности, также является одним из ключевых признаков. Этот классификатор, например, помещает текстиль и текстильные изделия в 13 класс. Поэтому, изначально планировалось ввести классификацию геосинтетических материалов на основе используемого сырья, а затем расширить классификацию, учитывая технологию производства.

При изготовлении геосинтетических материалов для армирования нижних слоев основания дорожных одежд применяются три основных вида технологий производства: текстильные, пластических масс и композитных материалов [15, 19].

В современной отечественной и мировой практике производства геосинтетических материалов используется разнообразное сырье и различные добавки. В производственном процессе геосинтетические материалы пропитывают специальными растворами, которые могут обеспечивать необходимый уровень адгезии материала к слоям асфальтобетонного покрытия, а также защищать волокна от износа и повреждений во время укладки и эксплуатации в дорожных конструкциях. Для этих целей используются различные пропитки, такие как поливинилхлорид, полиэтилен, битумные эмульсии и другие [20, 21].

Важно отметить, что состав данных пропиток индивидуален для каждого производителя и зависит от нескольких факторов:

- области применения геосинтетического материала: в слоях асфальтобетонных покрытий может потребоваться пропитка на битумной основе для обеспечения лучшей адгезии, в то время как в дорожной одежде из дискретных материалов может использоваться пропитка на основе поливинилхлорида (ПВХ) для обеспечения дополнительной защиты волокон от внешних физических воздействий;

- возможности и оснащения технологического оборудования: наличие специальных ванн, камер для просушивания, мощности и производительности оборудования оказывают влияние на выбор определенного типа пропитки;

- стоимости пропитки: экономические аспекты также играют роль в выборе компонентов и технологий для пропитки геосинтетических материалов.

Дополнительно нужно обратить внимание на то, что информация о составе данных пропиток и их поставщике остается строго охраняемой коммерческой тайной, представляющей интерес для завода-изготовителя.

Давайте более подробно рассмотрим основные виды сырья, как химического, так и натурального происхождения, которые наиболее часто используются в дорожной отрасли.

Один из таких видов сырья - полиамиды, среди которых можно выделить такие виды, как капрон, нейлон и силон [22], свойства которых определяются высокой степенью кристалличности и наличием межмолекулярных водородных связей. Повышение степени кристалличности улучшает прочностные характеристики полиамида и уменьшает влагопоглощение. Процесс холодной вытяжки волокон или пленок полиамидов приводит к увеличению их длины на 400-600%. Этот процесс способствует ориентации макромолекул и увеличению механической прочности, особенно для ориентированных волокон или пленок [21].

Еще одним важным видом сырья является полипропилен. Полипропилен представляет собой пластический материал с выдающимися свойствами. Он отличается высокой прочностью при ударных нагрузках и многократных циклах изгиба, устойчивостью к износу, а также хорошими электроизоляционными качествами в широком температурном диапазоне. Полипропилен обладает значительной химической устойчивостью, низкой проницаемостью для паров и газов, и в тонкопленочной форме практически прозрачен. Он демонстрирует устойчивость к воздействию кислот, щелочей, растворов солей, а также минеральных и растительных масел при высоких температурах. При нормальных условиях полипропилен не растворяется в органических растворителях и растворяется только при повышенных температурах в агрессивных средах, таких как хлорированные и ароматические углеводороды. Важной особенностью полипропилена является его высокая технологичность, легкость переработки и способность хорошо смешиваться с пигментами. Полимер также легко кристаллизуется с максимальной степенью кристалличности до 75%. Полипропилен может сохранять свои характеристики до 140 °С. Однако материал подвержен воздействию света и кислорода, что может быть скорректировано применением стабилизаторов, таких как сажа. Тем не менее, полипропилен характеризуется невысокой морозостойкостью [22].

Полиэтилен, в свою очередь, является термопластичным полимером этилена. Этот органический материал преимущественно представлен массой белого цвета (тонкие листы полиэтилена прозрачны и бесцветны). Он обладает химической стойкостью и диэлектрическими свойствами, не является чувствительным к ударам (хороший амортизатор). При нагревании размягчается (80-120 °С), и его адгезия (способность прилипания) чрезвычайно низка. Однако полиэтилен подвержен фотостарению под воздействием солнечной радиации, особенно ультрафиолетовых лучей. Для увеличения его устойчивости к свету эффективно используют антиоксиданты, такие как ароматические амины, фенолы и фосфиты. В качестве светостабилизаторов часто применяют сажу и производные бензофенонов. Важно отметить, что



полиэтилен является почти безвредным материалом, и его использование не приводит к выделению в окружающую среду веществ, опасных для человека [21, 22, 23].

Полиэфирные волокна - это синтетические волокна, создаваемые из сложных полиэфиров. Преимуществом полиэфирных нитей перед другими волокнами является их высокая устойчивость к деформации при растяжении. Модуль упругости у полиэфирных нитей составляет величину от 12 до 16 кН/мм, что в два раза превышает аналогичный показатель у полиамидных нитей. Эта характеристика играет важную роль в технических областях применения полиэфира.

Полиэфирные материалы проявляют высокую скорость обратимой деформации при небольших быстрых нагрузках. В случае изгиба изделий из полиэфирного волокна в процессе эксплуатации они быстро восстанавливают свою первоначальную форму. Важно отметить, что полиэфирные волокна обладают низкой прочностью в поперечном направлении из-за их анизотропной структуры. Однако они не являются хрупкими, и высокие концентрации напряжений в поперечном направлении избегаются благодаря деформации волокон и переходу напряжений в усилие растяжения. Таким образом, прочность полиэфирных волокон в петле лишь немного ниже разрывной прочности.

Что касается усталостных характеристик, то полиэфирные нити немного уступают полиамидным. Однако повышение молекулярной массы или применение терморелаксации для готовых полиэфирных нитей значительно улучшает их усталостные свойства. Путем совмещенного процесса вытягивания и терморелаксации уровень сохранения прочности после многократных изгибов увеличивается с 69 % до 91 %, при этом модуль жесткости волокна снижается с 84 до 43 Н/мм<sup>2</sup>. Следует также отметить, что полиэфирное волокно является термопластичным материалом и его прочностные характеристики снижаются, а разрывное удлинение увеличивается с повышением температуры [24].

Полиэфирное волокно проявляет выдающуюся устойчивость к долговременному воздействию нефти и дизельного топлива. Благодаря тому, что полиэфир не служит питательной средой для бактерий, плесени, жучков и термитов, он обладает отличной устойчивостью к их воздействию. Некоторые виды грибков и бактерий, однако, могут развиваться на загрязнениях, которые могут появиться на поверхности изделий из полиэфира. В этом случае прочностные свойства материала остаются неизменными, но продукты жизнедеятельности грибков и бактерий могут повлиять на окраску и даже вызвать полное обесцвечивание материала.

Стекловолоконное (стекловолокно) - искусственное волокно, формирующееся из расплавленного неорганического стекла. Стекловолоконные волокна из безщелочного стекла могут быть неустойчивыми к действию кислот, так как они растворяют практически все компоненты стекла, за исключением оксида кремния. Прочность материала, получаемого из таких

стекловолокна, которые состоят в основном из кремнезема, невелика. Изделия из стекловолокна плохо работают при многократном изгибе и истирании, однако, применение лаков и смол для пропитки значительно повышает их стойкость к изгибу и истиранию. Склеивание волокон в нити увеличивает прочность на 20-25%, а пропитка лаками дает прирост в прочности в 80-100%. Стекловолокна не подвержены и не поддерживают горение. Высокая температура плавления стекловолокна позволяет их использование в условиях высоких температур. Стекловолокна характеризуются низким коэффициентом термического расширения и высокой теплопроводностью.

Базальт - это широко распространенная вулканическая порода, которая образуется при извержении базальтовых лав. Базальтовые волокна получают из базальтовых пород магматического происхождения. Это придает им высокую химическую стойкость в воздействии щелочей, кислот и химически активных сред. Они обладают долгой эксплуатацией под воздействием окружающей среды, влаги и морской воды, а также характеризуются негорючестью и высокой термической стойкостью. Прочность базальтовых непрерывных волокон на разрыв составляет от 2800 до 4800 МПа, при этом относительное удлинение при разрыве не превышает 5% [24].

Как видно из проведенного анализа информации по сырью, используемому для изготовления геосинтетических материалов и изделий, становится очевидной важность выбора конкретного полимера, что определяется его характеристиками и свойствами.

Важные физико-химические характеристики наиболее распространенных сырьевых компонентов для геосинтетических материалов, используемых при армировании нижних слоев дорожной одежды, представлены в таблице 1.1 [25, 26, 27].

Таблица 1.1 - Основные физико-химические свойства полипропилена, полиэтилена, полиэфира, стеклянных и базальтовых волокон

Характеристики	Полипропилен	Полиэтилен	Полиэфир	Базальтовое волокно	Стеклянные волокна
Термические:					
Температура применения, °С	От -70 до 120	От -70 до 80	От -60 до 90	От -260 до 600	От -60 до 460
Температура плавления, °С	160 - 170	110	230	1050	600
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	0,24	0,2 - 0,3	0,14	0,031 - 0,038	0,034 - 0,04
Физические:					
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	900 - 920	950	1360	2600 - 2800	2540 - 2600
Модуль упругости, Н/мм <sup>2</sup>	900	118 - 1250	12000 - 18000	9100 - 11000	5000 - 25000
Химическая устойчивость:					
Кислотостойкость	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Средняя
Щелочестойкость	Высокая	Высокая	Низкая	Высокая	Низкая

Анализ характеристик сырья, используемого в производстве геосинтетических материалов, выявил важность выбора классификационного признака с учетом технологических

особенностей изготовления. Также необходимо учесть, что химический состав сырья напрямую влияет на свойства конечного продукта. Несмотря на это, существующая классификация часто оказывается неприменимой для дорожных инженеров, которые не обладают специализированными знаниями в области текстильных и полимерных технологий. Инженеры могут затрудняться в идентификации различий геосинтетических материалов на основе стекловолокна, базальтового волокна или полиэфира. Помимо этого, за исключением экструдированных материалов, большинство геосинтетических материалов проходит обработку пропиткой. На сегодняшний день отсутствует единый метод испытания, который мог бы однозначно определить используемое сырье. Создание и размещение специализированной химической лаборатории на объекте строительства также не является целесообразным.

Следует также учесть, что второй классификационный признак, связанный с технологией изготовления геосинтетических материалов, является более перспективным. Материалы, произведенные по текстильной технологии, могут быть разделены на несколько основных классов, включая тканые материалы, трикотаж, вязаные георешетки, вязально-прошивные геотекстилы и нетканые материалы. Эта классификация более информативна и удовлетворяет потребности рынка, позволяя производителям создавать материалы на основе различных комбинаций полимеров, таких как полипропилен, полиэтилен и кевлар, и поощряя технический прогресс.

В соответствии с [28-39], тканые материалы представляют собой композицию нитей, которые пересекаются под прямым углом, образуя различные виды сетчатых структур. Они могут различаться по роду используемой пряжи, включая штапельное волокно, мультиволоконную пряжу, крученые нити, моноволоконные пряжи, узкие полоски, нарезанные из пленки и сращенные нити. Тканые материалы также классифицируются по виду переплетения пряжи, например, полотняное переплетение типа "рогожка" и каркасное переплетение. Количество нитей на единицу длины также может различаться и в случае необходимости места пересечения нитей дополнительно укрепляются.

Трикотаж - это общий термин, используемый для описания плоских изделий, состоящих из одной или нескольких систем петель, которые связаны вместе. Трикотажные материалы могут быть созданы либо петлеобразно, либо при помощи проходящих по прямой линии нитей, соединенных с другими системами нитей. Вязаные георешетки производятся из синтетических лент, которые пробиваются и растягиваются в одном или обоих направлениях. В процессе растяжения полимерные молекулы ориентируются в направлении растяжения, что увеличивает прочность в этом направлении и уменьшает удлинение.

Вязально-прошивные геотекстилы изготавливаются из полимерных волокон, скрепленных между собой филаментами. Этот метод производства более экономичен, но

обладает низкой прочностью. В случае разрыва нити, полотно теряет свою целостность и характеристики. При этом вязанный геотекстиль имеет высокую пористость и может использоваться в дренажных системах.

Нетканое полотно может быть подвергнуто термическому или химическому упрочнению и часто используется в качестве подложки в геокомпозитах.

Технология термоупрочнения предполагает фиксацию нитей и волокон при высоких температурах, что обеспечивает прочное соединение внутри геотекстиля. Этот метод значительно повышает прочность материала и снижает риск разрыва при использовании. Термоскрепленный или каландрированный геотекстиль имеет множество полезных свойств, но его способность пропускать воду и фильтровать её проявляется лишь в поперечном направлении. Это может привести к быстрой засоряемости пор и утрате фильтрационных свойств, когда материал заполняется грязью и илом. Термоскрепленный геотекстиль обладает высокой упругостью, прочностью и часто используется в качестве стабилизационного и разделительного слоя при строительстве дорожных покрытий, равномерно распределяя нагрузку.

Технология производства иглопробивного геотекстиля включает в себя прохождение специальных зазубренных игл через волокнистую основу, что позволяет быстро пропускать воду как в поперечном, так и в продольном направлении. Этот метод широко используется для создания дренажных и фильтрующих материалов, так как геотекстиль полученный этой технологией способен эффективно пропускать воду и предотвращать засорение.

Геосинтетические материалы, созданные путем обработки пластичных масс, делятся на две основные категории: экструзионные и вспененные материалы. Экструзионные материалы получают путем непрерывного преобразования термопластичного материала в виде гранул в готовое изделие, такое как георешетка.

Рассмотренная классическая классификация геосинтетических материалов, основанная на опыте легкой (текстильной промышленности), предназначена в первую очередь для технологов и производителей геосинтетических материалов. Эта система обеспечивает наличие выбора материалов на рынке, который позволяет изготовителям экономить средства и продавать продукцию по более выгодным ценам. На рынке, где потребители преимущественно оценивают товар по внешнему виду, различия в физико-механических свойствах обычно не так существенны.

Однако для потребителей, в том числе дорожных строителей, такая классификация не всегда удовлетворяет потребности. Важно иметь возможность решать конкретные задачи с минимальными расходами и максимальной эффективностью. Учитывая продолжительный срок службы автомобильных дорог, а именно 24 года до капитального ремонта, также требуется учет изменения характеристик материалов во времени.

В связи с вышеизложенным, существующая классификация геосинтетических материалов, основанная на типе сырья и способе их производства, не является оптимальной для дорожного строительства. Вместо этого предлагается использовать подход, основанный на функциональном назначении геосинтетических материалов. Данный подход облегчит выбор материалов специалистам в дорожном строительстве, включая проектировщиков и строителей, позволяя им сосредоточиться на эксплуатационных свойствах материалов, не углубляясь в особенности производственных технологий.

Предлагается рассматривать этот функциональный подход как ключевой критерий для классификации геосинтетических материалов, применяемых в дорожном строительстве.

Разработка новой системы классификации, включающей корректные термины и их определения, будет способствовать эффективному взаимодействию между всеми участниками отрасли: отечественными и зарубежными производителями геосинтетики, инженерами-проектировщиками, строителями, а также контролирующими органами. Дополнительно, данная классификация упростит работу таможенных органов, позволяя более точно определять область применения и идентификацию ввозимых материалов, что будет способствовать развитию внешнеэкономической деятельности и становлению международного рынка.

Давайте рассмотрим основные функции, которые выполняют геосинтетические материалы [40].

Армирование – это процесс укрепления дорожных конструкций для улучшения их механических характеристик (представлено на рисунке 1.1). Геосинтетический материал перераспределяет входящую нагрузку по своей поверхности, снижая нагрузку, передаваемую на нижележащие слои. Для эффективного выполнения этой функции требуются материалы с высокими прочностными характеристиками, превосходящими прочность слоев, которые они армируют. При этом эти характеристики должны поддерживаться при минимальных деформациях.

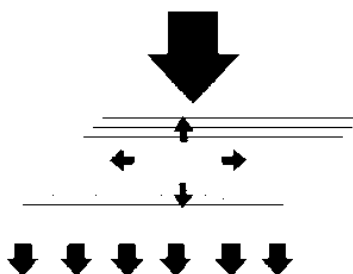


Рисунок 1.1 - Схематичное изображение функции армирования [40]

Разделение – это процесс, направленный на предотвращение взаимной проницаемости частиц материалов, находящихся в соседних слоях дорожных конструкций (представлено на рисунке 1.2). Этот процесс обеспечивает целостность и предотвращает взаимное перемешивание

материалов в дискретных слоях, гарантируя, таким образом, правильное функционирование в соответствии с задачами, установленными проектировщиком. Для эффективного выполнения этой функции необходимы материалы, которые хорошо деформируются, обеспечивая плотное прилегание к поверхности нижележащего слоя, и при этом устойчивы к разрушительным воздействиям верхнего слоя.

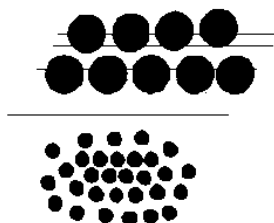


Рисунок 1.2 - Схематичное изображение функции разделения [40]

Борьба с эрозией на поверхности откоса - представляет собой процесс, направленный на недопущение скатывания и сползания грунта с поверхности откоса (представлено на рисунке 1.3). Геосинтетический материал служит барьером, который помогает сохранить целостность поверхности, предотвращая её разрушение под воздействием осадков и ветра. Для успешного выполнения данной функции используются материалы, способные замедлять скорость потока воды или воздушных масс, при этом они остаются проницаемыми, обеспечивая условия для роста растительности на поверхности откоса.



Рисунок 1.3 - Схематичное изображение функции борьбы с эрозией на откосах [40]

Фильтрация - представляет собой процесс пропускания жидкости через структуру материала, одновременно задерживая грунтовые частицы (представлено на рисунке 1.4). Эта функция направлена на поддержание целостности водоотводящего слоя. Для успешного выполнения данной задачи используются материалы, которые способны пропускать воду, при этом устойчивые к забиванию частицами из конструктивного слоя, что предотвращает кольматацию.

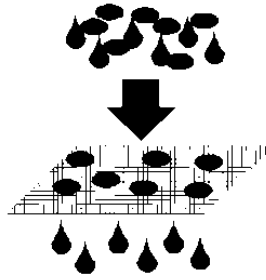


Рисунок 1.4 - Схематичное изображение функции фильтрации [40]

Дренирование представляет собой процесс сбора и переноса осадков, грунтовой воды и других жидкостей внутри материала (представлено на рисунке 1.5). Эта функция обеспечивает эффективное удаление воды из дорожных конструкций, способствуя, в частности, ускоренной консолидации насыпей. Для выполнения данной задачи используются материалы, которые способны отводить воду, как по своей поверхности, так и внутри своего объема.



Рисунок 1.5 - Схематичное изображение функции дренирования [40]

- гидроизоляция – предотвращение или ограничение прохождения жидкостей через материал (представлено на рисунке 1.6).

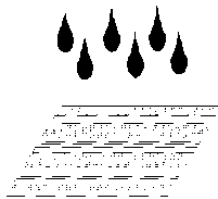


Рисунок 1.6 - Схематичное изображение функции гидроизоляции [40]

В дополнение к функциям, упомянутым выше, необходимо отметить, что геосинтетические материалы в разной степени выполняют функцию разделения.

Важно отметить, что при армировании асфальтобетонных слоев дорожной одежды, геосинтетический материал должен обладать повышенной температурной устойчивостью, чтобы не терять свои свойства при укладке асфальтобетонной смеси. Он также должен обеспечивать сравнимый уровень сцепления между смежными слоями асфальтобетона, сопоставимый со сцеплением без геосинтетического материала.

В дополнение к указанным характеристикам свойств геосинтетических материалов, в зависимости от их функции и области применения, необходимо учитывать воздействия, с которыми они могут столкнуться в процессе укладки и эксплуатации в составе дорожной конструкции. Эти воздействия включают в себя:

- частые перепады температуры, включая температуры выше и ниже нуля градусов Цельсия,
- воздействие солнечной радиации и ультрафиолетового излучения, которое может вызвать деградацию свойств материала со временем,
- химическое воздействие в зависимости от окружающей среды, в которой эксплуатируется материал. Это может включать в себя воздействие кислот или щелочей,
- биологическое воздействие, связанное с бактериями и микроорганизмами, которые могут находиться в грунтах и минеральных материалах, с которыми материал контактирует.

С учетом всех этих факторов, выбор и разработка геосинтетических материалов становится сложной задачей, которая требует учета разнообразных условий эксплуатации и функциональных требований, но при этом позволяет определять именно те свойства, которые влияют на долговечность материала в конкретной области применения, а, следовательно, и всей конструкции автомобильной дороги с их применением.

## 1.2 Анализ отечественного и зарубежного опыта применения геосинтетических материалов

На сегодняшний день применение геосинтетических материалов в дорожном строительстве стало обычной практикой. О действии этих материалов знают уже не только специалисты, но и широкая общественность. Однако 10-15 лет назад их использование было менее распространено и востребовано, хотя они применялись при строительстве и ремонте автодорог.

Давайте рассмотрим ведущих зарубежных производителей геосинтетических материалов, которые являются пионерами в их использовании в дорожном строительстве и предлагают разнообразные решения:

- Tygar (DuPont de Nemours, Inc., Великобритания) - производит нетканый полипропиленовый термоскрепленный материал, предназначенный для различных задач. Он широко используется в качестве фильтрующей и разделительной прослойки. Материал доступен в нескольких вариантах с различной плотностью, прочностью и водопроницаемостью,

- Polyfelt TS (Polyfelt Ges. m.b.H., Австрия) - это еще один нетканый полипропиленовый геотекстиль, обладающий стабильными прочностными и водопротекными характеристиками при эксплуатации в различных климатических условиях,



- Megadrain® (Polyfelt Ges. m.b.H., Австрия) и Enkadrain® (Colbond Geosynthetics) - представляют собой легкие, прочные и гибкие трехмерные рулонные композиты типа «сэндвич». Эти материалы широко используются при строительстве ограждений котлованов и систем дренажа. Они эффективно разделяют слои конструкции, распределяют нагрузку и обеспечивают высокую пропускную способность,

- TENSAR (Англия, США) и TENAX (Италия) производят экструзионные георешетки из полипропилена и полиэтилена для разных целей в транспортном строительстве, включая разделение, армирование и дренирование,

- Colbond представляет серии георешеток и композитов, которые также нашли применение в транспортном и городском строительстве,

- HUESKER Synthetic GmbH & Co (Германия) специализируется на георешетках для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды и высокопрочных тканях для армирования нижних слоев дорожной одежды на слабых основаниях.

Важно отметить, что на рынке Российской Федерации далеко не все эти производители представлены. Тем не менее, доступность таких материалов продолжает расти, и они играют важную роль в усовершенствовании дорожной инфраструктуры.

Вплоть до 1990-х годов в Российской Федерации существовало производство нетканого материала «Дорнит», получаемого из отходов текстильной промышленности. Этот материал существовал в трех вариантах с разной прочностью и широко применялся в инфраструктурных проектах. «Дорнит» использовался для усиления дорожных конструкций, разделения слоев дорожной одежды, укрепления откосов и организации дренажа. Следует отметить, что в дренажных системах, где «Дорнит» применялся как иглопробивной материал, быстро накапливались мелкие грунтовые частицы из-за плотной структуры материала [11].

Сегодня геосинтетические материалы широко используются в дорожном строительстве. Производители геосинтетических материалов предоставляют разнообразные решения для обновления и укрепления транспортной инфраструктуры. Согласно информации, представленной на официальных веб-сайтах таких компаний, как Фирма "HUESKER Synthetic GmbH & Co" (Германия), геосинтетические материалы активно используются в области транспортного строительства [41]:

- ремонт скоростной автомагистрали S37 Клагенфурт-на-Майне: Задача заключалась в проведении экономичного ремонта, обеспечивающего долгосрочное отсутствие трещин. Для этой цели была использована георешетка NaTelit с нетканой подложкой, что обеспечило надежное сцепление материала со слоями асфальтобетона. Над георешеткой был уложен асфальтобетонный слой толщиной 4 см (SMA 11),

- ремонт автомагистрали S 16 в Австрии: Этот проект включал применение аналогичной армирующей георешетки, но с двумя слоями - 5 см (AC 22) и 4 см (SMA 11),

- реконструкция "Корсо Джованни Аньелли" (Город Турин, Италия): здесь было проведено сравнение традиционной технологии и применения георешетки. Эффективность геосинтетики была продемонстрирована путем улучшения асфальтобетонного покрытия. Проект включал выравнивающий слой на бетонных плитах, геосинтетический материал и верхний слой асфальтобетона. Сравнительный анализ показал значительные преимущества использования геосинтетики.

Производитель HUESKER Synthetic GmbH & Co утверждает, что многочисленные исследования и многолетний практический опыт подтверждают возможность увеличения межремонтных сроков в несколько раз благодаря использованию армирующей георешетки. Это также приводит к экономии средств на обслуживание автомобильных дорог, делая армирующие георешетки технически обоснованным и экономически выгодным решением.

Компания DuPont de Nemours, Inc. также предоставляет материалы, такие как "Tyrag® SF", разработанные специально для борьбы с колеиностью на временных дорогах, лесных дорогах, автомагистралях, аэропортах и других типах транспортной инфраструктуры [42]. Эти продукты также используются для борьбы с эрозией на откосах и улучшения долговечности покрытий.

Машина-ТСТ, белорусская компания, специализирующаяся на производстве тканых материалов, представляет разнообразные решения в области транспортного строительства [43]. Её продукция нашла применение в ряде проектов по всему миру:

- ремонт шоссе 163 - Дахран-Эль-Джубайль (Саудовская Аравия): Для ремонта этой дороги применялся геосинтетический материал DUALTEX PET 50/50 в качестве трещинопрерывающей прослойки между выравнивающим и верхним слоем асфальтобетона, с толщиной 5-6 см,

- капитальный ремонт автодороги «Талдыкорган-Калбатау-Усть-Каменогорск» (Республика Казахстан): здесь геосинтетический материал DUALTEX PET 50/50 использовался в качестве трещинопрерывающей прослойки перед устройством укрепленного основания для двухслойного асфальтобетонного покрытия. Это позволило повысить техническую категорию автодороги с третьей на первую и вторую, а также расширить проезжую часть,

- реконструкция участка дороги Р-122 (Могилевская область, Республика Беларусь): Здесь применялись геосинтетические материалы STRADDEX PET и ASPHALTEX BASSALT с целью увеличения устойчивости дорожного покрытия к внешним нагрузкам,

- строительство и реконструкция автомобильной дороги М-4 «Дон» (Воронежская область): Применение материала STABBUDTEX 600/50, как высокопрочного тканого геополотна, позволило возвести 12-метровую насыпь на участках с неустойчивыми грунтами.

Машина-ТСТ с помощью своих инновационных тканых материалов вносит весомый вклад в улучшение инфраструктуры и долговечность дорожных покрытий. Проекты, в которых использовались их продукты, подчеркивают не только применение современных материалов в транспортном строительстве, но и их значительный вклад в повышение эффективности и надежности инфраструктурных проектов.

В сфере транспортного строительства группа компаний «Рускомполит», базирующаяся в России, занимается производством геосинтетических материалов, включая георешетки из стекловолокна, базальтового волокна и полиэфира, а также геосотовые материалы и геоматы, предназначенные для борьбы с эрозией на откосах [44]. Их инновационные продукты нашли применение в нескольких интересных проектах:

- обустройство Западно-Асомкинского Месторождения, Ханты-Мансийский Автономный Округ, Куст скважин №39: Георешетки ПС ПОЛИСЕТ использовались с целью снижения взаимопроникновения материалов дорожной одежды и земляного полотна, а также для уменьшения мощности отсыпаемого слоя, что способствовало экономии дискретных материалов,

- армирование асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги Вахрушево на участке Долгодеревенское-Сагаусты. Здесь применялась георешетка ССНП 100/100-25 ХАЙВЕЙ, что способствовало улучшению прочности и долговечности дорожного покрытия.

Группа компаний «Миакон», также располагающаяся в России, специализируется как на тканых геосинтетических материалах, так и на полимерных материалах, получаемых методом экструзии. На их официальном сайте представлена информация о нескольких объектах, где использовались их материалы в сфере дорожного строительства [45]:

- армогрунтовая подпорная стенка на участке ПК 6714+20 – ПК 6717+11.92 СПАД Москва-Санкт-Петербург М-11 «Нева»: В данном проекте применялась георешетка "Армостаб Асфальт 100/100" для укрепления дорожного полотна и снижения риска колеобразования,

- ремонт автомобильной дороги улицы имени Г.В. Плеханова, г. Липецк: Здесь георешетка "Армостаб Асфальт 100/100" использовалась с целью укрепления дорожного покрытия и защиты от образования трещин,

- строительство КАД СПб, развязка КАД с Пулковским шоссе: Двухосная георешетка "ГЕО ДС® 30/30" применялась для обеспечения устойчивости и долговечности дорожных конструкций,

- защита от ветровой и гидро-эрозии откосов насыпей кольцевой автомобильной дороги вокруг Санкт-Петербурга: В данном проекте использовались геосотовый материал "ГЕО ОР® 30/10" и геотекстиль "МИАКОМ Т 150" с целью предотвращения эрозии и повышения устойчивости откосов,

- армирование верхнего слоя асфальтобетона, защита от образования отраженных трещин при реконструкции дорожного покрытия по проспекту Мира в г. Новгород: В этом проекте использовалась георешетка с подложкой "Аэростаб" для повышения прочности и долговечности дорожного покрытия.

Компания РГК специализируется в производстве высококачественных геосинтетических материалов из полипропилена и полиэтилена. На их официальном веб-сайте [46], представленном в сети Интернет, предоставлена информация о нескольких интересных проектах, где успешно использовались продукты этой компании:

- строительство третьего пускового комплекса Центральной автомобильной дороги (трасса А113, Никольское, Дмитровский район Московской области): Для укрепления дорожного полотна применялась двуслойная георешетка РГК СД-45, что способствовало увеличению прочности и долговечности дороги,

- капитальный ремонт трассы Калининград-Полесск (участок с 23 по 45 км): Здесь использовалась георешетка двуслойная РГК СД-40 для повышения стойкости дорожного покрытия,

- строительство Центральной кольцевой автомобильной дороги в Московской области, д. Назарово, Пушкинский район: Для различных целей, включая армирование нижних слоев дорожной одежды, использовались разные виды георешеток, такие как одноосные георешетки РГК-120, РГК-160 и РГК-90.

Компания "Славрос-Геосинтетические материалы," также базирующаяся в России, является одним из ведущих производителей нетканых материалов, которые используются для разделения нижних слоев дорожной одежды из дискретных материалов. Их официальный сайт [47] предоставляет информацию о нескольких проектах в сфере транспортной инфраструктуры:

- строительство 2-ой очереди Восточного обхода г. Липецка: В этом проекте для укрепления дорожного полотна использовался нетканый геотекстиль «Славрос ПП-МСУ»,

- реконструкция трассы М-1 «Беларусь» (участок 45-66 км): Здесь широко применялся нетканый геотекстиль «Славрос ПП-МСУ» с целью улучшения дорожной инфраструктуры,

- участок 401-418 км Крым Москва-Тула-Орел-Белгород-граница с Украиной: В этом проекте использовался геосотовый материал "Славрос ГР-Т" для различных целей.

Анализ информации о применении геосинтетических материалов от различных производителей свидетельствует о широком спектре их функциональных возможностей в транспортном строительстве, включая армирование, разделение материалов, борьбу с эрозией и

др. Эти проекты отражают важность применения геосинтетических материалов для улучшения инфраструктуры транспортных сетей.

Одновременно с этим, рассмотрим информацию, размещенную на официальном сайте Федерального дорожного агентства [48]. Федеральное дорожное агентство (далее «Росавтодор») имеет право, как федеральный орган исполнительной власти, согласовывать стандарты организаций на продукцию, требования к которой не определены на национальном уровне или превышают требования документов национальной системы стандартизации. Процедура согласования установлена в [49].

Согласование осуществляется в первый раз на один год, а в следующий - на три. Как правило, при поставке геосинтетических материалов на объект строительства федерального назначения, производитель представляет комплект документов, в том числе, содержащий письмо согласования стандарта организации. В связи с этим для оценки областей применения геосинтетических материалов на федеральных автомобильных дорогах Российской Федерации можно в том числе отталкиваться от согласованных стандартов организации.

На рисунках 1.7. и 1.8 приведены диаграммы, на которых отображено распределение видов сырья и выполняемых функций по СТО, согласованным в «Росавтодоре». Всего согласовано на конец 2022 года 39 стандартов организаций, устанавливающих требования к геосинтетическим материалам.

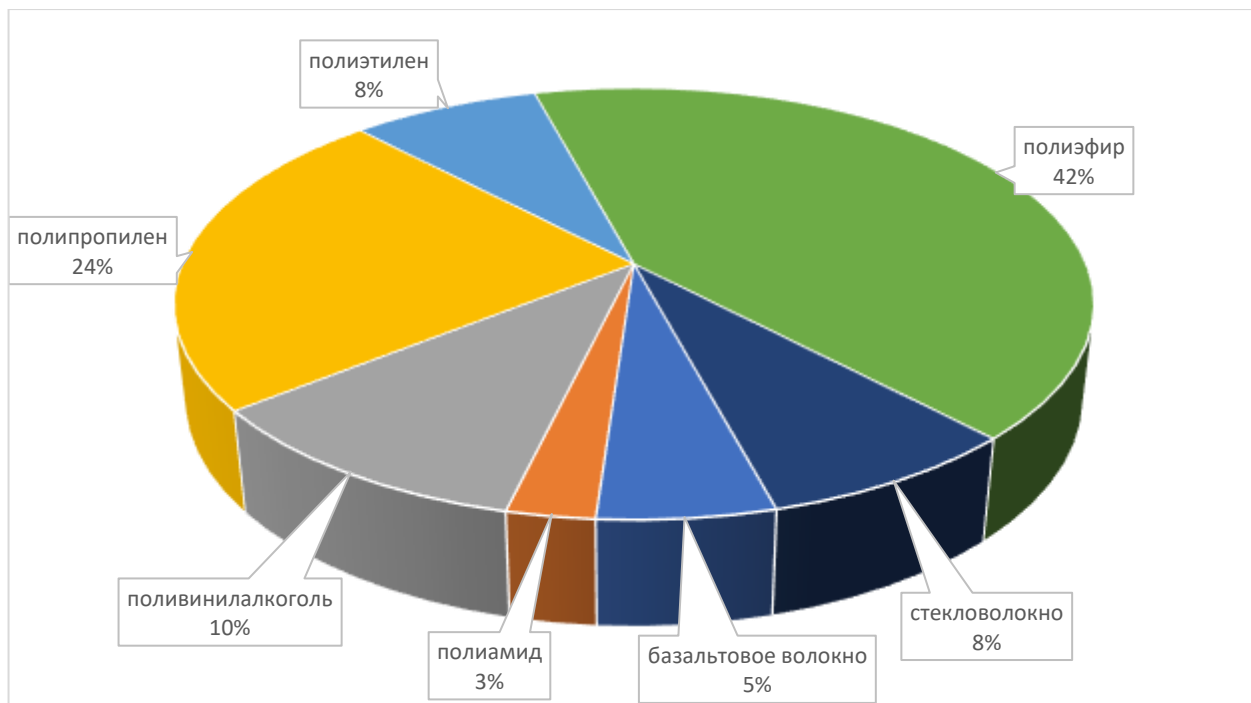


Рисунок 1.7 – Данные по согласованным СТО на ГМ «Росавтодором»

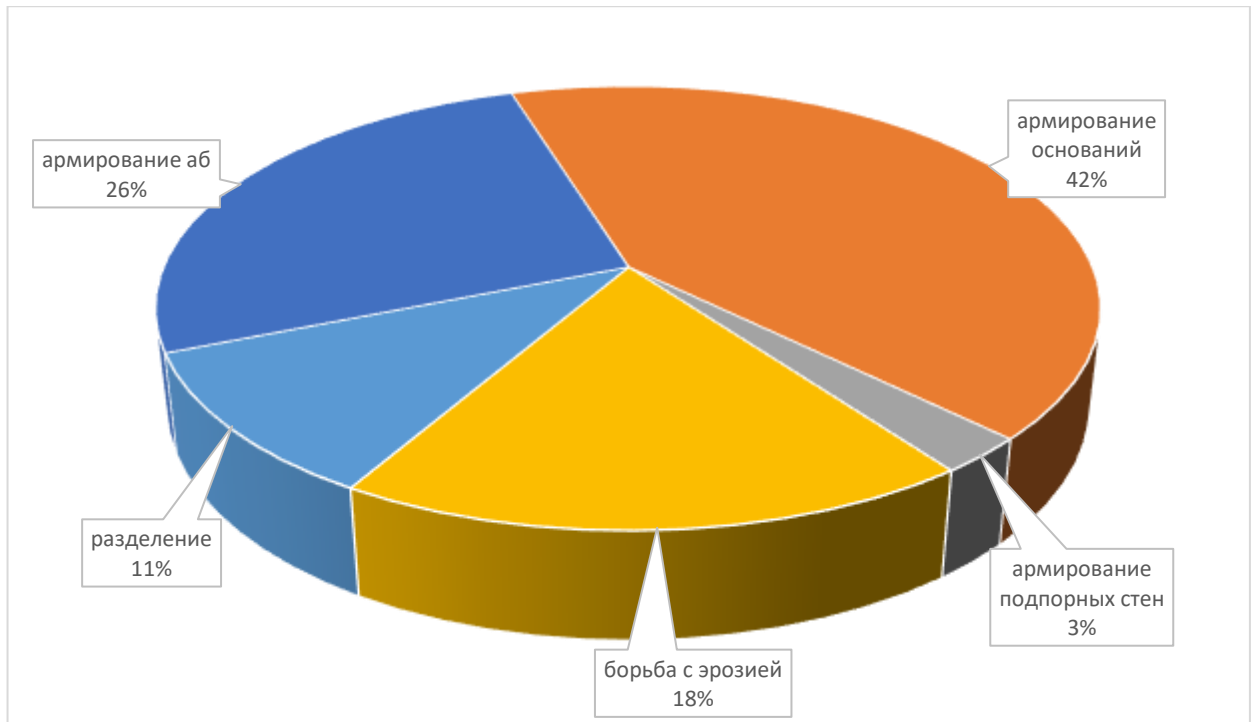


Рисунок 1.8 - Виды выполняемых функций геосинтетическими материалами по согласованным СТО «Росавтодором»

Альтернативным способом оценки применяемых в Российской Федерации геосинтетических материалов является анализ информации об испытаниях геосинтетических материалов на долговечность в независимой лаборатории – АНО «НИИ ТСК». Соответствующая информация приведена на рисунках 1.9 и 1.10 на основе 165 испытанных материалов.

Из приведенных выше диаграмм следует, что основными функциями, которые выполняют геосинтетические материалы в дорожном строительстве, являются:

- армирование асфальтобетонных слоёв дорожных одежд;
- армирование нижних слоёв основания дорожных одежд;
- борьба с эрозией на откосах;
- разделение слоёв дорожной одежды из минеральных материалов.

Главная цель использования геосинтетических материалов (ГМ) состоит в обеспечении надежной работоспособности автомобильных дорог или их элементов в условиях, которые могут быть сложными как при строительстве, так и во время эксплуатации. В дополнение к этому, применение ГМ может предоставлять технические и экономические преимущества [50].

В процессе эксплуатации автодорог возникает износ, который вызван воздействием как внутренних, так и внешних факторов на асфальтобетонные покрытия (нагрузки и их количество, температура, влага и тд.). Следствием воздействия данных факторов является образование трещин, выбоин, просадок, проломов и колеиности.

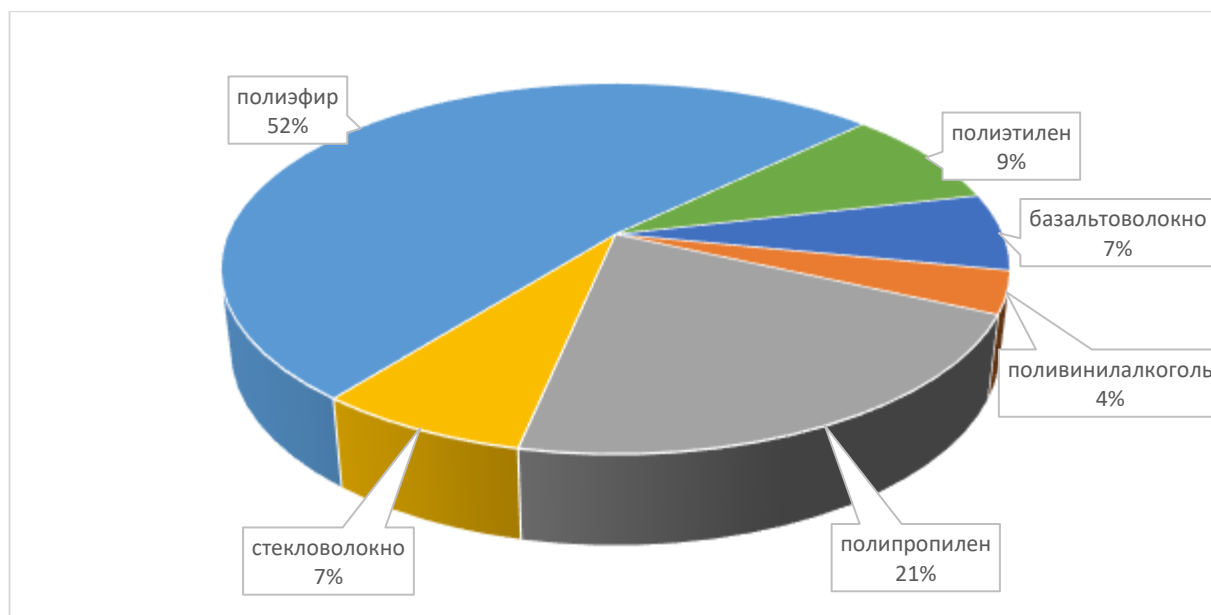


Рисунок 1.9 - Данные по применяемому сырью у испытанных материалов на долговечность в АНО «НИИ ТСК» с 2017 года

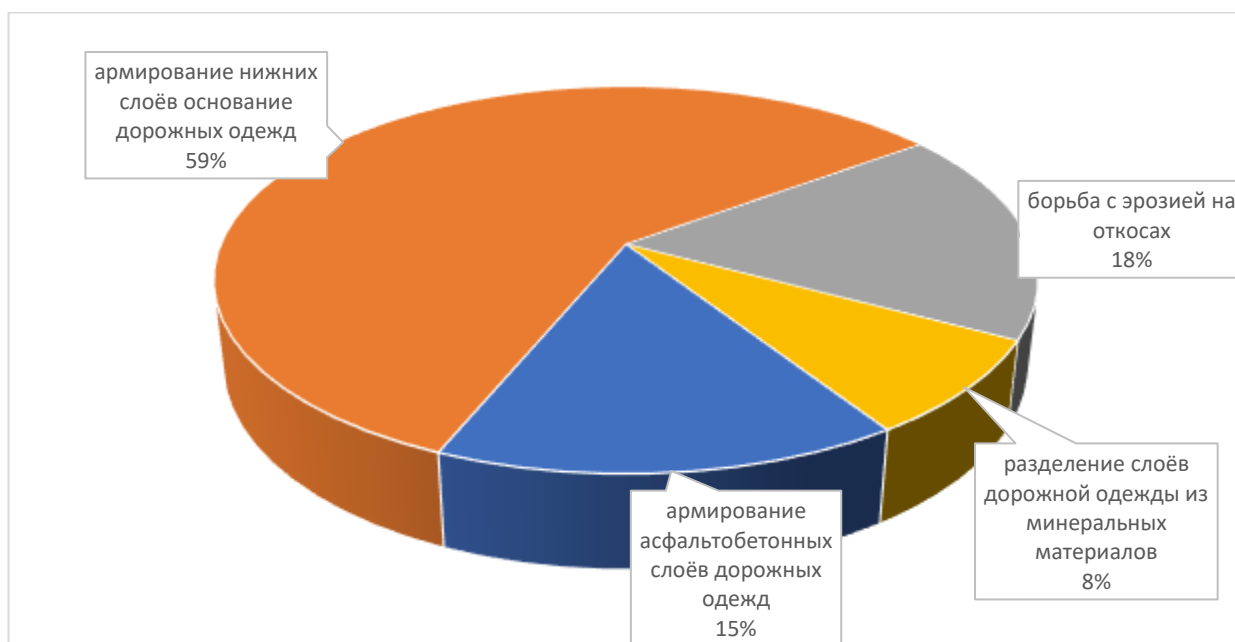


Рисунок 1.10 - Данные по выполняемым функциям испытанными материалами на долговечность в АНО "НИИ ТСК" с 2017 года

Трещины представляют собой один из наиболее распространенных дефектов асфальтобетонного дорожного покрытия, которые возникают в результате хрупкого разрушения асфальтобетонного или цементобетонного слоя и проявляются в виде нарушения целостности дорожного покрытия.



Рисунок 1.11 - Трещина на асфальтобетонном покрытии

Согласно исследованиям [51, 52, 53], характер трещин в дорожном покрытии определяется их расположением относительно оси дороги. Они могут быть классифицированы как поперечные, продольные либо криволинейные (косые). Сеточная структура трещин представляет собой пересекающиеся поперечные, продольные и криволинейные трещины, которые разделяют ранее монолитную поверхность на отдельные сегменты.

Основные причины возникновения трещин в дорожных покрытиях связываются с воздействием автотранспорта и неблагоприятными погодными условиями. Под влиянием нагрузки от колес автомобилей и температурных изменений (особенно при одновременном их воздействии) в слоях дорожной одежды возникают растягивающие и изгибающие напряжения. Когда эти напряжения превышают предел прочности материала на растяжение, начинается формирование трещин. Этот процесс стартует с микротрещин, которые впоследствии могут перерасти в макротрещины.

Трещины подразделяются на несколько типов в зависимости от причин их возникновения:

- температурные трещины: возникают из-за колебаний температурного режима на поверхности покрытия,
- усталостные трещины: образуются в нижних слоях покрытия в области полос наката в результате многократных нагрузок и усталостного разрушения материала,
- отражённые трещины: формируются вследствие переноса существующих дефектов в старом покрытии на новый слой асфальтобетона.

Наличие трещин в дорожном покрытии значительно снижает прочностные характеристики и срок эксплуатации автодороги по следующим причинам:



- трещины нарушают целостность покрытия, делая его более уязвимым к передаче нагрузки на ослабленные участки, что увеличивает напряжения и деформации на меньших площадях,

- вода, проникающая через трещины в нижележащие слои, снижает прочность и несущую способность всей дорожной конструкции,

- при проезде колес транспорта по краям трещин происходит разрушение отдельных участков покрытия, стенки трещин смещаются друг относительно друга в вертикальной плоскости, что со временем приводит к образованию выбоин.

Если своевременно не устранить трещину, она неизбежно превратится в выбоину, представляющую собой локальное повреждение покрытия в виде углубления с четко выраженными границами, как показано на рисунке 1.12. Также к выбоинам относят просадки, проломы, зоны интенсивного износа материала и крупные трещины.

Как было отмечено ранее, одной из ключевых причин появления выбоин на дорожном покрытии является образование как отдельных трещин, так и трещинной сети. Еще одним значимым фактором, способствующим появлению выбоин, является наличие неровностей дорожного покрытия, таких как сдвиги, выпячивания и другие дефекты. Эти неровности могут возникать не только в процессе эксплуатации дороги, но и на этапе её строительства, особенно при нарушении технологических требований при укладке асфальтобетонной смеси. Проезд автомобильного колеса через выступы неровностей вызывает динамический удар на покрытие, и многократное воздействие таких ударов приводит к деградации структуры материала. В результате этого могут образовываться и развиваться трещины и мелкие выбоины, которые со временем могут сливаться в более крупные дефекты.



Рисунок 1.12 - Выбоины на асфальтобетонном покрытии

Кроме того, образование выбоин может происходить в тех местах дорожного покрытия, где наблюдается отслоение и выкрашивание каменного материала из слоя асфальтобетона.

Стоит также подчеркнуть, что одним из часто встречающихся дефектов асфальтобетонного покрытия является колейность — это постепенное искажение поперечного профиля автодороги, локализованное вдоль полос движения (пример показан на рисунке 1.13).



Рисунок 1.13 - Колея на асфальтобетонном покрытии

Возникновение колеи на дорожных покрытиях связано с рядом факторов, среди которых:

- недостаточное уплотнение отдельных слоев дорожной одежды,
- износ покрытия под действием автомобильных колес, особенно при использовании шин с шипами,
- накопление остаточных пластических деформаций в материалах покрытия,
- структурное разрушение материала дорожного слоя,
- неравномерные остаточные деформации в грунтовом основании.

Недостаточное уплотнение слоев дорожной одежды в процессе строительства может стать причиной колееобразования. Если слои не были достаточно плотно уплотнены при укладке, дальнейшее уплотнение происходит под нагрузкой проезжающих автомобилей. По оценкам, от 5% до 10% случаев образования колеи можно объяснить недостаточной плотностью уплотнения слоев.

Износ асфальтового покрытия под воздействием автомобильных колес — еще один значительный фактор, приводящий к появлению колеи. Применение шипованных шин, особенно в теплое время года, может существенно ускорить этот процесс. При высокой интенсивности движения износ покрытия может стать ведущей причиной образования колеи.

Пластическая деформация материала покрытия также способствует колееобразованию. Под воздействием автомобильных нагрузок и изменяющейся вязкости битума при

температурных колебаниях, материал приобретает пластичность, что ведет к накоплению вертикальных и горизонтальных деформаций и, соответственно, к образованию колеи. Этот процесс наиболее интенсивен при температуре воздуха выше 30°C и температуре дорожного покрытия выше 40°C.

Одним из важных факторов, вызывающих колеи, является структурное разрушение асфальтобетона. Под воздействием многократных нагрузок могут возникнуть условия, при которых вертикальные и горизонтальные напряжения превышают допустимые пределы, что ведет к разрушению структуры асфальта, снижению его прочностных характеристик и сопротивления к сдвигу. По результатам исследований, структурные разрушения отвечают за 35% случаев образования колеи.

Неравномерная деформация грунта под дорожным покрытием является причиной образования колеи в 30% случаев, причем эта проблема наиболее актуальна весной. Повышенная влажность грунта при недостаточном дренаже значительно ускоряет процесс пластических деформаций.

Для повышения прочности асфальтобетонных покрытий и увеличения их эксплуатационного срока разработаны различные способы борьбы с дефектами, среди которых:

- добавление полимерных компонентов в асфальтобетонные смеси для повышения термостойкости в жаркий период,
- введение добавок, улучшающих сцепление и стойкость к воде и низким температурам,
- использование армирующих геосинтетических материалов для укрепления покрытия.

Исследования, выполненные специалистами «БелдорНИИ», показали, что армирование асфальтобетона геосинтетическими материалами увеличивает прочность на растяжение и стойкость к образованию колеи.

Экспериментальные данные из Белорусского национального технического университета показывают, что армирование асфальтобетонных слоев георешетками специального назначения увеличивает устойчивость к пластическим деформациям и позволяет бороться с отраженными трещинами.

Армирующие слои из геосинтетического материала – важная часть дорожного покрытия, которая помогает увеличить его прочность, поглощая и распределяя напряжения от транспортных средств и температурных деформаций.

### 1.3 Предпосылки для повышения эффективности применения геосинтетических материалов

При развитии строительной отрасли в России, включая гражданское, промышленное, гидротехническое и транспортное строительство, возникает потребность в использовании новых строительных материалов, в том числе геосинтетических. Однако этот процесс осложнен из-за

отсутствия их классификации в зависимости от их предполагаемого применения. Эта неопределенность также мешает разработке технических стандартов и методов испытания для данных материалов.

Для разработки технических стандартов и методов испытания следует использовать имеющиеся нормативные документы, действующие в Российской Федерации. Также полезными могут быть зарубежные стандарты и публикации, научные исследования, касающиеся классификации и свойств геосинтетических материалов, а также информация, предоставленная производителями и другими организациями в этой области.

До начала 2000-х годов в России существовали девять национальных стандартов, касающихся геосинтетических материалов. Эти стандарты служили важным ресурсом для строительной индустрии и исследовательского сообщества в данной области [54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62].

Следует отметить, что отсутствовали стандарты, применимые к отечественному дорожному строительству. В то же время, анализ опыта других стран показывает, что внимание к нормативной базе по применению геосинтетических материалов в строительстве высокое. Например, разработкой и утверждением стандартов для геосинтетических материалов занимаются следующие международные организации:

- Технический комитет международной организации по стандартизации ISO/TC 38 (секретариат в Женеве, Швейцария);
- Европейский технический комитет CEN/TC 189 (секретариат в Брюсселе, Бельгия);
- Международное геосинтетическое сообщество (секретариат в штате Южная Каролина, США).

Отсутствие такого подхода в практике отечественного дорожного строительства приводит к серьезным проблемам при выборе геосинтетических материалов, так как оно сильно зависит от субъективных факторов, а не обоснованных технических решений.

В России в отличие от других материалов, геосинтетические материалы практически не подвергались лабораторной проверке на соответствие параметрам, установленным в проектной документации, в рамках строительного комплекса. Обычно паспорт материала служит единственным доказательством его качества. Учитывая наличие множества посредников по поставке геосинтетических материалов, работающих с разными производителями, следует отметить, что такая ситуация может привести к серьезным негативным последствиям. Отсутствие единой системы документации лишь усиливает субъективный характер данной ситуации.

Основной причиной такого положения является недостаточная развитость лабораторной базы для проведения испытаний геосинтетических материалов. На данный момент в дорожной

отрасли существует лишь небольшое количество специализированных лабораторий, способных проводить оценку эксплуатационных характеристик геосинтетических материалов.

Применение геосинтетических материалов в конструкциях автомобильных дорог и дорожных сооружений представляет собой важное направление в современном дорожном строительстве, позволяющее решать широкий круг задач, включая повышение эксплуатационных характеристик, надежности и долговечности дорожных покрытий. Значительное расширение масштабов использования геосинтетических материалов в начале XXI века обусловило необходимость разработки нормативных документов, регламентирующих технические требования и методы испытаний данных материалов, предназначенных для дорожной отрасли. В период с 2008 по 2010 годы были разработаны и внедрены отраслевые дорожные методические документы (ОДМ), содержащие рекомендации по использованию геосинтетических материалов при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте и эксплуатации автомобильных дорог и дорожных сооружений, такие как [63] и [64].

Несмотря на внедрение данных ОДМ, отсутствие единых требований и методов испытаний для геосинтетических материалов, применяемых в дорожном строительстве, создавало определённые препятствия для их массового применения. В связи с этим, по поручению Федерального дорожного агентства была инициирована разработка комплекса нормативных документов, включающего отраслевые дорожные методические документы, предварительные национальные стандарты (ПНСТ) и национальные стандарты (ГОСТ Р). Целью этих разработок стало создание единой нормативной базы для обеспечения надёжности и качества геосинтетических материалов, используемых в дорожном строительстве для решения следующих задач:

- обеспечение унифицированной классификации и областей применения геосинтетических материалов в дорожной отрасли;
- разработка стандартов на технические требования к геосинтетике, исходя из их возможной области применения;
- разработка стандартов на методики (методы) испытаний, позволяющих объективно оценивать нормируемые технические характеристики.

Кроме того, в том же году был введён в действие документ [65], который сыграл важную роль в регламентации применения геосинтетических материалов в дорожном строительстве и положил начало созданию системы идентификации ГМ для дорожного строительства.

Проведенный анализ в данной главе, а также работа [66] показали, что до 2010 года в дорожной отрасли не существовало системного подхода к применению геосинтетических материалов. Большинство геосинтетических материалов пришло из легкой (текстильной) промышленности, так называемые технические ткани. Поэтому начало эры применения

геосинтетики у большинства ассоциируется с «дорнитом» и «геотекстилем». Существовали документы, которые лишь упоминали о допустимости применения геотекстиля в качестве разделяющей прослойки и армирования. Но в каждом документе были абсолютно разные подходы к нормированию свойств, а, следовательно, их сопоставлению между собой, а некоторые документы вообще разработаны были производителями с учетом особенностей именно их материалов.

#### 1.4 Выводы по главе 1

1) Изучение научно-технической литературы и нормативно-технических документов выявило ключевую роль геосинтетических материалов в совершенствовании дорожного строительства за счет укрепления асфальтобетонных покрытий, усиления оснований, противодействия эрозии и разделения слоев. Значительный опыт их применения в России и за рубежом подтверждает эффективность и необходимость их дальнейшего изучения и внедрения. Однако существующие методы испытаний и критерии оценки требуют уточнения и оптимизации для более точного прогнозирования эксплуатационной надежности этих материалов в дорожных конструкциях.

2) Современный рынок предлагает широкий ассортимент геосинтетических материалов, разнообразие которых обусловлено технологическими возможностями производителей. Нормативные методики расчета, как правило, основаны на теоретических характеристиках материалов, не учитывая их практическое снижение в процессе монтажа и эксплуатации дорог, что подчеркивает необходимость разработки методик, оценивающих реальные эксплуатационные качества.

## ГЛАВА 2. Теоретическое обоснование и совершенствование методологии применения геосинтетики в дорожном строительстве

### 2.1 Усовершенствование методологии идентификации геосинтетических материалов для дорожного строительства. Основная гипотеза исследований

С 2008 года проводилась работа для централизованного и системного применения геосинтетических материалов в дорожной отрасли. За основу при разработке классификации ГМ была принята европейская классификация, которая была обработана с использованием терминологического и семантического анализа. Предварительно, было определено три уровня классификации:

- тип, который характеризует природу объекта (геотекстиль, геопластмасса, геокомпозит),
- класс, который характеризует технологические особенности изготовления геосинтетического материала (нетканый, тканый, экструдированный и тд.),
- вид, который характеризует конкретную реализацию технологии (геополотно, георешетка, геомат и тд.).

Были унифицированы требования к геометрическим размерам образцов геосинтетических материалов. Была выбрана концепция испытания широкой полосы, при которой испытательная ширина (200 мм) больше испытательной длины (100 мм).

Результатом данных работ была разработка [67] за отправную точку при разработке которого был выбран стандарт международной организации по стандартизации [68]. Классификация приведена в таблице 2.1.

В таблице 2.2 показано несмотря на принятую классификацию, материалы могут выполнять разные функции, а, следовательно, должны обладать разными характеристиками, что и показали исследования автора. Более того, классифицировать ГМ на основе использованного при их изготовлении сырья некорректно, так как оно лишь позволяет заложить определенный набор характеристик, но без выверенной технологии его не сможет обеспечить, что свидетельствует о необходимости проведения как приемо-сдаточных испытаний при изготовлении, так и обязательного проведения входного контроля на объекте строительства с четкой и однозначной идентификацией материала, его производителя и поставляемой партии.

Более того, инструментальных и универсальных методов, доступных именно дорожникам, для идентификации используемого сырья нет. Поэтому в классификации геосинтетических материалов для дорожного хозяйства коллективом под моим руководством был использован отдельный классификационный признак – выполняемая функция, в соответствии с которым и выстроена вся методология применения ГМ в дорожной отрасли, установлены технические требования, методы испытаний и контроля качества.

Таблица 2.1 – Классификация геосинтетических материалов в соответствии с [67]

Тип	Класс	Вид
Геотекстиль	Тканый	Геополотно
		Георешетка
		Геомат
		Геооболочка
		Геополоса
	Вязаный	Геополотно
		Георешетка
		Геосетка
		Геомат
		Геооболочка
		Геополоса
	Нетканый	Геополотно
		Георешетка
		Геосотовый материал
		Геомат
		Геополоса
Плетеный	Геосетка	
	Геомат	
Геопластмасса	Экструдированная	Георешетка
		Геосетка
		Геомат
		Геомембрана
		Геополоса
	Вспененная	Геоплита
	Скрепленная	Георешетка
Геосотовый материал		
Геокомпозит	Дискретно-упрочненный	Биомат
		Глиномат
	Непрерывно-упрочненный	Геомембрана
		Геомембрана битумная
		Геополоса
		Геоплита
		Геосотовый материал

В рамках данного исследования была выдвинута рабочая гипотеза, заключающаяся в необходимости всестороннего изучения физических, механических, эксплуатационных, а также химико-биологических факторов, воздействующих на геосинтетические материалы, используемые в дорожном строительстве. Проведение данных исследований позволит разработать комплексную методологию для идентификации геосинтетических материалов, что, в свою очередь, обеспечит повышение надежности и долговечности дорожных конструкций. Разработка данной методологии также направлена на оптимизацию процесса производства геосинтетических материалов, что позволит получить материалы с заранее заданными характеристиками и требуемыми показателями свойств. Это будет способствовать повышению



эффективности их использования в строительстве, обеспечивая более высокий уровень эксплуатационной пригодности и надежности конструкций [74].

Таблица 2.2 - Область применения и виды геосинтетических материалов, используемые исходные материалы

Исходные материалы (сырье)	Вид геосинтетического материала	Функция
Стекловолокно Базальтовое волокно Полиэфирное волокно Полипропилен Полиэтилен Поливинилалкоголь Полиамид	Георешетка тканая Георешетка вязаная Георешетка с подложкой Георешетка нетканая Георешетка экструдированная Геосотовый материал Геополотно тканое Геополотно нетканое Геополотно вязаное	Армирование
Полипропилен Полиэтилен	Геополотно тканое Геополотно нетканое Геополотно вязаное	Разделение
Полиэфирное волокно Полипропилен Полиэтилен	Геосетка вязаная Геосетка плетеная Геосотовый материал Геомат тканый Геомат вязаный Геомат нетканый Геомат плетеный Геомат экструдированный Биомат	Борьба с эрозией на откосах
Полиэфирное волокно Полипропилен Полиэтилен	Геополотно нетканое Геополотно вязаное Геомембрана экструдированная	Фильтрация, дренирование

Таким образом, сформулированы предложения по систематизации и усовершенствованию методологии идентификации ГМ.

В основе усовершенствованной модели методологии является взаимосвязь между компонентами системы «ГМ – дорожная конструкция – природная среда», которая содержит в качестве входных параметров два комплекса факторов, которые воздействуют на ГМ на основных стадиях его жизненного цикла от хранения на объекте и до конца эксплуатации конструкции: это факторы внешней среды и техногенные факторы (представлено на рисунке 2.1). При этом важным элементом предлагаемой мной методологии является определенный набор из факторов для обеспечения выполнения ГМ конкретной функции, т.е. для каждой функции установлены характерные свойства материала. Например, при выполнении функции армирования геополотно должно обладать высокими прочностными характеристиками и малым относительным удлинением, а при выполнении функции разделения, когда важно, чтобы геополотно приняло форму границы разделения смежных слоев песка и щебня, - требуется большое относительное удлинение при малых прочностных характеристиках материала. При

армировании асфальтобетонных слоев дорожной одежды важным является сохранение свойств геосинтетического материала при воздействии высоких температур, не менее 160 °С и т.д. При этом если фактор не характерен для функции, то он исключается.

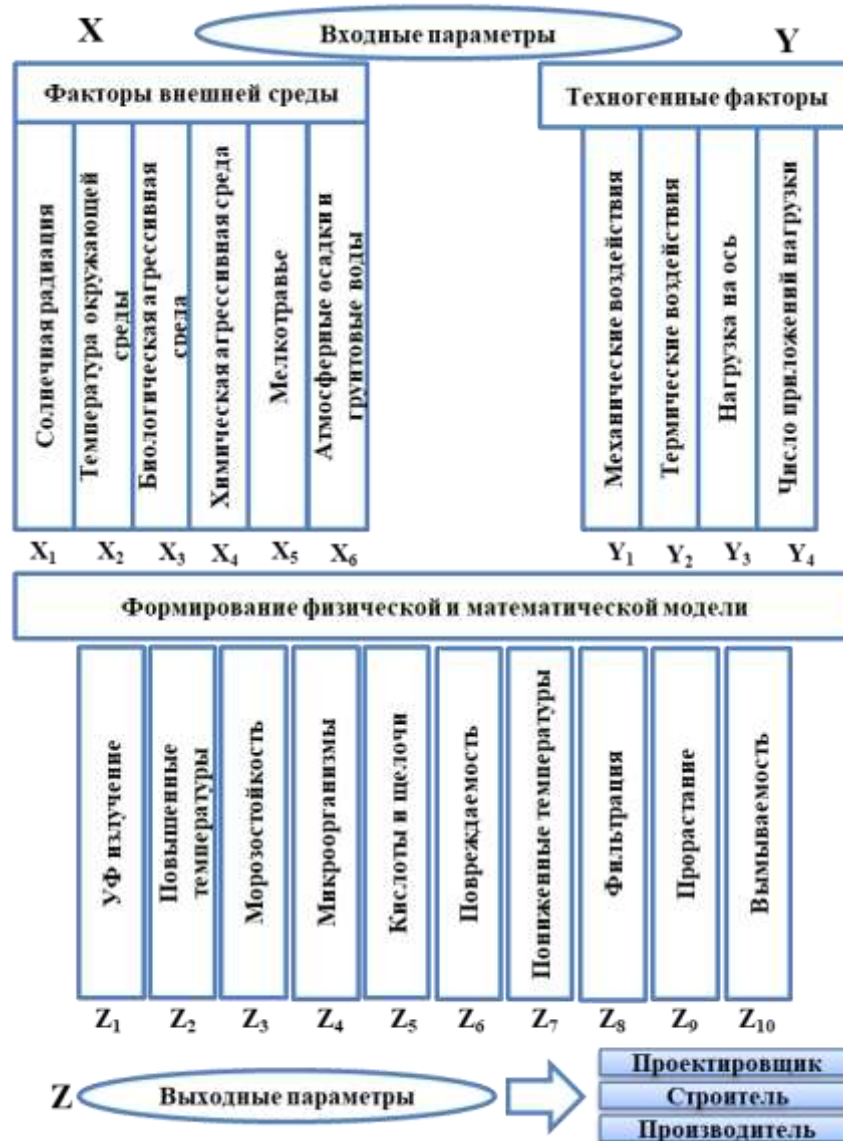


Рисунок 2.1 - Усовершенствованная методология идентификации ГМ

Данная методология, оформленная в виде документов национальной системы стандартизации, позволяет выбирать ГМ с заданными характеристиками для выполнения конкретной функции проектными организациями, стимулирует производителей изготавливать материалы под задачи отрасли, а также закупать, проектировать конструкции дорог с применением ГМ и контролировать качество, поступающих на объект строительства материалов.

В ходе исследования были созданы и внедрены 4 национальных стандарта и 1 предварительный национальный стандарт (ПНСТ), которые регламентируют технические требования к геоматериалам для дорожной отрасли. В отличие от европейских стандартов, являющихся первопроходцами в применении геоматериалов в дорожном строительстве,

разработанные отечественные требования содержат конкретные числовые показатели для нормируемых свойств материалов, охватывая каждую из четырех ключевых функций:

- требования к армированию неасфальтобетонных слоев дорожной одежды установлены в разработанном [69];
- требования к разделению слоев из дискретных материалов установлены в разработанном [70];
- требования к армированию асфальтобетонных слоев дорожной одежды установлены в разработанном [71];
- требования по борьбе с эрозией на откосах установлены в разработанном [72];
- общие технические требования к геосинтетическим материалам для дорожного строительства установлены в разработанном [73].

Предполагается, что изучение свойств и последующее развитие методологии, включающей классификацию, технические требования к каждой отдельной функции ГМ, а также методики испытаний позволят сформировать комплекс стандартов и ОДМ на ГМ для дорожного хозяйства и установить единые подходы к их производству, применению и контролю.

## 2.2 Общие положения по армированию слоев из зернистых материалов

Одним из наиболее важных направлений влияющих на долговечность дорожных конструкций является армирование нижних слоев дорожной одежды. Однако на момент конца 2000-х годов в этой области применения геосинтетических материалов отсутствовало единое системное понимание требуемых физико-механических характеристик, обеспечивающих выполнение функции армирования слоев дорожной одежды в процессе укладки геосинтетического материала, а также в процессе последующей эксплуатации всей конструкции автомобильной дороги, и, тем более, отсутствовали оптимальные необходимые значения этих физико-механических характеристик, которые необходимы как проектным организациям для обеспечения необходимого инженерного и экономического эффекта, изготовителям для производства и разработки СТО, строительным организациям для проведения входного контроля, так и независимыми организациями для нужд по сертификации геосинтетических материалов.

Подход в Европе к установлению характеристик геосинтетических материалов предполагает перечень характеристик и методики их измерения без указания конкретных числовых значений.

Так [74] устанавливает следующие критичные характеристики для выполнения функции армирования нижних слоев дорожной одежды:

- прочность при растяжении, данный показатель согласуется с заказчиком;

- прочность при статическом продавливании (CBR тест), данный показатель согласуется с заказчиком;
- ударная прочность, данный показатель согласуется с заказчиком;
- устойчивость при сдвиге (трение), данный показатель обязателен для всех условий эксплуатации;
- ползучесть при растяжении, данный показатель устанавливается для особых условий, например, для подпорных стен;
- стойкость к циклическим нагрузкам, данный показатель обязателен для всех условий эксплуатации;
- пропуск воды перпендикулярно поверхности, данный показатель обязателен для всех условий эксплуатации;
- устойчивость к ультрафиолетовому излучению, данный показатель обязателен для всех условий эксплуатации;
- устойчивость к агрессивным средам, данный показатель устанавливается для особых условий эксплуатации, например, когда среда, в которой планируется эксплуатация материала, имеет выраженную кислотность или щелочную среду;
- устойчивость к микроорганизмам, данный показатель устанавливается для особых условий, например, когда среда эксплуатации является благоприятной для размножения различных бактерий и микроорганизмов, например, тот же плодородный грунт.

Рассмотрим требования к геосинтетическим материалам, которые применяются для расчета конструкций дорожной одежды.

Например, в [76] установлено, что при армировании коэффициент для расчета зависит от наличия или отсутствия между слоями геосинтетического материала, но при этом требования к самому материалу отсутствуют. Это опять подтверждает тот факт, что вначале 2000 - х рынок не был насыщен различными геосинтетическими материалами, и к ним не предъявлялось никаких требований.

Если рассмотреть [63], который разработан в развитие [76], то данный документ рекомендует при использовании георешетки принять коэффициент равным 2 и нормирует определенный комплекс свойств, которые дают приоритет при выборе материалов из стекловолокна.

Наравне с этим при расчетах конструкции дорожной одежды используется коэффициент усиления (коэффициент увеличения общего модуля упругости армированной конструкции), который зависит от условного модуля упругости композитного слоя «зернистый материал + георешетка» [77] и также является табличным значением, не зависящим от характеристик применяемой георешетки.

Если рассмотреть таблицу 7.2 [64], то там установлены свои, отличные от предыдущих требования.

Для функции армирования на контакте с крупнопористыми материалами [50] рекомендуется:

- прочность при растяжении не менее 30 кН/м;
- относительное удлинение при растяжении не более 13 %;
- условный модуль деформации при нагрузке 0,3 от максимальной не менее 10 кН/м;
- допустимая потеря прочности на растяжение после 25 циклов замораживания – оттаивания не более 10 %.

Аналогичные показатели рекомендуются и для временных дорог на слабых основаниях.

Также в [50] предусмотрена проверка прочности геосинтетического материала для обеспечения эксплуатационной нагрузки, и определяется по формуле (2.2):

$$1,9 P_0 E_p E_{cp} / E_{общ} \leq K_p R_p \quad (2.2)$$

где  $P_0$  – удельное давление от колеса расчетного автомобиля, МПа;

$E_p$  – условный модуль деформации геосинтетического материала Н/см;

$E_{cp}$  – безразмерный параметр (табличные данные);

$E_{общ}$  – модуль упругости лежащих под геосинтетическим материалом грунтовых слоев, МПа;

$K_p$  – коэффициент снижения прочности геосинтетического материала в процессе эксплуатации, уменьшенный в 1,2 раза.

Представленная выше зависимость решает иную задачу — она оценивает возможность использования материала в конструкции, однако не отвечает на вопрос о том, в какой мере произойдет усиление (армирование) конструкции. Более того, данная зависимость не учитывает уменьшение удельного давления от колеса расчетного автомобиля в зависимости от состава и толщины вышележащих слоев дорожной одежды.

Анализируя данную ситуацию, можно заключить, что при определении требований к геосинтетическим материалам, предназначенным для армирования слоев дорожной одежды из зернистых (несвязанных) материалов, наблюдается аналогичная ситуация, как и в случае нормирования свойств геосинтетических материалов для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды. В расчетных документах не учитываются конкретные характеристики отдельных геосинтетических материалов, при этом различные нормативные документы предъявляют разные требования к допустимым характеристикам. Особо стоит отметить, что при

всем многообразии подходов и установления характеристик ГМ, в соответствие с этими же документами, проектирование должно осуществляться по [76], который заменил [78].

### 2.3 Общие положения по армированию асфальтобетонных слоев дорожной одежды

В странах Европейского Союза требования к геосинтетическим материалам, применяемым для усиления асфальтобетонных слоев, регламентированы стандартом [79].

В документе [79] описаны основные свойства геотекстильных и смежных материалов, которые выполняют следующие функции:

- усиление;
- снижение напряжений;
- герметизация.

Данный стандарт предписывает проведение оценок по таким показателям, как:

- прочность на разрыв;
- удлинение при максимальной нагрузке;
- стойкость к атмосферным условиям;
- температура плавления;
- устойчивость к воздействию щелочных растворов.

При этом важно подчеркнуть, что стандарт не устанавливает конкретные предельно допустимые значения для этих характеристик, что является характерной чертой нормативных требований Европейского Союза для геосинтетических материалов. Вместо этого стандарт регламентирует методы оценки, которые должны использоваться для измерения характеристик конкретного материала, а результаты этих измерений необходимо включать в технические спецификации (аналог паспорта) для целей сертификации.

Если рассматривать отечественные документы того времени, то в России не существовало нормативно-технического документа, который бы устанавливал технические требования к геосинтетическим материалам для дорожного строительства. Тем не менее, некоторые документы, такие как [78] и [76], содержали рекомендации по использованию "геотекстиля и геосеток" для улучшения трещиностойкости дорожных покрытий. Например, [76] предлагает применять специальные трещинопрерывающие слои, включая геосетки и геотекстиль, для повышения долговечности покрытий, требования к которым установлены в таблице 7.2 в [50].

Согласно разделу 9 [50], главной целью использования геосеток является армирование асфальтобетонных слоев для увеличения устойчивости к растягивающим температурным нагрузкам и сопротивления растяжению при изгибе. Это влияет на увеличение срока службы покрытия. Для этой цели рекомендуется использовать геосетки из стекловолокна или базальтового волокна с такими характеристиками:

- относительная прочность узловых соединений геосетки не менее 5% от прочности ребер;
- уменьшение прочности после нагрева до 165 °С не более 15%;
- размер ячеек геосетки составляет 25 мм для мелкозернистого асфальтобетона и 40 мм для крупнозернистого асфальтобетона.

При расчете структуры, полное растягивающее напряжение принимается в соответствии с [76], увеличенное в 1.3 раза для нетканых геосинтетических материалов с толщиной 1.5-2 мм и поверхностной плотностью 150-200 г/м<sup>2</sup>, а для материалов с меньшей толщиной и плотностью - в 1.15 раза. Однако отсутствует четкий набор условий расчета для других типов геосинтетических материалов с разными характеристиками толщины и плотности.

В результате проведенного анализа можно утверждать, что при проведении расчетов на практике фактически не используются свойства конкретных геосинтетических материалов, а вместо этого используются общие для всех геосинтетических материалов коэффициенты. Характеристики материалов указаны в нормативных документах, но числовые значения представлены только в отечественных рекомендациях, причем методики измерения характеристик либо отсутствуют, либо определены так, что не обеспечивают воспроизводимость результатов испытаний. Следовательно, актуальным становится вопрос проведения исследований материалов, представленных на рынке, с последующим сопоставлением их физико-механических, химических и биологических свойств в лабораторных условиях и их эксплуатационных характеристик на автомобильных дорогах, где использовались оцененные в лаборатории геосинтетические материалы.

Эксплуатационные характеристики автомобильных дорог, которые могут зависеть от использования геосинтетических материалов для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды, могут включать в себя следующие аспекты:

- повышение несущей способности (модуль упругости);
- уменьшение количества трещин;
- воздействие на образование колеи.

#### 2.4 Влияние армирования на напряженное состояние образцов из асфальтобетона при одноосном растяжении и изгибе

Исследуем вопрос о влиянии армирования геосинтетическими материалами на напряженно-деформированное состояние асфальтобетонных образцов при испытаниях на одноосное растяжение и изгиб.

Механические свойства асфальтобетона зависят как от структурных параметров смеси (модуля упругости и гранулометрического состава минерального наполнителя, объемного

содержания наполнителя и органического вяжущего (битума)), так и от условий проведения испытания – в первую очередь, от температуры и времени приложения нагрузки (деформации).

В работе [80] приведены результаты экспериментов по растяжению призматических асфальтобетонных образцов, проведенных в Брауншвейгском техническом университете и в Казахском дорожном научно-исследовательском институте на прецизионных установках с очень жесткой рамой. В первом эксперименте одноосному растяжению со скоростью 1 мм/мин были подвергнуты образцы длиной 160 мм, содержащие 4.7% немодифицированного битума с индексом пенетрации  $PI = -0.69$ , температурой размягчения  $T_{rb} = 49^\circ\text{C}$ , с объемной долей пустот в минеральном заполнителе  $VMA = 0.144$  и объемной долей пустот, наполненных битумом  $VFA = 0.73$ , при температурах образца 20, 5, -10 и  $-25^\circ\text{C}$ . Во втором эксперименте измерения проводились при 20, 10, 0, -10, -20 и  $-30^\circ\text{C}$  для образцов, содержащих битум с  $PI = -0.91$ ; остальные параметры были близки к таковым для 1-го эксперимента. Было установлено, что в диапазоне температур от  $-30$  до  $-10^\circ\text{C}$  прочность на растяжение  $\sigma_{\max}$  малоизменчива и близка к 5 МПа; с повышением температуры до  $10^\circ\text{C}$  прочность снижается до 1 МПа. Время  $t_f$  от начала испытаний до разрушения составляло в среднем 40 с, что дает оценку максимальной относительной деформации  $\varepsilon_{\max} = \frac{40 \text{ с}}{60 \text{ с}} \cdot \frac{1 \text{ мм}}{160 \text{ мм}} \cdot 100\% = 0.4\%$ .

В монографии [80] имеется график результатов испытания образцов асфальтобетона на ползучесть при одноосном растяжении: после приложения нагрузки, поддерживали ее постоянной и измеряли модуль жесткости  $S(t) = \sigma/\varepsilon(t)$  при температурах от 20 до  $-8.5^\circ\text{C}$ ; образцы содержали 6% битума с  $PI = -1.05$  и  $T_{rb} = 47.5^\circ\text{C}$ . Результаты измерения модуля жесткости, играющего роль модуля упругости для вязкоупругих материалов, сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 - Зависимость модуля жесткости  $S$  (МПа) от температуры и времени нагружения

Длительность нагружения	10 с	32 с	100 с
$20^\circ\text{C}$	600	330	200
$15^\circ\text{C}$	1100	700	420
$0^\circ\text{C}$	5500	4500	2500
$-5^\circ\text{C}$	8500	6200	5100
$-8.5^\circ\text{C}$	10100	9500	8000

Выясним теперь нужные для расчета механические параметры геосинтетических материалов, применяемых для армирования асфальтобетонных слоев. Согласно информации с сайта одного из ведущих российских производителей дорожной геосинтетики, ООО «ГеоСМ» (г. Москва), покупателям предлагается два типа георешеток «Геофлак», на основе полиэфирных и стеклянных волокон, специально предназначенных для армирования и трещинопрерывания в асфальтобетонных покрытиях [82]. В частности, для георешетки полиэфирной с наибольшей доступной поверхностной плотностью  $600 \text{ г/м}^2$  указаны максимальная прочность на разрыв 100



кН/м при удлинении <12.5%; при удлинении 2% сопротивление растяжению составляет 19 кН/м. Георешетка состоит из множественных продольных и поперечных волокон, расположенных с некоторым постоянным шагом и скрепленных между собой в местах пересечения. Для упрощения расчета, в соответствии с методом конструктивной анизотропии, такая структура может быть сведена к однородному слою армирования постоянной толщины  $h$  [83]. При объемной плотности полиэфирного волокна  $1350 \text{ кг/м}^3$  и отношении количества продольных волокон к поперечным 50/50 имеем  $h = \frac{1}{2} \cdot \frac{0.6 \text{ кг/м}^2}{1350 \text{ кг/м}^3} = 2.2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ . Если деформирование

полиэфирного волокна от 0% до 2% считать приближенно линейно-упругим, то модуль упругости слоя армирования получается равным  $E_{арм} = \frac{19 \cdot 10^3 \text{ Н/м}}{2.2 \cdot 10^{-4} \text{ м} \cdot 0.02} = 4320 \text{ МПа}$ , что вполне

согласуется, например, с экспериментальными данными для модуля жесткости крученого полиэфирного волокна, приведенными в [84] ( $S = 5000 - 6000 \text{ МПа}$ ). Таким образом, армирование полиэфирными волокнами не способно предотвратить растрескивание асфальтобетона при отрицательных температурах, при которых модуль упругости слоя армирования оказывается *меньшим*, чем у асфальтобетона. Проявить свои высокие прочностные свойства и помочь слою асфальтобетона в несении нагрузки полиэфирному волокну крайне затруднительно, ведь деформация при максимальной нагрузке у такого волокна доходит до 12.5%, а максимальная кратковременная деформация растяжения, которую способен выдержать асфальтобетон, равна около 0.5%. Тем не менее, армирование полиэфирными георешетками, при обеспечении хорошей адгезии к асфальтобетонным слоям, способно препятствовать окончательному разделению растрескавшегося слоя на несвязанные между собой части.

Ситуация с георешетками из стекловолокна выглядит более перспективной: табличный модуль упругости стекловолокна  $70 \cdot 10^3 \text{ МПа}$  многократно превышает модуль упругости асфальтобетона при любых температурах эксплуатации. Оценим, какую часть общей растягивающей нагрузки асфальтобетонного образца готова принять на себя такая георешетка.

Согласно [82], наиболее прочная георешетка из стекловолокна при поверхностной плотности  $570 \text{ г/м}^2$  способна нести нагрузку 120 кН/м при удлинении не более 3%. Принимая объемную плотность стекла равной  $2500 \text{ кг/м}^3$ , для толщины эквивалентного слоя армирования получаем  $h = \frac{1}{2} \cdot \frac{0.57 \text{ кг/м}^2}{2500 \text{ кг/м}^3} = 1.1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ , а для модуля упругости –

$$E_{арм} = \frac{120 \cdot 10^3 \text{ Н/м}}{1.1 \cdot 10^{-4} \text{ м} \cdot 0.03} = 36 \cdot 10^3 \text{ МПа}$$

что всего вдвое меньше табличного значения для отдельного волокна, приведенного выше.

В соответствии с требованиями [85] и [86] выберем для расчетов размеры сечения асфальтобетонного образца в форме прямоугольного параллелепипеда равными 80 мм x 80 мм, длину образца 240 мм; пусть слой армирования проходит посередине поперечного сечения образца вдоль его длины. Тогда, согласно таблице 2.3, при приложении нагрузки в течение 32 с и деформации 0.1% получаем для усилий  $P_{асф}$  и  $P_{арм}$ , воспринимаемых асфальтобетоном и слоем армирования, соответственно, следующие значения (представлено в таблице 2.4).

Таблица 2.4 - Усилия, приходящиеся на асфальтобетон и слой армирования

	20°C	15°C	0°C	-5°C	-8.5°C
$P_{асф}$ , кН	2.1	4.5	29	40	61
$P_{арм}$ , кН	0.62				

Как видим, при понижении температуры, начиная примерно с 10°C, слой армирования несет менее 10% совокупной растягивающей нагрузки, а температурах ниже -10°C – менее 1%. И эти результаты получены, напоминаем, для самого плотного армирующего материала в линейке производителя [82], с самым большим из имеющихся модулем упругости материала. При стандартных испытаниях на изгиб асфальтобетонных балочек, армированных по срединной линии, ситуация будет такой же или даже более худшей – при изгибе продольные деформации срединной линии балки близки к нулю и армирующий материал, предназначенный нести растягивающую, а не изгибающую нагрузку, практически исключается из работы.

## 2.5 Моделирование распределения температур по слоям дорожной одежды

Современный асфальтобетон является композитным материалом, состоящим из минерального высокопрочного наполнителя и органического вяжущего (битума). Нормативные требования к битумам, которые могут быть использованы для приготовления покрытий современных автомобильных дорог, предъявляются достаточно жесткие требования. В частности, для исключения образования колеи, асфальтобетонная композиция должна иметь минимальные необратимые деформации под воздействием нагрузки от транспортных средств в жаркое время года. Для минимизации растрескивания битум должен сохранять деформативность и обеспечивать релаксацию напряжений в холодное время года. Падение характеристик битума при его технологическом старении, происходящем при укладке асфальтобетона, и при последующем эксплуатационном старении должно быть настолько замедленным, чтобы обеспечить показатели стойкости к колееобразованию и растрескиванию на весь планируемый срок службы автомобильной дороги.

Битум относится к вязкоупругим материалам, свойства которого сильно зависят от температуры и времени приложения нагрузки. При температурах в окрестности температуры стеклования и ниже битум ведет себя как хрупкий упругий материал с низким уровнем

необратимых деформаций; при температурах, близких к температуре размягчения битум проявляет выраженные вязкостные свойства: в эксперименте при постоянном одноосном нагружении, деформации образца неограниченно возрастают со временем вплоть до разрушения. Следовательно, необходимым этапом моделирования напряженно-деформированного состояния многослойной дорожной одежды, включающей слои из асфальтобетона, является построение температурной модели, предсказывающей сезонные и суточные колебания температуры по всем слоям конструкции.

В качестве объекта моделирования была выбрана скоростная автомобильная дорога М-11 “Нева”, как сравнительно свежая конструкция, спроектированная и построенная “с нуля” в соответствии с современными нормами. Начиная с 2018 года, на этой дороге государственной компанией “Автодор” были введены в эксплуатацию автоматические станции удаленного мониторинга, передающие каждые полчаса информацию о перемещениях, температурах и влажности дорожной одежды по всей ее глубине [87]. В качестве средств измерения были использованы устройства мониторинга дорожных конструкций, разработанные в Донском государственном техническом университете (г. Ростов-на-Дону) и представляющие собой цилиндры с чувствительными элементами, электроникой и системой автономного питания, установленные в вертикальных каналах, проходящих через все сечение дорожной одежды от асфальтобетонного покрытия до грунтового основания [88]. Устройство позволяет измерять температуры на всех внутренних границах между слоями дорожной одежды (представлено в таблице 2.5), а также на глубине 300 мм в грунте земляного полотна.

Таблица 2.5 - Конструкция дорожной одежды 1 этапа строительства М-11 [89]

Слой	Толщина $H$ , мм	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	Тепло-емкость $c$ , Дж/(кг·К)
1 Щебеночно-мастичный асфальтобетон ЦМА-20	60	2500 (2500)	1.4 (1.4)	1000-1500 (1000)
2 Горячий плотный асфальтобетон типа Б на битуме БНД 60/90	80	2400 (2400)	1.4 (1.4)	900-1500 (1500)
3 Горячий пористый асфальтобетон на битуме БНД 60/90	150	2300 (2300)	1.25 (1.25)	900-1500 (1500)
4 Щебеночно-песчаная смесь С4	480	2000 (2000)	2.0-2.1 (2.0)	800-900 (800)
5 Песок мелкий	600	1800-1900 (1900)	1.91-2.32 (2.12)	800 (800)
6 Грунт земляного полотна - песок	-	1750-2000 (1900)	1.80-2.44 (2.12)	800 (800)

Диапазоны возможных изменений плотности, теплопроводности и теплоемкости материалов в слоях, представленных в таблице 2.3, устанавливались в соответствии с [90, 91, 92]. Согласно исследованию [93], удельная теплоемкость асфальтобетона в первые 2-3 года эксплуатации минимальна и равна примерно 900-1000 Дж/(кг·К); в дальнейшем изменение микроструктуры асфальтобетона в процессе его старения приводит к увеличению теплоемкости

более чем в 1.5 раза. Эти экспериментальные результаты были учтены при выборе границ изменения теплоемкости асфальтобетонов в таблице 2.3. Изменчивость коэффициента теплопроводности песка в той же табл. связана с зависимостью от влажности. В круглых скобках в таблице 2.3 указаны значения величин, принятые для дальнейших расчетов.

В предлагаемой температурной модели дорожная одежда представляется слоистым полупространством, состоящим из однородных слоев постоянной толщины, покоящихся на неограниченном по глубине грунтовом основании, с однородным полем температуры на внешней границе. Для упрощения расчетов тепловые характеристики материала каждого слоя считаются постоянными, не зависящими от времени и температуры; фазовыми переходами и прочими структурными перестройками вещества, возможными при изменении температуры, пренебрегаем. В таких условиях для моделирования процесса распространения тепла можно использовать систему одномерных однородных уравнений теплопроводности (формула 2.3)

$$\frac{\partial u_k}{\partial t} = \frac{\lambda_k}{c_k \rho_k} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x^2}, \quad k = 1..N, \quad (2.3)$$

вместе с условиями непрерывности теплового потока на межслойных границах (формула 2.4):

$$(\lambda_k u_k - \lambda_{k+1} u_{k+1}) \Big|_{x=X_k} = 0, \quad k = 1..N-1, \quad (2.4)$$

где  $N$  - количество слоев,  $u_k = u_k(t, x)$  - температура в пределах  $k$ -го слоя в точке с координатой  $x$  в момент времени  $t$ ,  $\lambda_k, c_k, \rho_k$  - коэффициент теплопроводности, удельные теплоемкость и плотность материала  $k$ -го слоя, соответственно,  $X_k = \sum_{i=1}^k H_i$  - координата границы между  $k$ -м и  $k+1$ -м слоями. Ось координат  $x$  начинается на внешней границе (верхней поверхности первого слоя) и направлена вглубь полупространства по нормали к поверхности.

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). К сожалению, устройство не измеряет температуру поверхности дорожной одежды, поэтому в качестве граничного условия задавалась зависимость температуры от времени, измеренная на границе между слоями ЩМА-20 и плотного асфальтобетона (представлено на рисунке 2.2)

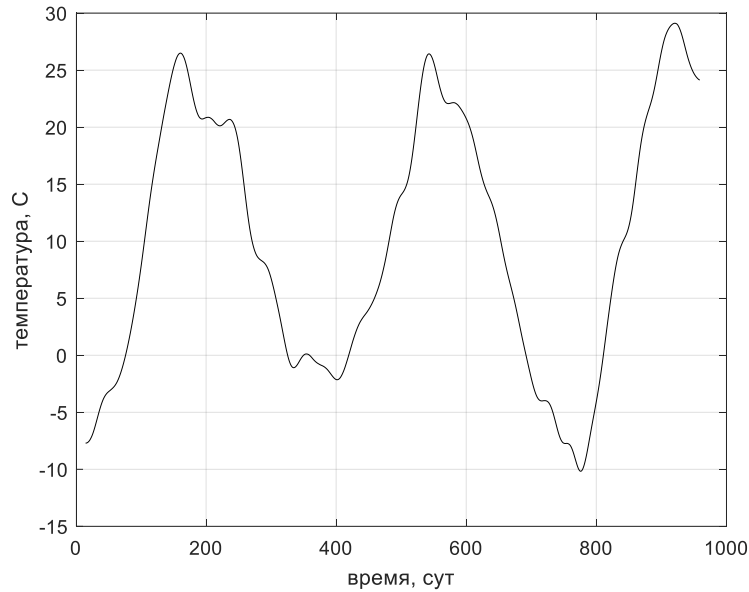


Рисунок 2.2 - Изменение температуры на верхней поверхности слоя плотного асфальтобетона (начало отсчета по оси времени – суткам 00:00-23:59 01.01.2019 соответствует номер 1)

Соответственно, после вынужденного исключения слоя ЩМА-20, температурная модель включала 5 последовательных слоев, сверху вниз: плотный асфальтобетон, пористый асфальтобетон, щебеночно-песчаная смесь, песок мелкий и грунтовое основание. Неограниченное по глубине грунтовое основание моделировалось слоем толщиной 10 м; на нижней границе этого слоя температура может задаваться постоянной и равной средней наблюдаемой температуре на соответствующей глубине для открытого грунта на широте Московской области по данным метеорологических наблюдений. Для задания начальных условий проводилась кусочно-линейная интерполяция по измеренным температурам на межслойных границах по состоянию на 00:00 14 января 2019 года.

Для численного решения задачи (2.3)-(2.4) методом сеток использовался программный модуль, написанный на языке системы инженерных вычислений Matlab. В соответствии с методом сеток, искомая функция  $u(t, x)$ , определенная в прямоугольнике  $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$ ,  $0 \leq x \leq X_s$ , заменяется на сеточную функцию  $U_{ij}$ ,  $1 \leq i \leq N_t$ ,  $1 \leq j \leq N_x$ , где  $N_t$ ,  $N_x$  - максимальные значения сеточных индексов  $i, j$ , замещающих непрерывные переменные  $t, x$ , соответственно. Устойчивость численного счета обеспечивалась неявной разностной схемой общего вида с регулируемым параметром “неявности”  $\sigma$  [94], основное уравнение которой:

$$\begin{aligned}
 & -U_{i+1,j-1} + \left( \frac{\Delta x_k^2}{\sigma a_k \Delta t} + 2 \right) U_{i+1,j} - U_{i+1,j+1} = \\
 & = \left( \frac{1}{\sigma} - 1 \right) U_{i,j-1} + \left( \frac{\Delta x_k^2}{\sigma a_k \Delta t} + 2 \left( 1 - \frac{1}{\sigma} \right) \right) U_{i,j} + \left( \frac{1}{\sigma} - 1 \right) U_{i,j+1}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

является дискретным аналогом уравнения (2.3) на шеститочечном шаблоне (представлено на рисунке 2.3).

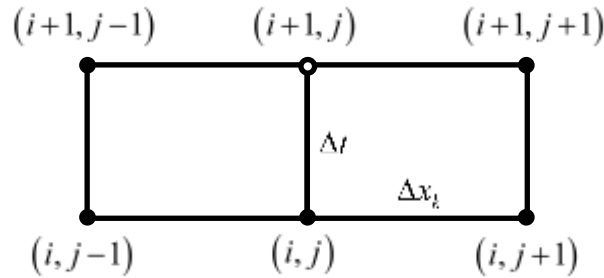


Рисунок 2.3 - Шаблон разностной схемы

В уравнении (2.5) левая часть содержит неизвестные сеточные значения  $U_{i+1,j-1}, U_{i+1,j}, U_{i+1,j+1}$  нового  $(i+1)$ -го временного слоя, правая часть – известные значения  $U_{i,j-1}, U_{i,j}, U_{i,j+1}$  с предыдущего слоя;  $a_k = \frac{\lambda_k}{c_k \rho_k}$  и  $\Delta x_k$  есть коэффициент теплопроводности и шаг пространственной сетки  $k$ -го слоя и  $\Delta t$  - шаг временной сетки. В [94] показано, что разностная схема (2.5) безусловно устойчива при  $\sigma > 1/2$ .

Основное разностное уравнение (2.5) записывается для всех узлов нового временного слоя, кроме двух приграничных ( $j=2, j=N_x-1$ ) и четырех узлов, расположенных на межслойных границах ( $j=j_k, k=1..4$ ). В двух приграничных узлах одна из переменных левой части (2.5) известна из граничных значений и соответствующее слагаемое переносится в правую часть. Для четырех межслойных границ записывается условие непрерывности теплового потока (2.4), которое в разностной форме имеет вид

$$-\frac{\lambda_k}{\Delta x_k} U_{i+1,j_k-1} + \left( \frac{\lambda_k}{\Delta x_k} + \frac{\lambda_{k+1}}{\Delta x_{k+1}} \right) U_{i+1,j_k} - \frac{\lambda_{k+1}}{\Delta x_{k+1}} U_{i+1,j_k+1} = 0, \quad (2.6)$$

где  $j_k$  обозначает индекс узла сетки на границе между  $k$  и  $k+1$  слоями.

Значения сеточной функции  $U_{1,j}$  известны из начального условия; значения  $U_{i,1}$  и  $U_{i,N_x}$  - из граничных условий на верхней границе слоя плотного асфальтобетона и нижней границе слоя грунтового основания, соответственно.

Система уравнений (2.5) и (2.6) вместе с начальными и граничными условиями образуют замкнутую систему линейных уравнений, которая решается средствами системы Matlab. Численные эксперименты показали, что приемлемая относительная погрешность 0.1%

достигается при разбиении 1, 2, 3, 4, 5 слоев по толщине на, соответственно, 4, 6, 10, 10, 40 промежутков и разбиении всего расчетного времени на 500 промежутков.

Для верификации программного модуля было проведено сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными за расчетный период с 14 января 2019 года по 16 августа 2021 года с устройства мониторинга №118 (представлено на рисунке 2.4).

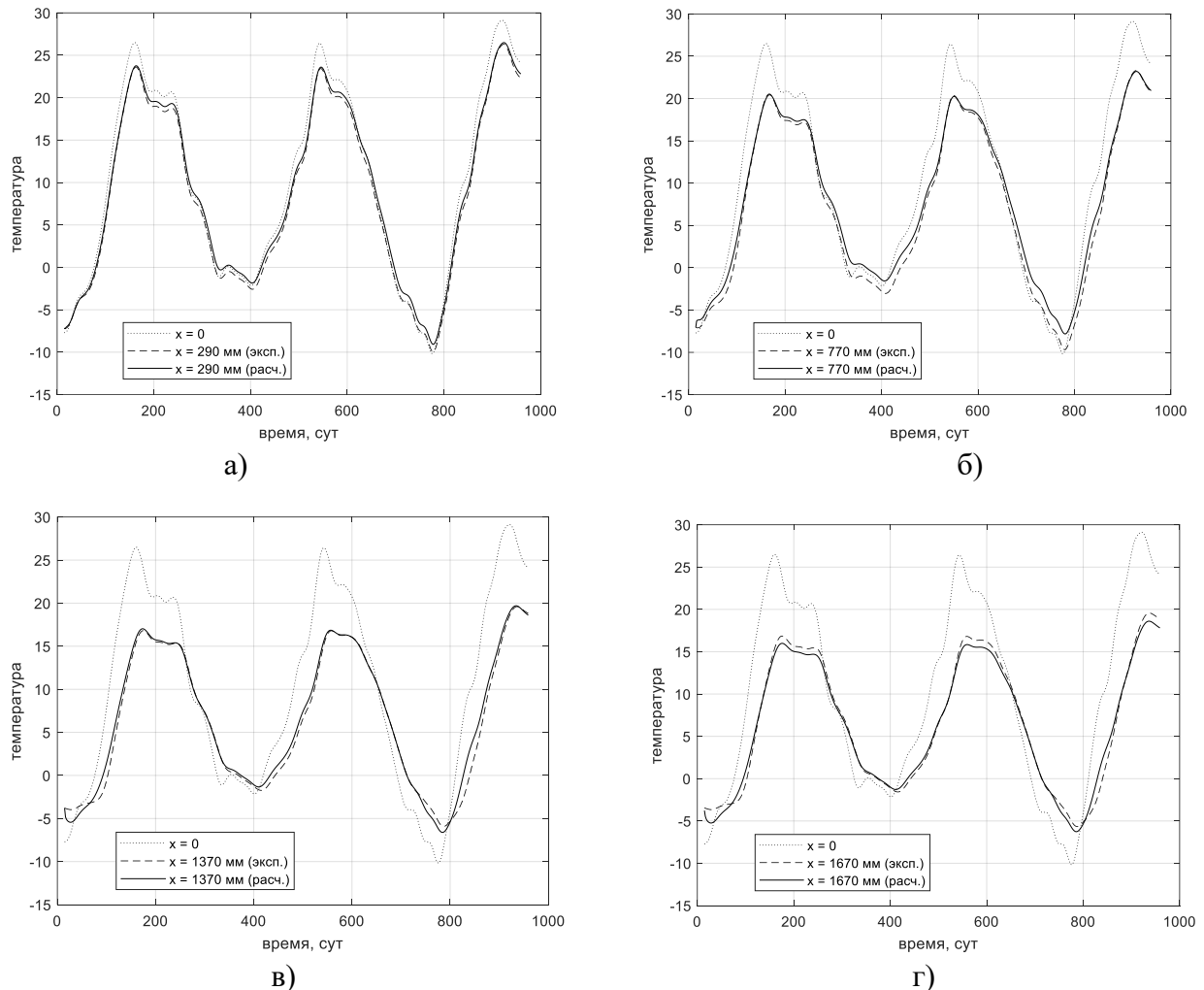


Рисунок 2.4 - Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по температурам на разных глубинах

Как видно из рисунка 2.4, экспериментальные и расчетные данные находятся в хорошем согласии – максимальное расхождение температур не превосходит 2 °С. Эти расхождения можно объяснить, в частности, неизвестностью истинных толщин слоев дорожной конструкции в месте расположения измерительного устройства (использованные в расчетах значения толщин заимствованы из проектной документации), погрешностями определения механических и теплофизических характеристик материалов, погрешностями в распределении температур, вносимыми металлическим корпусом измерительного устройства, проходящим через все слои дорожной одежды, а также пренебрежением теплотой, выделяющейся или поглощаемой в процессах фазовых переходов влаги, содержащейся в порах материалов. Тем не менее,

достигнутый уровень погрешности можно считать приемлемым для использования программного модуля на втором этапе расчетов при оценке температурных напряжений, возникающих в слоях дорожной одежды.

## 2.6 Постановка задачи определения напряженного состояния дорожной одежды в окрестности трещины

Причиной образования трещин в дорожных покрытиях чаще всего является появление растягивающих и изгибающих напряжений в слоях дорожной конструкции. Эти напряжения возникают под воздействием транспортных нагрузок и температурных изменений, особенно при их совместном влиянии. Трещины формируются в тех зонах, где нормальные растягивающие напряжения превышают предел прочности на растяжение материала данного слоя. Визуально трещины становятся заметны, когда их ширина составляет от 0,2 до 1 мм, а длина — не менее 10 см, тогда как более мелкие микротрещины остаются невидимыми. Большинство трещин, возникающих в зоне интенсивного движения транспортных средств, связано с процессом усталостного разрушения слоя покрытия.

Механизм усталостного разрушения можно описать следующим образом. Хотя напряжения при прохождении одного автомобиля значительно ниже критических, неоднородность материала приводит к локальным отклонениям напряжений от среднего уровня. В местах, где эти локальные напряжения превышают предел упругости битумных пленок, связи разрушаются. Многократное воздействие нагрузки вызывает постепенное накопление этих разрывов. В итоге, после определённого числа циклов, в нижней части покрытия, в зоне наибольшего транспортного воздействия, возникают продольные трещины, которые постепенно сливаются и образуют сеть более крупных трещин. Эти трещины распространяются как вглубь, так и вдоль своей длины. По мере продолжения нагрузок трещина углубляется и доходит до поверхности покрытия, становясь видимой.

Некоторые трещины зарождаются на поверхности покрытия или на верхнем слое конструкции и распространяются сверху вниз. К таким трещинам относятся температурные трещины и те, что образуются в местах выпуклых изгибов дорожной конструкции под воздействием автомобильных колес. Существенную долю трещин на поверхности составляет отражённые трещины. Эти трещины возникают в старом покрытии и могут проявляться на новом слое асфальтобетона. Как показывает практика, такие трещины начинают появляться уже через 1-2 года эксплуатации, а через 5-7 лет их повторное проявление становится очевидным на новом покрытии.

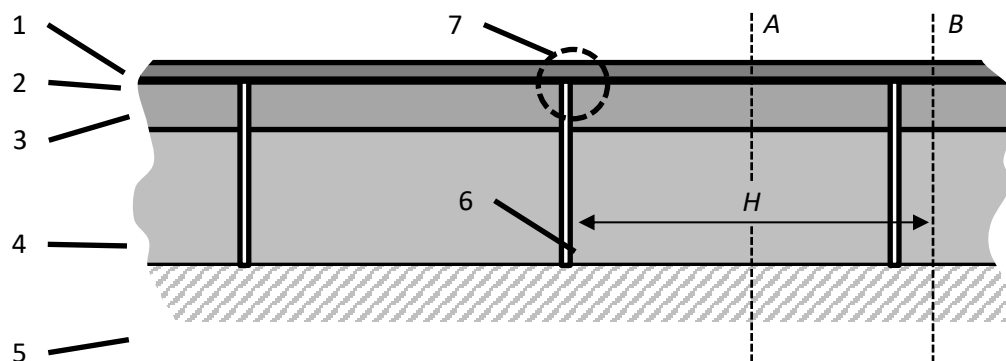
Однослойное армирование геосинтетическими материалами асфальтобетонного покрытия вблизи его срединной линии крайне незначительно увеличивает прочность покрытия,



как при одноосном растяжении, так и при изгибе. Этот теоретический вывод подтверждается экспериментальными исследованиями. В частности, согласно экспериментам государственного предприятия «БелдорНИИ», армирование повышает прочность образцов асфальтобетона в пределах 1.5%. Серия лабораторных экспериментов по измерению прочности асфальтобетонных образцов на изгиб при трехточечном нагружении, проведенная в рамках диссертационного исследования в АНО «НИИ ТСК», привела к аналогичному результату: для 5 из 6 использованных для армирования геосинтетических материалов отличия прочности армированных и неармированных образцов являются статистически незначимыми. Одним из направлений существенного повышения изгибной жесткости асфальтобетонных слоев может являться двухслойное армирование геосинтетическими материалами, при котором один слой армирования должен располагаться сразу под слоем износа, а второй – у нижней грани асфальтобетонных слоев [96].

Таким образом, однослойное армирование, по всей видимости, не способно сколь-нибудь значимо противостоять развитию трещин нижней поверхности асфальтобетонных слоев, возникающих при изгибных деформациях под действием нагрузки от большегрузных транспортных средств. Растрескивание верхней поверхности асфальтобетона в холодное время года при резких понижениях температуры, происходящее из-за недостаточной скорости релаксации температурных напряжений битумом, близким к состоянию стеклования, также не может предотвращаться однослойным армированием – общая жесткость асфальтобетонных слоев при их максимально допустимом растяжении превосходит жесткость армирующих слоев более чем на два порядка.

Структурная модель дорожной одежды. Предположим, что существующая дорожная одежда в ходе многолетней эксплуатации подверглась поперечному растрескиванию, при котором прямолинейные вертикальные трещины, перпендикулярные оси дороги, возникли на расстоянии  $H$  друг от друга (представлено на рисунке 2.5). Если считать, что трещины проросли через всю толщину асфальтобетонных слоев 3 и несвязные слои основания 4 не сопротивляются растягивающим нагрузкам, то вся дорожная одежда оказывается разделенной на серию малосвязанных сегментов. Пусть в процессе ремонтно-восстановительных работ к верхней поверхности старого покрытия 3, после его выравнивания, прикреплен слой геосинтетического материала 2 на основе стекловолокна, поверх которого создано новое асфальтобетонное покрытие 1. Тогда при понижении температуры к обычным температурным напряжениям растяжения в новом покрытии добавляются напряжения в окрестности вершины трещины (зона 7), появляющиеся в результате стремления трещины к расширению из-за температурного сжатия сегментов старой дорожной одежды.



1 – новое асфальтобетонное покрытие, 2 – слой армирования, 3 – старое асфальтобетонное покрытие, 4 – основание, 5 – грунтовое полотно, 6 – трещина, 7 – зона добавочных температурных напряжений

Рисунок 2.5 - Структура дорожной одежды

Предполагается, что применение армирующего геосинтетического материала позволит существенно снизить уровень добавочных температурных напряжений в новом покрытии и уменьшить вероятность его растрескивания.

Модель изменения температуры. Для расчета максимального уровня добавочных напряжений необходимо из всевозможных распределений температур по глубине дорожной одежды, возникающих в процессе эксплуатации, выбрать самые неблагоприятные распределения. Как отмечалось во многих источниках, температурное растрескивание асфальтобетона наблюдается при резких понижениях температуры в холодное время года, когда скорость релаксации напряжений слишком мала, чтобы справиться со стремительно нарастающими температурными напряжениями и последние могут превысить прочность материала на растяжение. Полноценный расчет напряженно-деформированного состояния вязкоупругого материала в двух- или трехмерной постановке в неоднородном нестационарном поле температур является сложной задачей и для ее упрощения мы воспользуемся приближенным методом Хиллса и Брайена, сводящим данную задачу к последовательности упругих задач [97]. В соответствии с методом, весь промежуток времени  $t \in [0, \tau]$ , на котором вычисляются температурные напряжения, разбивается последовательностью точек  $0 = t_1, t_2, \dots, t_N = \tau$  на малые равные промежутки длительностью  $\Delta t$  и напряжение в момент времени  $t_{k+1}$  определяют суммированием:

$$\sigma(t_{k+1}) = \alpha \sum_{p=1}^k S(\Delta t, T_p)(T_{p+1} - T_p), \quad (2.7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент температурного расширения асфальтобетона,

$T_p = T(t_p)$  – температура в момент времени  $t_p$

$S(\Delta t, T)$  – модуль жесткости асфальтобетона при длительности нагружения  $\Delta t$  и температуре  $T$ .

В начале расчета температурные напряжения полагают нулевыми:  $\sigma(t_1) = 0$ . Основным недостатком метода Хиллса и Брайена называют отсутствие учета эффекта релаксации напряжений при длительных воздействиях нагрузок [98]. Однако в том же исследовании приводится сравнение температурных напряжений, вычисленных по данному методу, с экспериментальными напряжениями, измеренными при понижении температуры образца с  $6^\circ\text{C}$  до  $-20^\circ\text{C}$  со скоростью  $10^\circ\text{C}/\text{час}$ . Испытанию подвергались образцы на нескольких видах битума и в результате выявлено удовлетворительное согласие теории с экспериментом, причем для некоторых образцов теория давала завышенные напряжения, а для других – заниженные. Можно сделать вывод, что в указанном температурном диапазоне в течение примерно 3 часов релаксацией напряжений в асфальтобетоне действительно можно пренебречь. Опираясь на эту гипотезу, представим эпюру температуры по глубине дорожной одежды как суперпозицию медленно меняющейся сезонной температуры  $T_{\text{сез}}(t)$  и быстро меняющейся суточной  $T_{\text{сут}}(t)$ . После анализа экспериментальных данных с зонда №118 на трассе М-11, учитывая, что верхний датчик температуры находится не на поверхности, а на глубине 6 см, для сезонной температуры на поверхности дорожной одежды примем

$$T_{\text{сез}}(t)|_{x=0} = 10 - 18 \cos\left(\frac{2\pi}{365}(t-15)\right), \quad (2.8)$$

где  $t$  измеряется в сутках, начиная с 1 января 2019 г. (представлено на рисунке 2.6).

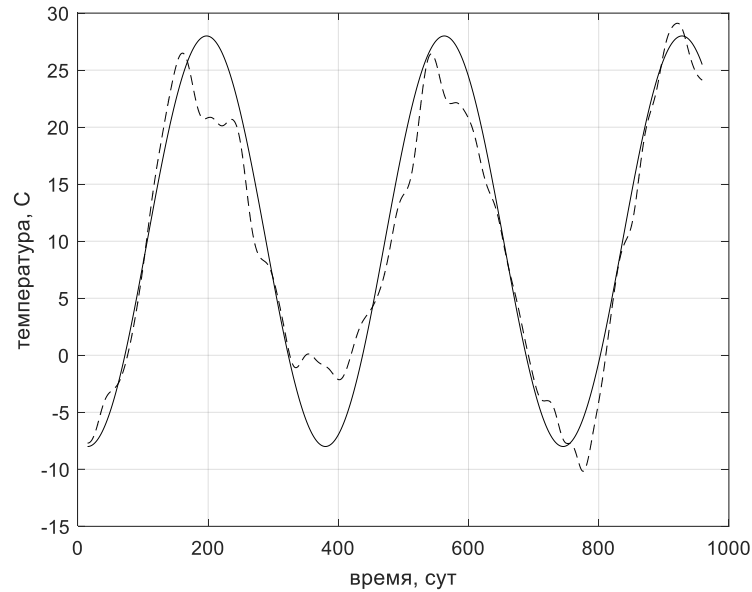
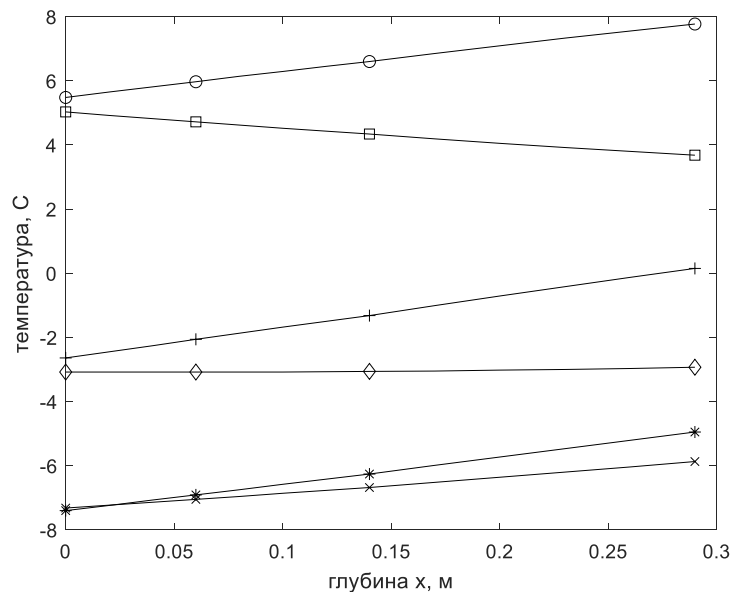


Рисунок 2.6 - Наблюдаемые (пунктир) и принятые в расчет (сплошная) сезонные колебания температуры на поверхности асфальта

Примеры сезонных профилей температур в слоях асфальтобетона общей толщиной 29 см, возникающих при использовании (2.8), показаны на рисунке 2.7.



(o) – 1 ноября, (+) – 1 декабря, (\*) – 1 января, (x) – 1 февраля, (◇) – 1 марта, (□) – 1 апреля  
Рисунок 2.7 - Моделирование распределения температур по слоям асфальтобетона

Будем считать, что сезонные изменения температуры  $T_{сез}(t, x)$  настолько медленные, что не приводят к появлению температурных напряжений. На фоне сезонного профиля возможны быстрые суточные изменения температуры, вызывающие температурные напряжения. Анализ показаний верхнего датчика температуры за период с 14.01.2019 по 16.08.2021 выявил следующие экстремальные участки зависимостей температуры от времени (представлено в таблице 2.6).

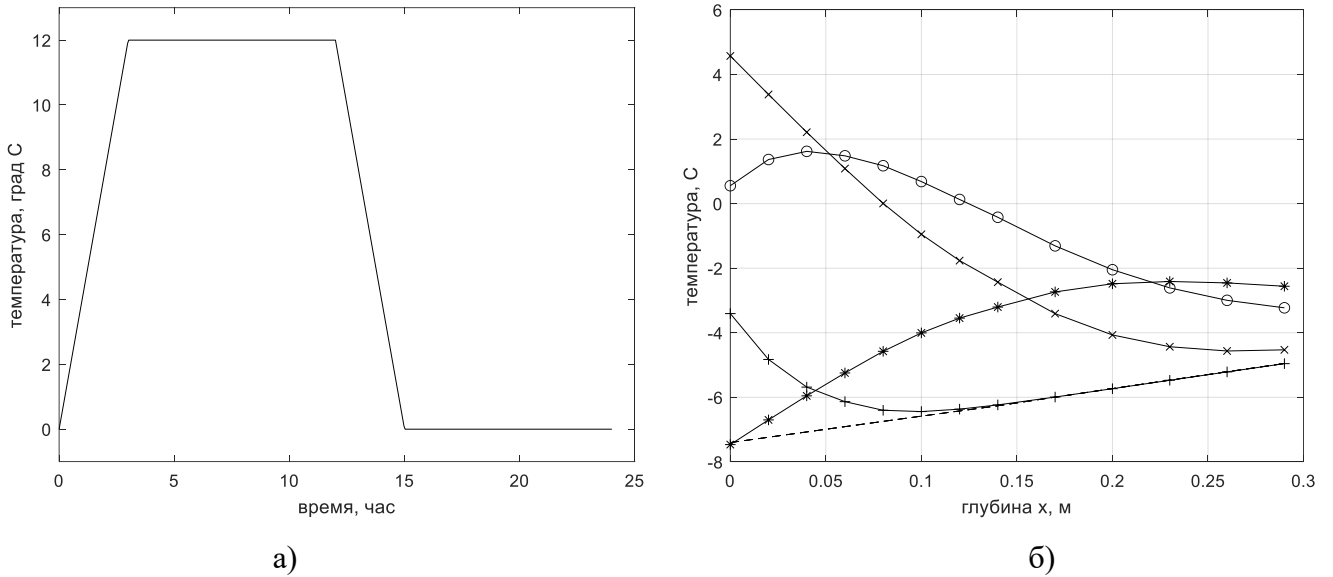
Таблица 2.6 - Изменения температур в анализируемый период

Максимальное понижение температуры в течение суток в холодное время года	10-11 марта за 14 часов температура уменьшилась с -6°C до -18°C
Максимальное понижение температуры в течение суток за все время наблюдения	22-23 июня за 14 часов температура уменьшилась с 40°C до 19°C
Максимальное повышение температуры в течение суток в холодное время года	25 марта за 8 часов температура увеличилась с -7°C до 8°C
Максимальное понижение температуры за 1 час в холодное время года	16 марта температура с 15 до 16 часов понизилась на 1.6°C
Максимальное повышение температуры за 1 час в холодное время года	25 марта температура с 09 до 10 часов повысилась на 2.6°C
Максимальное понижение температуры за 1 час за все время наблюдения	9 июля температура с 16 до 17 часов понизилась на 4.4°C
Максимальное повышение температуры за 1 час за все время наблюдения	8 июня температура с 09 до 10 часов повысилась на 3.5°C
Минимальная средняя температура по всем асфальтобетонным слоям в течение суток	18-19 января средняя температура равнялась -19°C

Объединяя максимальное наблюдаемое суточное понижение температуры в холодное время года ( $\Delta T = 12$  град) с максимальной наблюдаемой скоростью ее изменения ( $\Delta T / \Delta t = 4$  град/час), примем следующую модельную функцию суточного изменения температуры:

$$T_{\text{сут}} = \pm \begin{cases} 4t, & t \in [0, 3); \\ 12, & t \in [3, 12); \\ 4(15 - t), & t \in [12, 15); \\ 0, & t \in [15, 24). \end{cases} \quad (2.9)$$

При выборе в (2.9) знака "+", суточная температура линейно возрастает в течение 3 часов со скоростью 4°C/час и фиксируется в течение 9 часов на отметке +12°C к сезонной температуре, а затем за 3 часа возвращается к 0°C с той же скоростью (представлено на рисунке 2.8а). При выборе знака "-", в начале происходит понижение температуры, а затем ее повышение. Суточная модель призвана выявить самые неблагоприятные температурные режимы, приводящие к максимальным температурным напряжениям. Пример суперпозиции сезонной и суточной температур – на рисунке 2.8б.



(а) – суточное изменение температуры при выборе “+”; (б) – суперпозиции сезонного и суточного распределений для начала января: (+) – через 1 час, (x) – через 7 часов, (o) – через 13 часов, (\*) – через 19 часов

Рисунок 2.8 - Изменение температуры

Модель вязкоупругих свойств асфальтобетона. Для проведения расчета напряжений при разных суперпозициях сезонной и суточной температур необходимо определить зависимость модуля жесткости от времени нагружения и температуры  $S = S(\Delta t, T)$ . Для этого воспользуемся подходом, предложенным в работах [80, 81].

В 1954 г. Ван дер Поль ввел понятие модуля жесткости вязкоупругих материалов и, основываясь на своих экспериментальных данных, опубликовал номограмму для определения модулей жесткости различных битумов, вошедшую во все руководства по определению механических параметров битумосодержащих композиций [99]. С тех пор было предложено немало эмпирических формул, построенных на основе номограммы Ван дер Поля и одна из самых удачных попыток принадлежит авторам [80, 81], согласно которой модуль жесткости чистого битума предлагается вычислять следующим образом:

$$S_b = E_g \left[ 1 + \left( \frac{E_g t}{3\eta} \right)^\beta \right]^{-\frac{1}{\beta}}, \quad (2.10)$$

где  $E_g$  – среднее значение мгновенного продольного модуля битума (так называемый модуль стеклования битума,  $g \equiv glass$ ), принимаемое 2460 МПа для всех типов битумов,

$t$  – момент времени,

$\beta$  – постоянный коэффициент, зависящий от индекса пенетрации битума PI:

$$\beta = \frac{0.1794}{1 + 0.2084PI - 0.00524PI^2}, \quad (2.11)$$

и  $\eta$  – сдвиговая ньютоновская вязкость,  $[\eta] = \text{МПа} \cdot \text{с}$

$$\eta = a_{Ahr} (T) \eta (PI), \quad (2.12)$$

являющаяся произведением функции температурно-временного смещения Аррениуса

$$a_{Ahr} (T) = \exp \left[ 11720 \frac{3(30 + PI)}{5(10 + PI)} \left( \frac{1}{T + 273} - \frac{1}{T_{rb} + 263} \right) \right] \quad (2.13)$$

и приведенной вязкости, подобранной в соответствии с данными Ван дер Поля

$$\eta (PI) = 0.00124 \left[ 1 + 71 \exp \left( - \frac{12(20 - PI)}{5(10 + PI)} \right) \right] \exp \left( \frac{0.2011}{0.11 + 0.0077PI} \right). \quad (2.14)$$

Таким образом, модуль жесткости битума  $S_b(t, T)$  в данной модели можно вычислить, задав только два параметра битума – его индекс пенетрации  $PI$  и температуру размягчения  $T_{rb}$ .

Модуль жесткости асфальтобетонного композита, согласно [80], определяется так:

$$S_{mix} = P_c \left[ E_{agg} \cdot (1 - VMA) + S_b \cdot VMA \cdot VFA \right] + (1 - P_c) \left[ \frac{1 - VMA}{E_{agg}} + \frac{VMA}{S_b \cdot VFA} \right]^{-1}, \quad (2.15)$$

где  $E_{agg}$  и  $VMA$  – модуль упругости и пористость минерального наполнителя,

$VFA$  – доля межзерновых пор, заполненных битумом

$P_c$  – контактный множитель, задающий баланс между последовательными и параллельными соединениями элементов асфальтобетонного композита:

$$P_c = \frac{\left(0.138 + S_b \frac{VFA}{VMA}\right)^{0.58}}{36.3 + \left(S_b \frac{VFA}{VMA}\right)^{0.58}}. \quad (2.16)$$

Для вычисления  $S_{mix}$  требуется найти  $S_b$  по формуле (2.10) и задать 3 параметра  $E_{agg}$ ,  $VMA$  и  $VFA$ .

Выбирая за основу конструкцию дорожной одежды М-11 (представлено в таблице 2.5), слои которой имеют в составе битум БНД 60/90, примем следующие параметры, которые указаны в таблице 2.8.

При выборе параметров  $PI$  и  $T_{rb}$  для старого асфальтобетона было учтено, что за 5-7 лет эксплуатации пенетрация битума (выраженная в мм погружения иглы) достигает 0.3-0.4 от первоначального значения, а температура размягчения повышается примерно в 1.2 раза [80]. Структурные параметры  $VMA$  и  $VFA$  соответствуют усредненным показателям дорожных асфальтобетонных смесей и обеспечивают объемное содержание воздушных пор 3.5% для плотного асфальтобетона и 7.2% для пористого, что соответствует условиям п. 6.2.3 [100]. Зависимости модуля жесткости  $S_{mix}$  от температуры при длительности нагружения 1800 с., вычисленные в соответствии с параметрами в таблице 2.8, показаны на рисунке 2.9. Интересно отметить, что в процессе эксплуатационного старения модуль жесткости плотного асфальтобетона при умеренных отрицательных температурах (от  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $0^{\circ}\text{C}$ ) возрастает более чем в 2.5 раза.

Таблица 2.8 - Физико-механические характеристики слоев асфальтобетона

Материал	Индекс пенетрации $PI$	Температура размягчения $T_{rb}$ , $^{\circ}\text{C}$	Модуль упругости минерального наполнителя $E_{agg}$ , МПа	Пористость минерального наполнителя $VMA$	Доля межзерновых пор, заполненных битумом $VFA$
Новый плотный а/б (слой 1)	-0.5	47	30·10 <sup>3</sup>	0.14	0.75
Старый плотный а/б (слой 2)	-0.73	56		0.14	0.75
Старый пористый а/б (слой 3)	-0.73	56		0.18	0.6



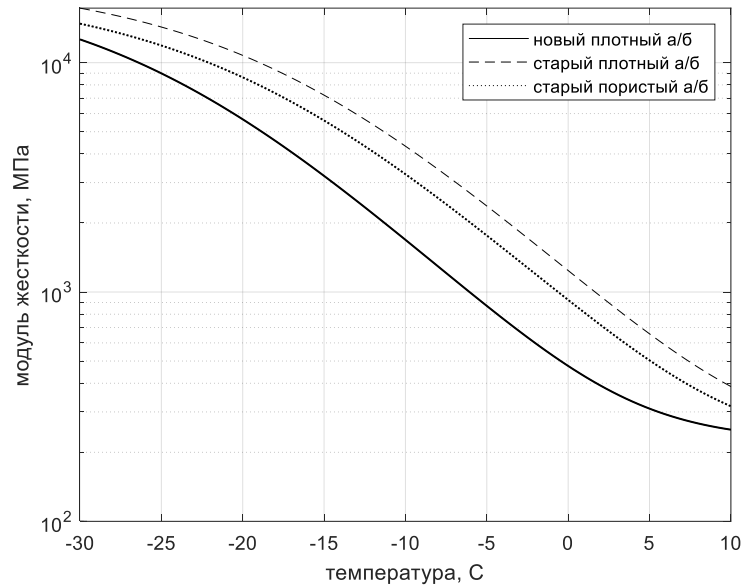


Рисунок 2.9 - Зависимости модуля жесткости асфальтобетона от температуры при длительности нагружения  $t=1800$  с

Основная расчетная модель. Для вычисления температурных напряжений, возникающих в рассматриваемой модели дорожной одежды, использовался метод конечных элементов в 2D постановке. В силу симметричности, для разбиения треугольной сеткой выбиралась правая половина одного сегмента (между вертикальными пунктирами А и В на рисунке 2.5). Влиянием температурных расширений/сжатий ЩПС, песка и грунтового основания, имеющих много меньшие жесткостные параметры в сравнении с асфальтобетоном, было решено пренебречь. Таким образом, непосредственно моделировались напряжения в “пироге”, состоящем из нового асфальтобетона, слоя армирования и двух слоев старого асфальтобетона (представлено на рисунке 2.10).

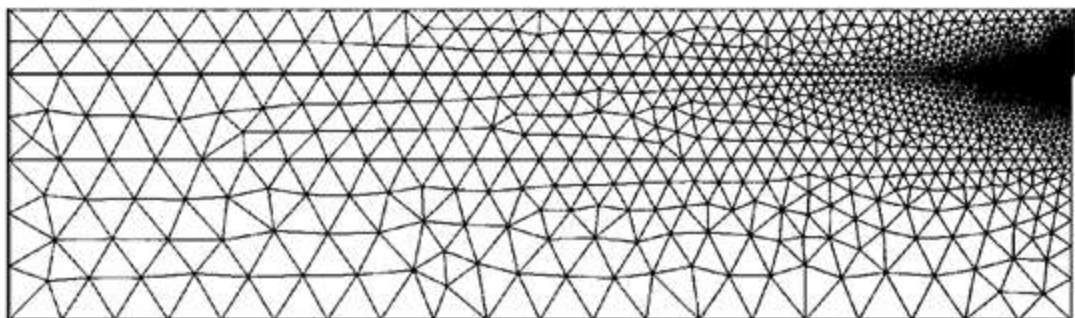


Рисунок 2.10 - Треугольная сетка метода конечных элементов

Армирование геосинтетическим материалом на основе стекловолокна разрывной прочностью 120 кН/м представляется тонким однородным слоем толщиной 1 мм с приведенным модулем упругости  $8 \cdot 10^3$  МПа. Оси координат имеют стандартные направления: Ох горизонтально вправо, Оу вертикально вверх, с началом в левом верхнем углу рассматриваемой половины сегмента длиной 1 м и высотой 0.291 м; на левой границе всех слоев ( $x=0$ ,

$-0.291 \leq y \leq 0$ ) и правой границе двух верхних слоев ( $x=1, -0.061 \leq y \leq 0$ ) задаются нулевые горизонтальные перемещения  $u_x = 0$ , на нижней границе ( $0 \leq x \leq 1, y = -0.291$ ) – нулевые вертикальные перемещения  $u_y = 0$ , остальные границы остаются свободными. Распределение по высоте сечения температур  $T(t, y)$ , которое задает распределение модулей жесткости  $S(t, y)$ , определяется из решения уравнения теплопроводности (2.2) для заданной суперпозиции сезонной и суточной температур на верхней поверхности сегмента  $y = 0$ ; боковые поверхности сегмента считаются теплоизолированными. Для нивелирования концентрации напряжений в окрестности вершины основной вертикальной трещины ( $x=1, y = -0.061$ ) введена область треугольной формы, имитирующая горизонтальную трещину на границе между слоем армирования и слоем старого асфальтобетона – модуль жесткости материала, заполняющего эту дополнительную трещину, линейно уменьшается до нуля при перемещении от вершины трещины к ее устью (представлено на рисунке 2.11). Допущение о существовании дополнительной трещины соответствует экспериментальным данным – в наших экспериментах по измерению прочности на растяжение при изгибе армированных асфальтобетонных балочек наблюдалось отслаивание нижнего слоя асфальтобетона от верхнего перед разрушением образца.

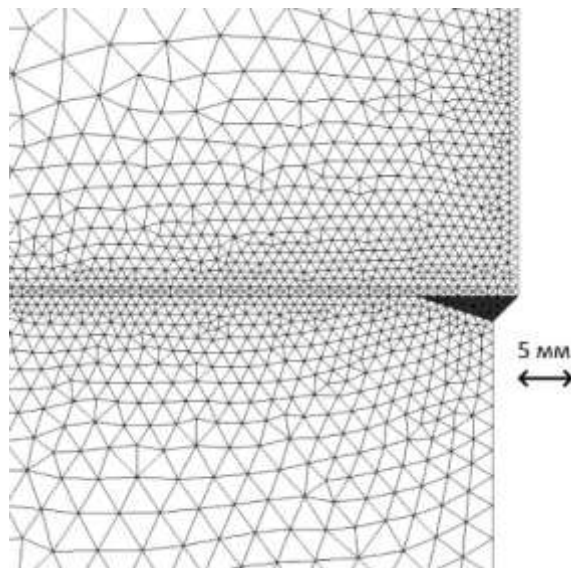


Рисунок 2.11 - Сгущение треугольной сетки в окрестности вершины вертикальной трещины. Темным цветом выделен треугольник дополнительной трещины

Для оценки влияния армирования на напряженное состояние конструкции, в слое нового асфальта вблизи вершины основной трещины выделялся горизонтальный отрезок  $0.95 \leq x \leq 1$  (расчетный отрезок), расположенный на расстоянии 2.5 мм от нижней границы этого слоя. В точках расчетного отрезка вычислялось напряжение  $\sigma_x$ , ответственное за возникновение

поперечных трещин в асфальтобетоне, для двух случаев – наличия и отсутствия слоя армирования.

## 2.7 Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния дорожной конструкции

На рисунке 2.12 показаны суточные изменения  $\max \sigma_x$  на расчетном отрезке для декабря – марта, при выборе «-» в формуле (2.7).

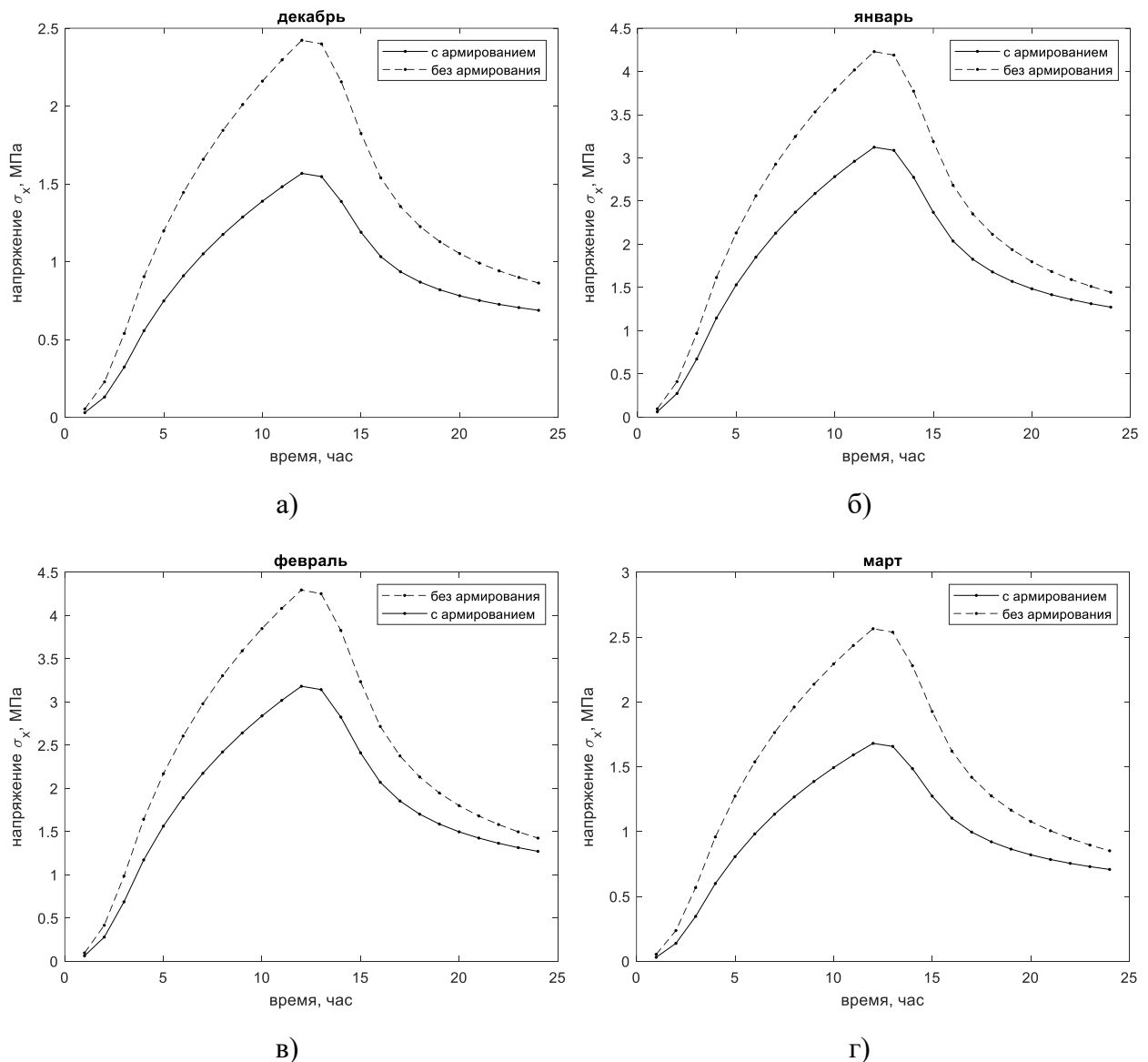


Рисунок 2.12 - Суточные изменения  $\max \sigma_x$

Характер кривых схож и показывает, что максимальное напряжение достигается в конце фазы постоянного отрицательного приращения температуры, перед началом возвращения температуры к среднесезонным значениям. Применение армирования позволяет существенно

снизить растягивающие напряжения в новом слое асфальтобетона – от 25% до 35%. В январе-феврале максимум напряжений достигает 4.3 МПа, что приближается к средней прочности асфальтобетона при  $T < -10^{\circ}\text{C}$ , равной 5 МПа. Локальные вариации прочности вместе с воздействием дополнительной нагрузки от транспортных средств могут привести к прорастанию трещины старого асфальтобетонного слоя в новый слой. В армированном слое максимум напряжений существенно ниже и вероятность продолжения роста трещины многократно ниже. Напряжения в стекловолокне при этом не превосходят 130 МПа и остаются много меньшими предельной прочности на разрыв (около 900 МПа). Таким образом, малая деформативная способность асфальтобетона при низкой температуре не позволяет в полной мере использовать высокие прочностные качества армирующего материала.

На рисунке 2.13 показано распределение напряжения  $\sigma_x$  по расчетному отрезку (горизонтальная координата – смещение влево от вершины трещины). Применение армирования геосинтетическим материалом значительно уменьшает уровень напряжений в окрестности  $\pm 1$  см от вершины трещины.

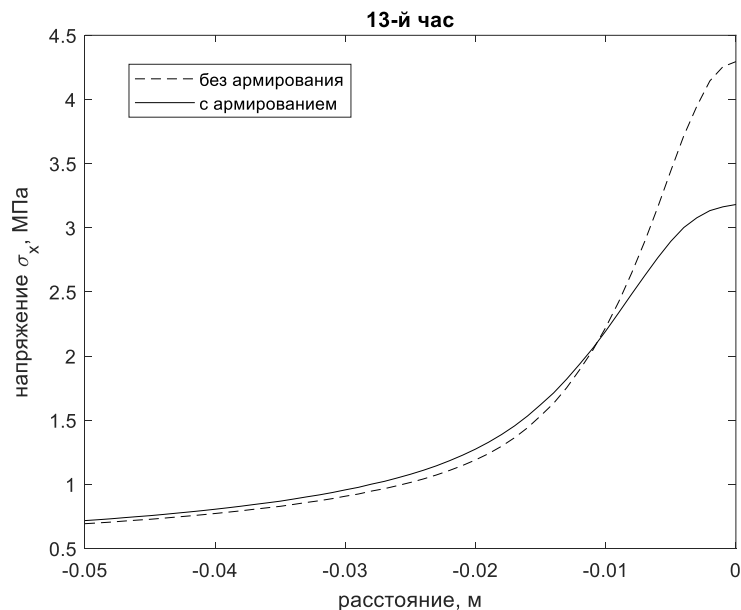


Рисунок 2.13 - Распределение растягивающих напряжений в окрестности вершины трещины к началу 13-го часа изменения суточной температуры в феврале

На рисунке 2.14 для того же 13-го часа показано распределение температуры и модуля жесткости по толщине дорожной одежды. Как указывалось выше, старение битума в составе асфальтобетона приводит к росту модуля жесткости последнего.

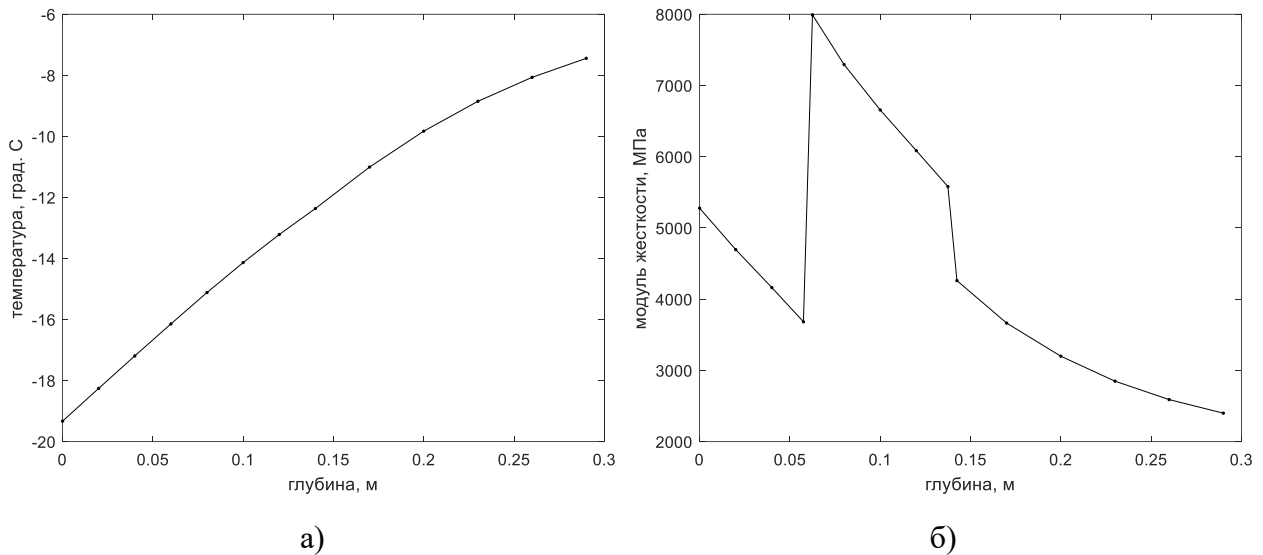


Рисунок 2.14 - Распределение а) температуры и б) модуля жесткости по толщине дорожной одежды

На рисунке 2.15 показано напряжение в слое с армированием и без него. Из графика видно, что на расстоянии до 1 см напряжение в армированной конструкции ниже. Моделирование показало, что армирование покрытия ГМ снижает растягивающие напряжения в верхнем слое асфальтобетона на 25-35 %.

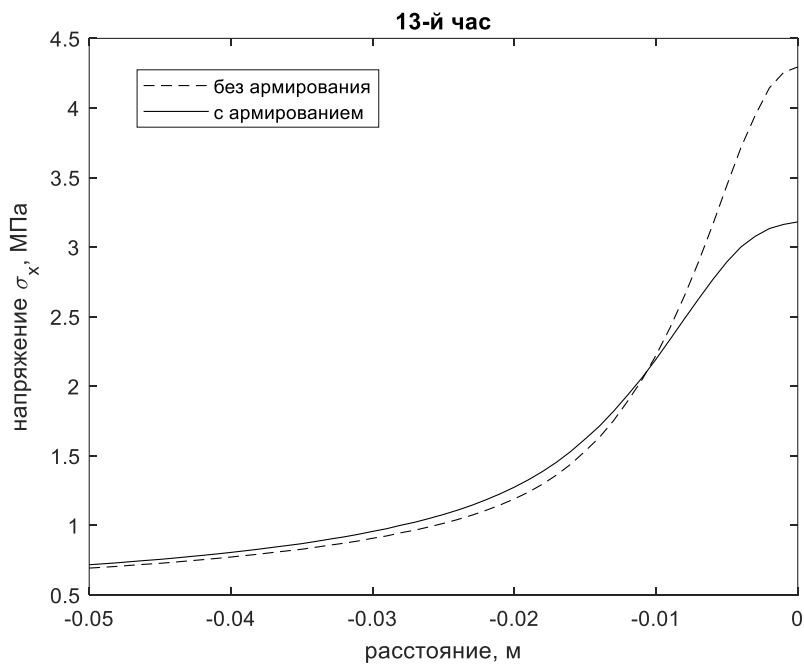


Рисунок 2.15 - Напряжение в слое покрытия с армированием и без него на основе разработанной модели

На рисунке 2.16 показано влияние приведенного модуля упругости ГМ на уровень растягивающих напряжений при средних температурах 4 холодных месяцев.

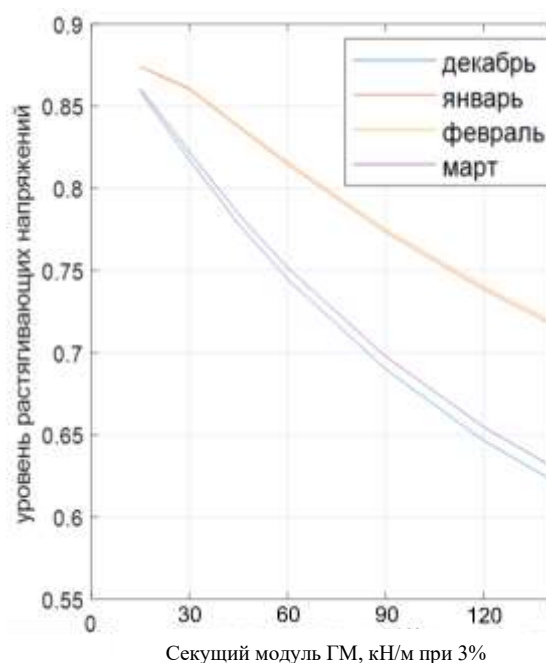


Рисунок 2.16 - Влияние приведенного модуля упругости ГМ на уровень растягивающих напряжений при средних температурах 4 холодных месяцев

## 2.8 Расчет конструкций с применением геосинтетических материалов и без

Изучение влияния армирования геосинтетическими материалами асфальтобетонных слоев дорожной одежды подтверждает, что применение геосинтетических материалов позволяет снизить уровень растягивающих напряжений в асфальтобетонных слоях, что ведет к увеличению их долговечности и надежности. Результаты расчетов показывают, что использование георешеток с высокой прочностью при растяжении и малым относительным удлинением является наиболее эффективным способом повышения устойчивости асфальтобетонных покрытий к воздействию транспортных нагрузок и климатических факторов.

Наряду с армированием асфальтобетонных слоев дорожной одежды, геосинтетические материалы применяются и для армирования слоев оснований дорожной одежды из дискретных (минеральных) материалов. Однако нормированные методы расчета дорожных конструкций, учитывающие механические свойства различных видов применяемых геосинтетических материалов, на сегодняшний день еще не разработаны.

Ранее проведенные исследования, направленные на улучшение процесса строительства железных дорог, продемонстрировали высокую эффективность ГМ для армирования слоев из минеральных материалов [101].

Таким образом, внедрение геосинтетических материалов в дорожное строительство открывает новые возможности для повышения качества и долговечности автомобильных дорог, что является важным шагом на пути к созданию современной и надежной отечественной транспортной инфраструктуры.

Проектирование нежестких дорожных одежд является одной из ключевых задач в дорожном строительстве. Современные методики проектирования предусматривают использование различных материалов и технологий для повышения долговечности и эксплуатационных характеристик дорог. Нежесткие дорожные одежды представляют собой многослойные конструкции, состоящие из материалов, таких как асфальтобетон, щебень, песок и другие.

Теория упругости для многослойного полупространства позволяет моделировать напряженно-деформированное состояние (НДС) многослойных конструкций при воздействии внешних нагрузок. В рамках данной теории рассматриваются упругие свойства каждого слоя, а также взаимодействие слоев между собой. Расчеты проводятся с использованием решений задач теории упругости, что позволяет учитывать сложные взаимодействия между конструктивными слоями и внешними нагрузками.

Ранее действовавшие методики проектирования нежестких дорожных одежд в Российской Федерации [102, 103, 104] предусматривали приведение многослойных конструкций к упрощенным расчетным схемам, таким как однослойное и двухслойное полупространство. Это было обусловлено высокой сложностью вычисления напряжений и деформаций в многослойных системах. Однако использование упрощенных схем приводит к погрешностям в расчетах, что может отрицательно сказываться на надежности и долговечности дорожных одежд.

Стандарт, применяемый для расчета [105], в настоящее время утратил свою силу. Дорожная отрасль ожидает новый документ национальной системы стандартизации на его основе. Важно отметить, что [105] был разработан на основе [106], и новая версия стандарта позволит углубить документ, учитывая особенности применения новых материалов. Основная цель методики расчета дорожной одежды, разработанной в рамках [105], заключается в обеспечении надежности и долговечности нежестких дорожных конструкций.

Методика допускает использование теории упругости для многослойного полупространства, что позволяет учитывать сложные взаимодействия между слоями дорожной одежды и внешними нагрузками. В отличие от упрощенных моделей, таких как однослойное или двухслойное полупространство, использование многослойных моделей позволяет более точно определять напряжения и деформации, возникающие в дорожной одежде.

В рамках стандарта [105] разработаны алгоритмы расчета напряженно-деформированного состояния (НДС), обеспечивающие высокую точность и надежность результатов. Основные этапы этого расчета включают:

Определение исходных данных. На первом этапе определяется состав многослойной конструкции дорожной одежды, включая типы материалов, их упругие свойства, толщины слоев и другие параметры;

Моделирование многослойного полупространства. На основе исходных данных создается модель многослойного полупространства, включающая все слои дорожной одежды. В этой модели учитываются взаимодействия между слоями и воздействие внешних нагрузок;

Решение задачи теории упругости. Для расчета НДС применяется алгоритм, основанный на решении осесимметричной задачи теории упругости для многослойного полупространства. Этот алгоритм позволяет определить напряжения и деформации в каждом слое конструкции, учитывая его упругие свойства и взаимодействие с соседними слоями;

Анализ результатов. На заключительном этапе проводится анализ полученных данных, включая расчетные значения напряжений, деформаций и других параметров НДС. Эти результаты используются для оценки прочности и долговечности дорожной одежды, а также для принятия решений о необходимости внесения изменений в проектируемую конструкцию автомобильной дороги.

Использование таких алгоритмов обеспечивает более точное моделирование и расчет НДС многослойных дорожных конструкций, что способствует повышению надежности и долговечности автомобильных дорог.

Применение многослойных моделей значительно уменьшает погрешности, характерные для упрощенных расчетных схем, что обеспечивает более точное определение параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) и, следовательно, более надежное проектирование дорожных конструкций. Кроме того, методика позволяет использовать современные программные комплексы для автоматизации расчетов, что упрощает процесс проектирования и сокращает время, необходимое для выполнения расчетов. Автоматизация также минимизирует влияние человеческого фактора и снижает вероятность ошибок при проведении расчетов.

Современные программные комплексы позволяют проводить расчеты НДС многослойных конструкций без приведения их к упрощенным схемам, что обеспечивает более точные результаты и позволяет учитывать все особенности многослойных систем. Один из таких методов включает применение алгоритмов, основанных на решении осесимметричной задачи теории упругости для многослойного полупространства [107]. Этот подход обеспечивает более точное моделирование напряжений и деформаций, что, в свою очередь, способствует созданию более надежных и долговечных дорожных конструкций.

Одним из таких программных комплексов является ПО «SigmaPro», разработанное и представленное АНО «НИИ ТСК» совместно с ООО «НТЦ «Геотехнологии». Это программное обеспечение предназначено для повышения эффективности проектирования и анализа дорожных конструкций, обеспечивая точное моделирование и оценку различных параметров дорожных одежд.



Основное назначение «SigmaPro» заключается в автоматизации и упрощении процессов расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) многослойных дорожных конструкций. Программа учитывает такие исходные данные, как количество слоев дорожной одежды и виды контактов на границе слоев (спаянный, гладкий), давление колеса на покрытие, расчетный диаметр отпечатка колеса при динамическом и статическом воздействиях, толщины и модули упругости слоев конструкции.

Ключевые особенности и возможности «SigmaPro» включают:

- многослойное моделирование. «SigmaPro» позволяет создавать модели многослойных дорожных конструкций, учитывая все слои и их взаимодействие, что обеспечивает более точное представление реальных условий эксплуатации дорог;

- расчет НДС. Программа использует методы теории упругости для расчета напряжений и деформаций в дорожных одеждах, что позволяет прогнозировать поведение конструкции под нагрузками и выявлять потенциальные зоны риска;

- автоматизация расчетов. Программное обеспечение автоматизирует сложные вычислительные процессы, значительно ускоряя работу инженеров и снижая вероятность ошибок. Возможность изменения параметров и повторного расчета конструкции упрощает процесс проектирования;

- интеграция с нормативной базой. «SigmaPro» поддерживает интеграцию с действующими нормативными документами, такими как [105] и комплекс стандартов ГОСТ Р 58406, что обеспечивает соответствие расчетов современным стандартам.

Таким образом, программное обеспечение «SigmaPro» является мощным инструментом для проектных и исследовательских организаций, позволяющим повысить точность и надежность проектных решений, сократить время на выполнение расчетов и анализ данных, улучшить качество дорожных конструкций за счет оптимизации их параметров и обеспечить соответствие проектной документации действующим национальным стандартам.

В качестве объекта расчета рассмотрена автомобильная дорога IV категории с двумя полосами движения, расположенная в III дорожно-климатической зоне, с капитальным типом дорожной одежды и легкой супесью в качестве грунта рабочего слоя земляного полотна (представлено на рисунке 2.17). На основе этой конструкции автомобильной дороги и исходных данных о типовых значениях дорожно-строительных материалов был проведен анализ вклада геосинтетического материала в несущую способность дороги. Оценка проводилась методом сравнения несущей способности дорожной конструкции, армированной геосинтетическим материалом, с аналогичной конструкцией, не содержащей геосинтетических материалов.

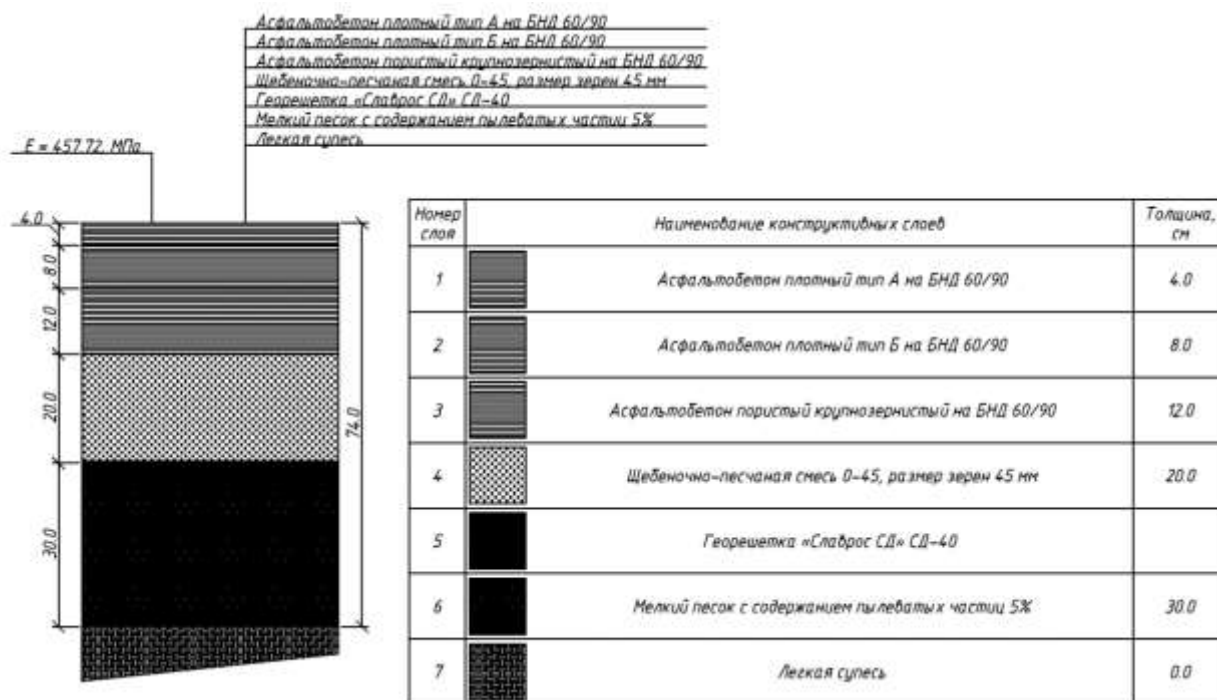


Рисунок 2.17 - Схема конструкции автомобильной дороги IV категории с армированием геосинтетическим материалом

Расчет был проведен с использованием двух программных комплексов:

- «Топоматик Robur – Дорожная одежда» (далее «Robur») в соответствии с [108] и [105];
- «SigmaPro» в соответствии с приложением Д [105] и [109].


Результаты расчета в «Robur» следующие:

- модуль упругости конструкции без использования геосинтетического материала составляет 440 МПа;
- модуль упругости конструкции, армированной геосинтетическим материалом, составляет 458 МПа.

Повышение модуля упругости на 4 % приводит к увеличению суммарного числа приложений расчетной нагрузки в 11,5 т на 27 % (4 240 000 для неармированной конструкции и 5 784 000 для армированной конструкции).

Применение программы «SigmaPro» иллюстрируется на рисунках 2.18-2.22 для конструкции без геосинтетического материала.

**Расчет параметров напряженно-деформированного состояния многослойной конструкции дорожной одежды**




### Общие входные параметры

Количество слоев дорожной одежды (1÷6)	<input type="text" value="6"/>
Давление колеса на покрытие P, [МПа]	<input type="text" value="0.80"/>
Расчетный диаметр отпечатка колеса при динамическом действии нагрузки D0, [м]	<input type="text" value="0.345"/>
Расчетный диаметр отпечатка колеса при статическом действии нагрузки Dst, [м]	<input type="text" value="0.303"/>
Общая толщина дорожной одежды и рабочего слоя земляного полотна hpc, [м]	<input type="text" value="1.50"/>

Вперед

Рисунок 2.18 - Программа «SigmaPro», общие входные параметры

**Расчет параметров напряженно-деформированного состояния многослойной конструкции дорожной одежды**



Номер слоя	Толщина слоя [м]	Расчет упругого прогиба		Расчет растягивающих напряжений в монолитных слоях из асфальтобетона		Расчет активных напряжений сдвига в малосвязных слоях					
		Модуль упругости материала слоя [МПа]	Коэффициент Пуассона материала слоя	Модуль упругости материала слоя [МПа]	Коэффициент Пуассона материала слоя	При динамическом действии нагрузки			При статическом действии нагрузки		
						Модуль упругости материала слоя [МПа]	Коэффициент Пуассона материала слоя	Угол внутреннего трения материала слоя [град]	Модуль упругости материала слоя [МПа]	Коэффициент Пуассона материала слоя	Угол внутреннего трения материала слоя [град]
Слой 1	<input type="text" value="0.04"/>	<input type="text" value="3200"/>	<input type="text" value="0.30"/>	<input type="text" value="4500"/>	<input type="text" value="0.25"/>	<input type="text" value="1100"/>	<input type="text" value="0.35"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="420"/>	<input type="text" value="0.35"/>	<input type="text" value="0"/>
Слой 2	<input type="text" value="0.08"/>	<input type="text" value="3200"/>	<input type="text" value="0.30"/>	<input type="text" value="4500"/>	<input type="text" value="0.25"/>	<input type="text" value="1100"/>	<input type="text" value="0.35"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="350"/>	<input type="text" value="0.35"/>	<input type="text" value="0"/>
Слой 3	<input type="text" value="0.12"/>	<input type="text" value="2000"/>	<input type="text" value="0.30"/>	<input type="text" value="2000"/>	<input type="text" value="0.25"/>	<input type="text" value="700"/>	<input type="text" value="0.35"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="320"/>	<input type="text" value="0.35"/>	<input type="text" value="0"/>
Слой 4	<input type="text" value="0.20"/>	<input type="text" value="240"/>	<input type="text" value="0.25"/>	<input type="text" value="240"/>	<input type="text" value="0.25"/>	<input type="text" value="240"/>	<input type="text" value="0.25"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="240"/>	<input type="text" value="0.25"/>	<input type="text" value="0"/>
Слой 5	<input type="text" value="0.30"/>	<input type="text" value="100"/>	<input type="text" value="0.27"/>	<input type="text" value="100"/>	<input type="text" value="0.27"/>	<input type="text" value="100"/>	<input type="text" value="0.27"/>	<input type="text" value="23"/>	<input type="text" value="100"/>	<input type="text" value="0.27"/>	<input type="text" value="0"/>
Слой 6	<input type="text" value="Infinity"/>	<input type="text" value="85"/>	<input type="text" value="0.35"/>	<input type="text" value="85"/>	<input type="text" value="0.35"/>	<input type="text" value="85"/>	<input type="text" value="0.35"/>	<input type="text" value="23"/>	<input type="text" value="85"/>	<input type="text" value="0.35"/>	<input type="text" value="31"/>

Назад    Вперед

Рисунок 2.19 - Программа «SigmaPro», входные параметры слоев конструкции дорожной одежды

Расчет параметров напряженно-деформированного состояния многослойной конструкции дорожной одежды

Граница слоев 2 и 3      Граница слоев 3 и 4

Для расчета растягивающих напряжений в монолитных слоях из асфальтобетона

Гладкий  Спаянный      Гладкий  Спаянный

Назад      Вперед

Рисунок 2.20 - Программа «SigmaPro», входные параметры выбора вида границы слоев

Расчет параметров напряженно-деформированного состояния многослойной конструкции дорожной одежды

Координаты расчетной точки 1 для вычисления активных напряжений сдвига в малосвязных слоях основания:

Смещение расчетной точки от оси симметрии (координата по горизонтали)	г	м	<input type="text" value="0"/>
Глубина расположения расчетной точки от поверхности (координата по вертикали)	z	м	<input type="text" value="0.75"/>

Координаты расчетной точки 2 для вычисления активных напряжений сдвига в малосвязных слоях основания:

Смещение расчетной точки от оси симметрии (координата по горизонтали)	г	м	<input type="text"/>
Глубина расположения расчетной точки от поверхности (координата по вертикали)	z	м	<input type="text"/>

Координаты расчетной точки для вычисления растягивающих напряжений в монолитных слоях из асфальтобетона:

Смещение расчетной точки от оси симметрии (координата по горизонтали)	г	м	<input type="text" value="0"/>
Глубина расположения расчетной точки от поверхности (координата по вертикали)	z	м	<input type="text" value="0.24"/>

Координаты расчетной точки для вычисления растягивающих напряжений в промежуточных монолитных слоях основания:

Смещение расчетной точки от оси симметрии (координата по горизонтали)	г	м	<input type="text"/>
Глубина расположения расчетной точки от поверхности (координата по вертикали)	z	м	<input type="text"/>

Координаты расчетной точки для вычисления величины вертикального смещения:

Смещение расчетной точки от оси симметрии (координата по горизонтали)	г	м	<input type="text" value="0"/>
Глубина расположения расчетной точки от поверхности (координата по вертикали)	z	м	<input type="text" value="0"/>

Назад      Вычислить

Рисунок 2.21 - Программа «SigmaPro», входные параметры точек расчета

Расчет параметров напряженно-деформированного состояния многослойной конструкции дорожной одежды



Результаты расчета упругого прогиба и общего модуля упругости конструкции, как многослойного упругого полупространства:

Упругий прогиб	Supr	мм	0.67677
Общий модуль упругости конструкции	Egen	МПа	369.26551
Величина вертикального смещения в точке $r=0$ м, $z=0$ м	W	мм	0.67677

Рисунок 2.22 - Программа «SigmaPro», результат расчета конструкции без армирования ГМ

Для учета геосинтетического материала в дорожной конструкции были проведены полевые испытания, направленные на определение модуля упругости конструкции. Методом обратного пересчета был определен модуль упругости слоя щебеночно-песчаной смеси (ЩПС) с геосинтетическим материалом в конструктивном слое основания толщиной 20 см. Для расчета модуля упругости слоя, включающего геосинтетический материал и слой ЩПС, необходимы следующие параметры: общий модуль упругости на поверхности нижележащего слоя, толщина устраиваемого слоя, общий модуль упругости на поверхности устроенного слоя.

На основе полученных данных рассчитывается фактический модуль упругости материала в конструкции, который затем можно сопоставить с проектным значением данного материала и учесть при определении параметров напряженно-деформированного состояния (НДС). Определение модулей упругости проводилось при послойных испытаниях по методике, аналогичной представленной в [110].

На графике, представленном на рисунке 2.23, показана зависимость модуля упругости щебеночно-песчаного слоя, армированного геосинтетическим материалом, от толщины слоя над геосинтетикой. Из анализа рисунка 2.23 следует, что с увеличением толщины конструктивного слоя влияние геосинтетического материала на модуль упругости снижается, и данный показатель стремится к модулю упругости щебеночно-песчаной смеси (ЩПС) без армирования. Данные получены на основе испытаний двух георешеток в одинаковой конструкции.

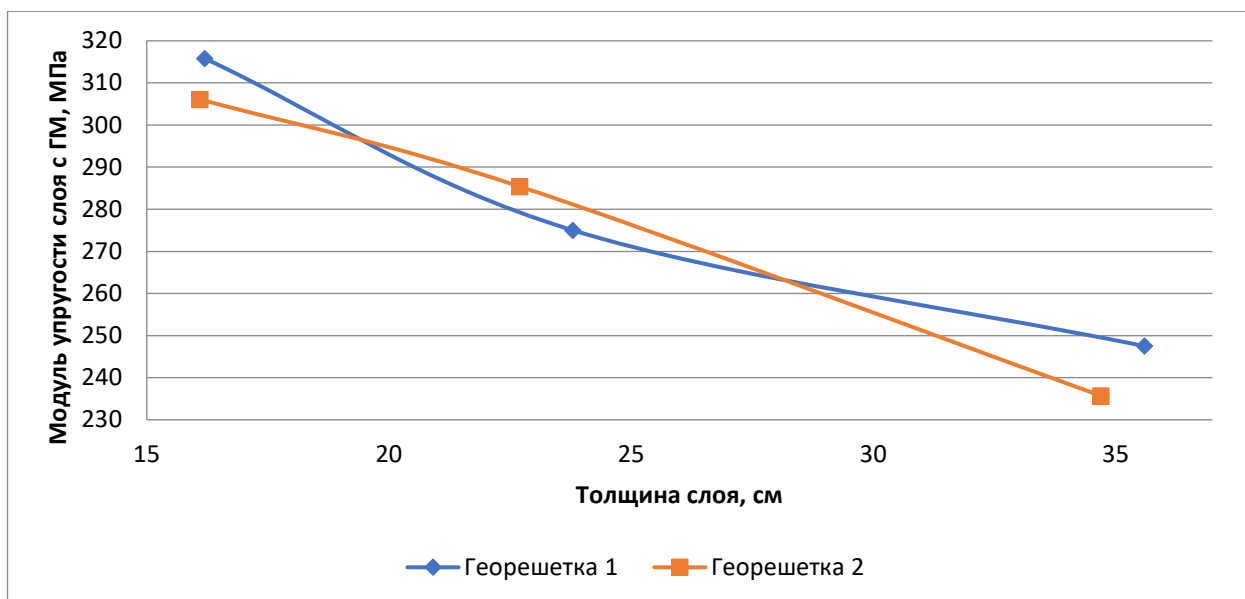


Рисунок 2.23 - Зависимость модуля упругости слоя, армированного ГМ, от толщины слоя  
 Результат расчета армированной конструкции в «SigmaPro» приведен на рисунке 2.24.

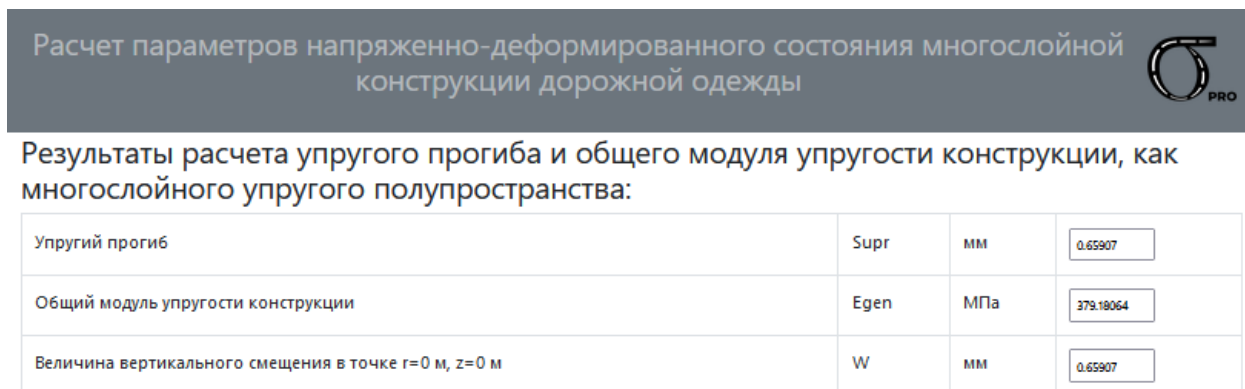


Рисунок 2.24 - Программа «SigmaPro», результат расчета конструкции, армированной ГМ

Результаты расчета двух дорожных конструкций, выполненные с использованием программы «SigmaPro», показывают, что вклад геосинтетического материала составляет всего 3% (модуль упругости неармированной конструкции составляет 369 МПа, тогда как армированной — 379 МПа). При этом увеличение суммарного числа приложений расчетной нагрузки составило 16% (1 179 000 для неармированной конструкции и 1 411 000 для армированной конструкции). Важно отметить, что в исходных данных для расчета были использованы результаты натуральных испытаний конкретных образцов геосинтетического материала в условиях, максимально приближенных к реальным, с учетом деградации его свойств из-за механических повреждений при укладке. Однако все еще не учитывается снижение прочностных характеристик геосинтетических материалов от других воздействий, которые возникают во время эксплуатации (морозостойкость, устойчивость к ультрафиолетовому излучению, устойчивость к микроорганизмам и др.) [111, 112].

Таким образом, внедрение геосинтетических материалов в дорожное строительство представляет собой перспективный и эффективный метод повышения качества и долговечности автомобильных дорог. Использование этих материалов в сочетании с современными программными инструментами обеспечивает более точное моделирование и расчет напряженно-деформированного состояния дорожных конструкций, что способствует их оптимизации и повышению эксплуатационных характеристик.

## 2.9 Выводы по главе 2

1) Предложена усовершенствованная методология идентификации геосинтетических материалов, включающая классификацию, технические требования и методы испытаний. Это позволит создать систему национальных стандартов и отраслевых рекомендаций, способствующих повышению качества и надежности дорожного строительства через интеграцию эффективных геосинтетических решений.

2) Разработана математическая модель армирования геосинтетическими материалами асфальтобетонных слоев дорожной одежды, показавшая эффективность применения ГМ для снижения вероятности образования низкотемпературных трещин в дорожном покрытии.

3) Установлена зависимость между приведенным модулем упругости геосинтетического материала и уровнем растягивающих напряжений в асфальтобетоне при средних температурах в течение холодного периода.

4) Проведены расчеты дорожной конструкции с армированием несвязанных слоев геосинтетическими материалами, в которых использовался модуль упругости композитного материала, включающего геосинтетический материал и щебеночно-песчаную смесь, с учетом возможной деградации геосинтетического материала при укладке, подтвержденной натурными испытаниями.

5) По результатам расчетов дорожной конструкции в ПО "SigmaPro" и "Robur" установлено, что применение геосинтетических материалов повышает её модуль упругости. В ПО "Robur" выявлено увеличение модуля упругости конструкции с 440 МПа до 458 МПа, что составляет 4 %. Расчеты в ПО "SigmaPro" показали, что вклад геосинтетического материала в повышение модуля упругости составляет 3 % (с 369 МПа до 379 МПа), при этом количество циклов нагружения увеличивается примерно на 16 %, с 1179716 до 1411248 приложений нормативной транспортной нагрузки.

6) Расчеты дорожных конструкций подтвердили эффективность использования геосинтетических материалов для повышения эксплуатационных характеристик и долговечности дорожных одежд.

## ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА НОМЕНКЛАТУРЫ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

### 3.1 Геосинтетические материалы, применяемые для борьбы с эрозией на откосах

#### 3.1.1 Общие положения по борьбе с эрозией на откосах

Для борьбы с эрозией на откосах используются технологии пластических масс, волокнистых материалов, технологии производства композиционных материалов. Для борьбы с эрозией могут применяться следующие виды геосинтетических материалов: геоматы тканые, вязанные, нетканые, экструдированные, геосотовые материалы, биоматы, геосетки вязанные, геополотна тканые, геоматы армированные герешетками, металлическими сетками, а также многослойные материалы. Соответственно важной задачей является правильный выбор геосинтетического материала для конкретных условий эксплуатации, который должен основываться на оптимальных характеристиках и свойствах номенклатура и значения которых должны быть обоснованно выбраны. Именно на этих аспектах основывается анализ отечественных и международных методик испытаний и требований к геосинтетическим материалам, применяемым для борьбы с эрозией и укрепления откосов.

В международных нормах геосинтетические материалы, предназначенные для борьбы с эрозией, разделяются на три основных вида:

- геомат противоэрозионный – способствует прорастанию корневой системы. Данный вид материала представляет собой, как правило, объемную структуру из полимерных нитей или других элементов, скрепленных термическим способом, обладающих малой прочностью (от 1 до 4 кН/м);

- геомат противоэрозионный армирующий – геосинтетический материал, выполняющий функцию борьбы с эрозией с одновременным армированием поверхности откоса в течение срока службы объекта. Данный вид материала представляет собой объемную структуру из полимерных нитей, скрепленных термическим или механическим способом, обладающей достаточной прочностью (от 5 кН/м) и малым относительным удлинением. Прочность материала достигается технологией производства (вязаная, тканая) или включением в структуру дополнительных армирующих элементов в виде георешеток или геополос;

- геомат противоэрозионный покрывающий - геосинтетический материал, выполняющий функцию борьбы с эрозией, выполненный из натурального или другого, разлагаемых в течении короткого периода времени материалов, предназначенный для поверхностной защиты откосов от эрозии и способствованию прорастания корневой системы.



Этот вид материала представляет собой, как правило, плоскую многослойную структуру, состоящую из двух внешних слоев, удерживающих внутри натуральный наполнитель и соединённый клеевым или ниточным способом, разлагаемый в течении 1 – 3 вегетационных периодов.

Противоэрозионные материалы представляют собой отдельный класс геосинтетических материалов. Относясь к категории строительных материалов, однако, эти материалы обладают существенно отличительными от них свойствами. Глобально, геосинтетические материалы выполняют большое разнообразие функций и используются в различных областях геотехнического и дорожного строительства. Соответственно при использовании в той или иной функции геосинтетический материал должен удовлетворять определенным требуемым характеристикам. Как следствие, характеристики материала, используемого для той или иной функции, существенно различаются по своим размерам и физическим свойствам, которые в дальнейшем определяют и остальные свойства – механические, гидравлические и др.

Противоэрозионные материалы также обладают отличительными особенностями по своим физическим характеристикам. Выполняя функцию защиты от эрозии, эти материалы должны обладать целым комплексом свойств. Во-первых, они должны обеспечивать стабильность геотехнической конструкции за счет удаления излишней воды, а во-вторых, они должны обладать достаточными прочностными свойствами. Именно эти характеристики и определяют геометрические и физические свойства противоэрозионных материалов.

Несмотря на то, что геосинтетические материалы для борьбы с эрозией на откосах используются достаточно давно, однако, их эксплуатационные свойства, как правило, получают из непостоянных и нестандартных испытаний, порой проводимых на единичных образцах. Результаты таких испытаний должны использоваться с особым вниманием. Разнообразие геосинтетических материалов для борьбы с эрозией на откосах по исходному полимерному сырью, технологии изготовления и т.д. вызывает необходимость четко определять их эксплуатационные характеристики. В общем случае эти испытания можно разделить на два вида: лабораторные (стендовые испытания) и полигонные испытания. Первый вид достаточно экономичен и осуществляется при четких стандартизованных условиях. Данные испытания разработаны для контроля склонов от эрозии, каналов эрозии, улучшение растительности, и биоразлагаемость. Второй вид испытаний проводится на полигоне и включает в себя полномасштабные испытания на защиту от эрозии, вызванной дождем, на откосах.

### 3.1.2 Натурный эксперимент с ГМ для борьбы с эрозией на откосах

Для разработки требований к геосинтетическим материалам, выполняющим функцию борьбы с эрозией на откосах и прогнозирования их свойств, проведены натурные и лабораторные

испытания. В рамках натуральных испытаний в течение 4-х лет проводились наблюдения за внешним видом откосов, укрепленных геосинтетическими материалами, и отбор проб с откосов, подготовка образцов и определение остаточной прочности. Откосы были возведены на полигоне для проведения натуральных испытаний ООО «Мегатех Инжиниринг» в г. Дзержинск.

Для проведения исследований были выбраны следующие виды материалов, представленных на рынке, приведены на рисунке 3.1:

- геомат пластмассовый экструдированный ГЕО ГМ;
- геомат пластмассовый экструдированный Стабимат СМТ;
- геомат вязаный Армостаб 3Д;
- геомат тканый Ультранит 3D-20;
- геомат пластмассовый экструдированный армированный георешеткой тканой Стабимат СМТ-К;
- геомат вязаный с полимерной пропиткой GRUNTEX 3D;
- геомат пластмассовый экструдированный МакМат 13.1;
- геомат пластмассовый экструдированный армированный металлической сеткой МакМат R1 6822GN.

Технико-экономические показатели возведенного земляного полотна

Земляное полотно №1:

- высота насыпи – 2 м,
- заложение откоса насыпи испытываемого материала – 1:1,7,
- длина насыпи – 33,20 м,
- материал насыпи – карьерный песок средней крупности.

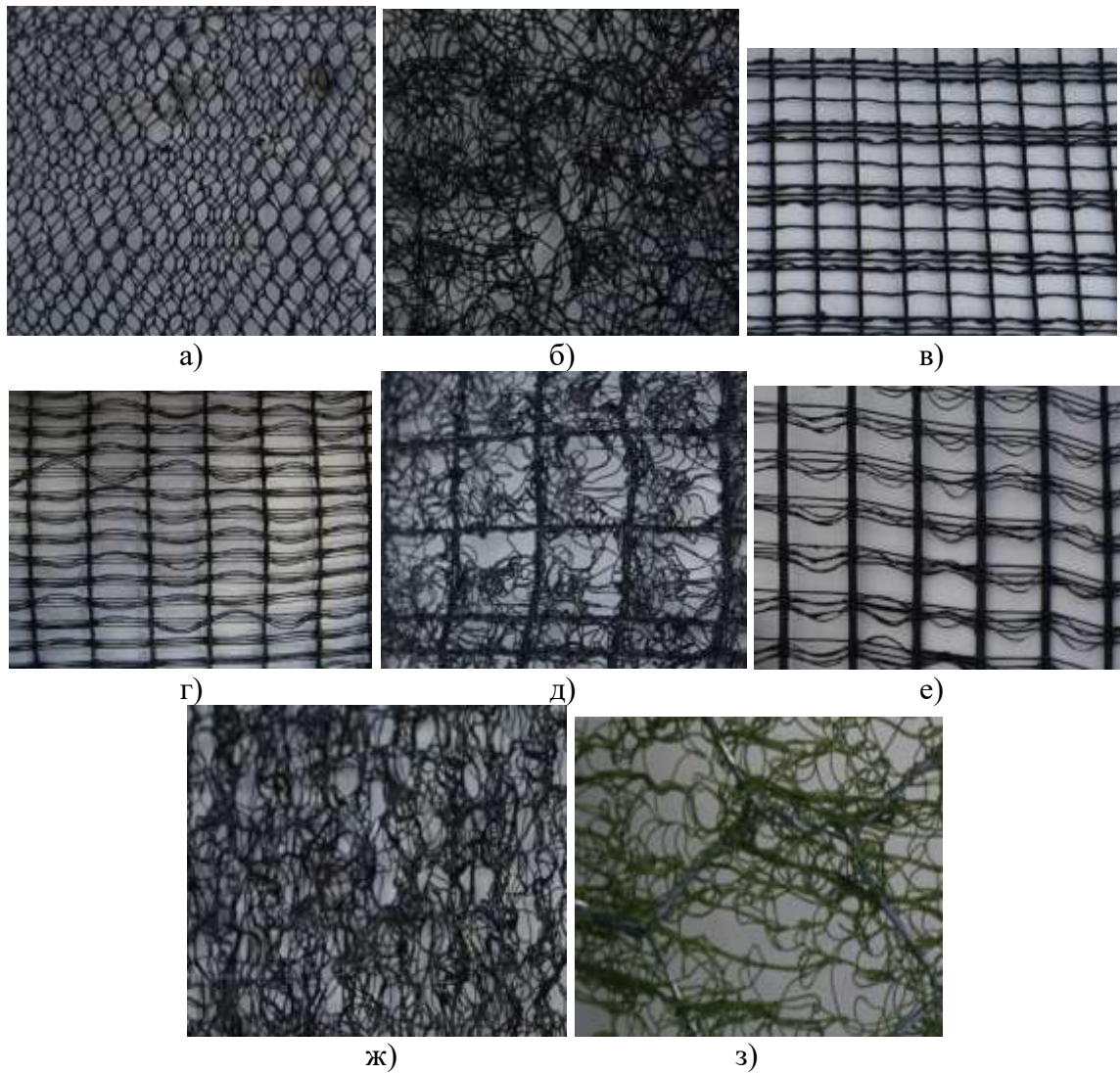
Земляное полотно №2:

- высота насыпи – 2 м,
- заложение откоса насыпи испытываемого материала – 1:2,5,
- длина насыпи – 30,70 м,
- материал насыпи – карьерный песок средней крупности.

В ходе проведения [173] был проведен эксперимент, направленный на определение массы сошедшего грунта с каждого участка в течение двух месяцев, и выполнены наблюдения за образованием растительного слоя.

По прошествии 4-х лет на испытательном полигоне были проведены следующие мероприятия:

- визуальный анализ состояния откосов,
- отбор проб геосинтетических материалов с откосов, подготовка образцов и определение остаточной прочности.



а - геомат пластмассовый экструдированный; б – геомат пластмассовый экструдированный; в – геомат вязаный; г – геомат тканый; д – геомат пластмассовый экструдированный армированный георешеткой тканой; е – геомат вязаный; ж – геомат пластмассовый экструдированный; з – геомат пластмассовый экструдированный армированный металлической сеткой  
 Рисунок 3.1 – Исследуемые виды геосинтетических материалов для борьбы с эрозией на откосах

Внешние виды возведенных откосов с уложенными геосинтетическими материалами приведены на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Уложенные геоматы на возведенных откосах (лето 2016 г.)

Фотографии с внешним видом откосов, укрепленных геосинтетическими материалами по прошествии 4-х лет с момента возведения, представлены на рисунке 3.3.

На фотографиях видно, что все уложенные геосинтетические материалы обеспечили формирование равномерного слоя растительности, тем самым в полном объеме выполнив функцию борьбы с эрозией на откосах.



Рисунок 3.3 – Внешний вид откосов по прошествии 4 лет (лето 2020 г.)

На фотографиях видно, что на неукрепленных геосинтетическим материалом участках представлена скудная растительность, так как за четыре года с поверхности откоса были смыты семена трав, в то время как укладка геосинтетического материала способствует удержанию семян трав и формированию устойчивого растительного покрова.

В целях исследования влияния долговременного воздействия совокупности механических, климатических, микробиологических факторов и агрессивных сред на прочностные характеристики геосинтетических материалов с откосов были отобраны пробы геосинтетических материалов, из которых были подготовлены образцы для определения прочности при растяжении в соответствии с [121].

Показатель, характеризующий остаточную прочность материала после извлечения с откоса,  $C_{п}$ , отдельно рассчитывают для продольного и поперечного направлений по формуле (3.1)

$$C_{п} = \frac{T_{max}}{T_{max0}} \cdot 100 \%, \quad (3.1)$$

где  $T_{max}$  – прочность при растяжении извлеченного с откоса материала, кН/м, которую определяют в соответствии с [121].

$T_{\max o}$  – прочность при растяжении исходного материала, кН/м, которую определяют в соответствии с [121].

А затем выбирают наихудший. Результаты испытаний приведены на рисунке 3.4. Под номерами обозначены последовательно следующие материалы:

- 1) геомат пластмассовый экструдированный;
- 2) геомат пластмассовый экструдированный;
- 3) геомат вязаный;
- 4) геомат тканый;
- 5) геомат пластмассовый экструдированный армированный георешеткой тканой;
- 6) геомат тканый;
- 7) геомат пластмассовый экструдированный;
- 8) геомат пластмассовый экструдированный армированный металлической сеткой.

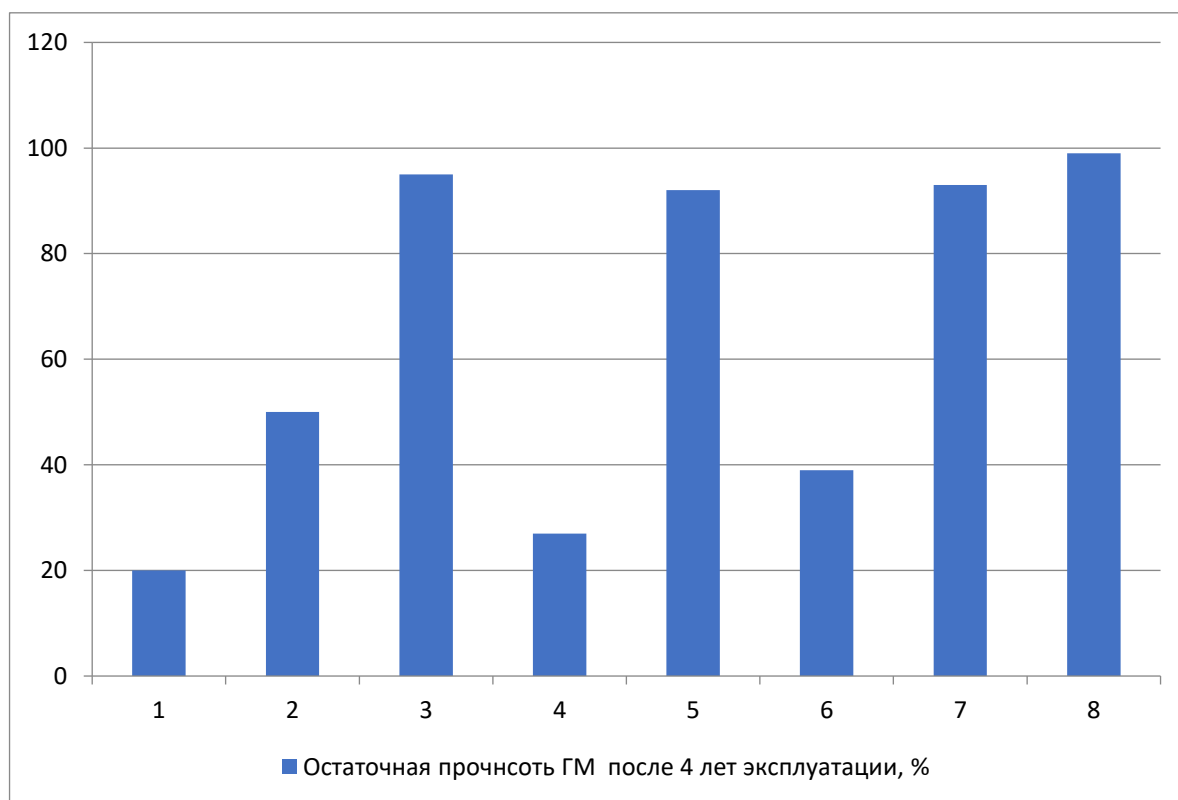


Рисунок 3.4 - Результаты остаточной прочности материалов через 4 года эксплуатации

Дополнительно по результатам лабораторных испытаний была определена расчетная прочность при растяжении геосинтетических материалов для борьбы с эрозией на откосах по [138].

В целях проверки наличия (или отсутствия) линейной зависимости между значениями расчетной прочности при растяжении и значениями прочности при растяжении извлеченного с откоса материала были определены значения коэффициентов корреляции Пирсона по формуле (3.2)



$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.2)$$

где  $x_i$  - значения расчетной прочности при растяжении материала, кН/м,

$y_i$  - значения прочности при растяжении извлеченного с откоса материала, кН/м,

$\bar{x}$  - среднее арифметическое значение расчетной прочности при растяжении материала, кН/м,

$\bar{y}$  - среднее арифметическое значение прочности при растяжении извлеченного с откоса материала, кН/м.

Расчет коэффициентов корреляции Пирсона был выполнен с использованием программного обеспечения STATISTICA.

На рисунках 3.5 и 3.6 представлены диаграммы рассеяния, которые визуализируют зависимость между переменными «Расчетная прочность при растяжении материала» и «Прочность при растяжении извлеченного с откоса материала» в продольном и поперечном направлениях.

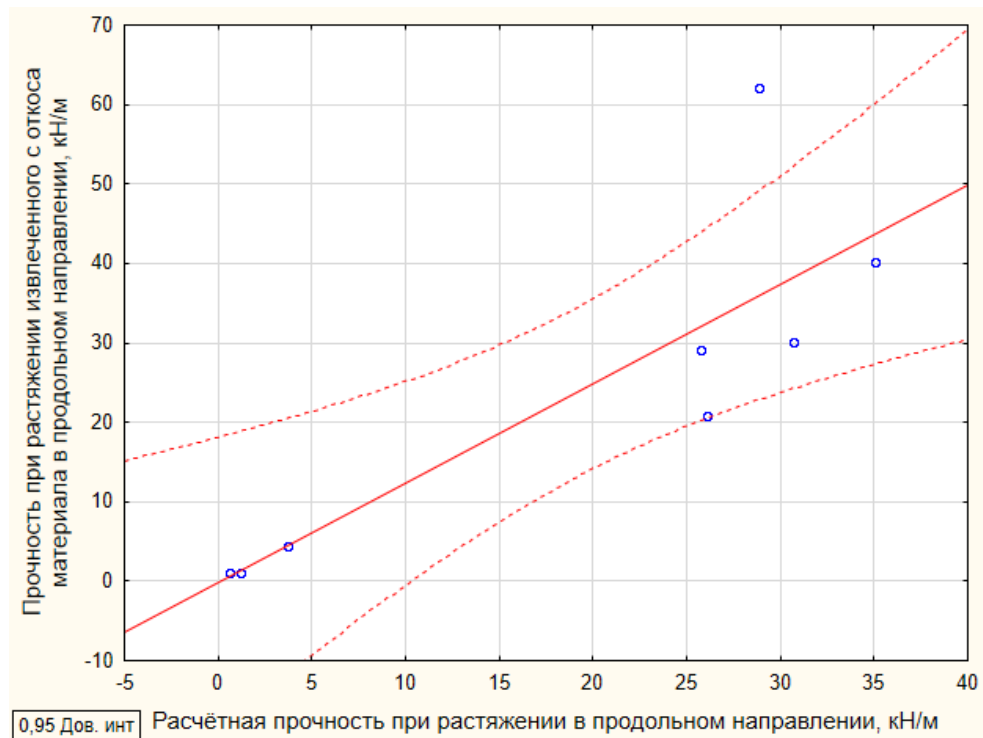


Рисунок 3.5 – Диаграмма рассеяния для расчетной прочности при растяжении материала и прочности при растяжении извлеченного с откоса материала в продольном направлении

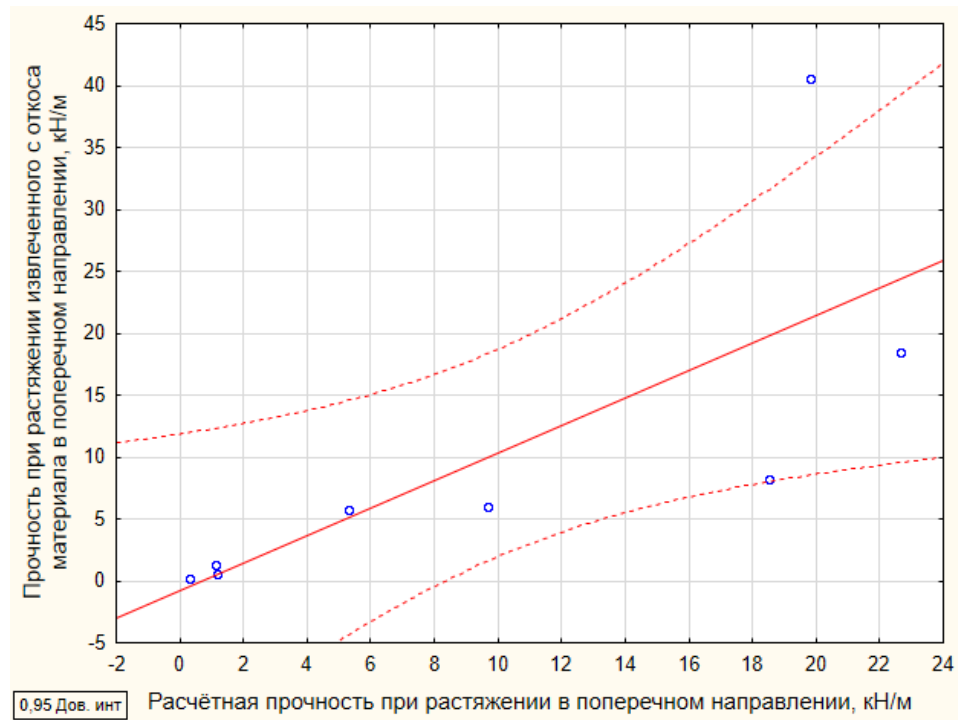


Рисунок 3.6 – Диаграмма рассеяния для расчетной прочности при растяжении материала и прочности при растяжении извлеченного с откоса материала в поперечном направлении

В ходе проведения корреляционного анализа была выявлена статистически значимая корреляция между параметрами:  $r_{xy} = 0,85$  – для продольного направления,  $r_{xy} = 0,75$  – для поперечного направления.

По результатам испытаний были построены столбчатые диаграммы значений расчетной прочности при растяжении и прочности при растяжении извлеченного с откоса материала для каждого направления, представлено на рисунках 3.7, 3.8.

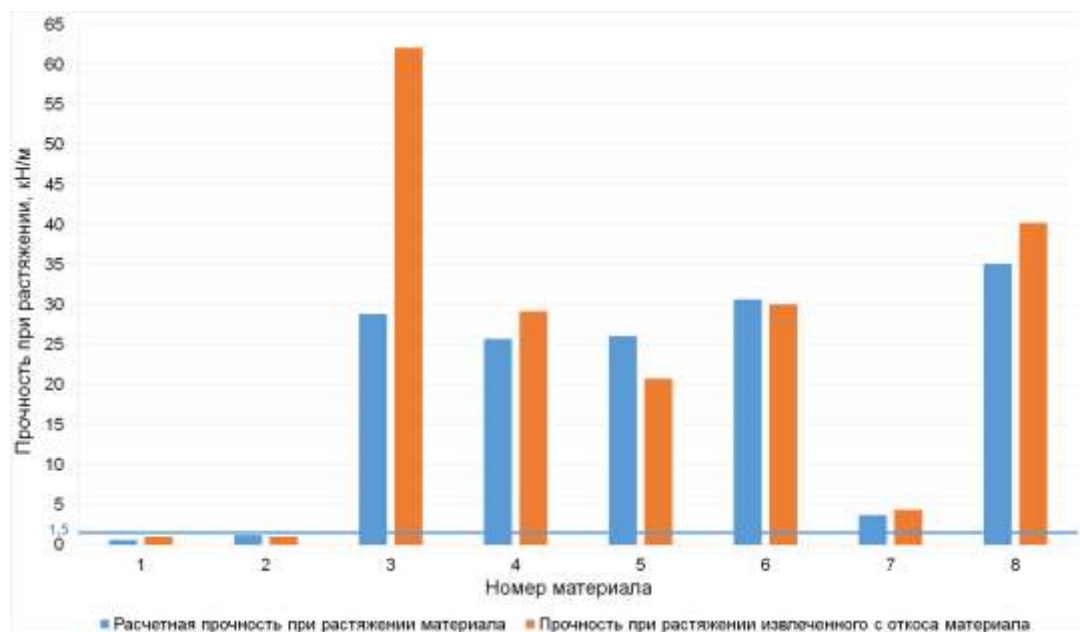


Рисунок 3.7 – Столбчатая диаграмма значений расчетной прочности при растяжении и прочности при растяжении извлеченного с откоса материала в продольном направлении

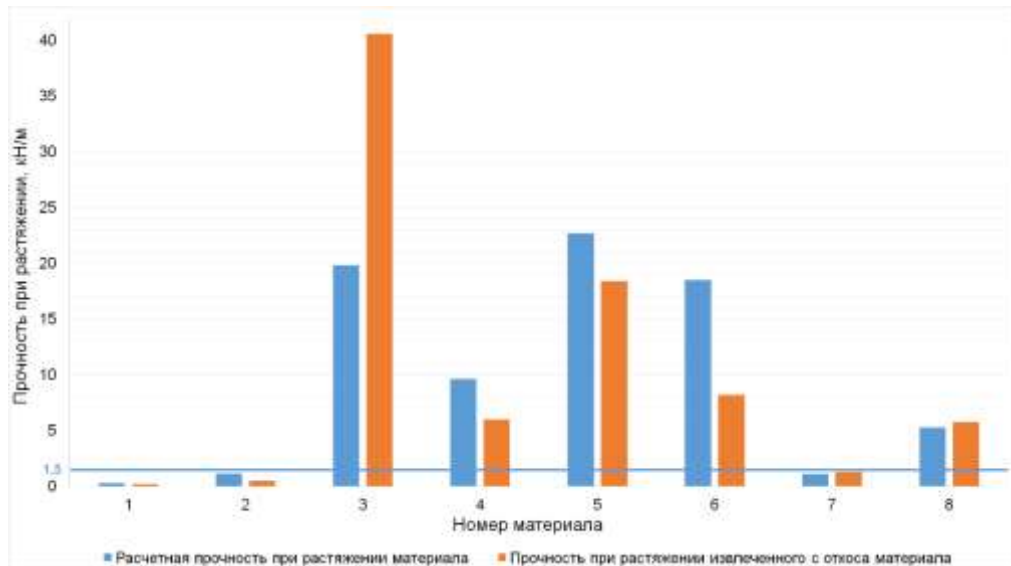


Рисунок 3.8 – Столбчатая диаграмма значений расчетной прочности при растяжении и прочности при растяжении извлеченного с откоса материала в поперечном направлении

На диаграммах видно, что расчетная прочность при растяжении и прочность при растяжении извлеченного с откоса материала в продольном направлении принимают значения менее установленного нижнего предела (1,5 кН/м) для материалов №1, №2; расчетная прочность при растяжении и прочность при растяжении извлеченного с откоса материала в поперечном направлении - менее установленного нижнего предела (1,5 кН/м) для материалов №1, №2, №7. Полученные данные совпали с результатами внешнего осмотра: материалы №1, №2 имеют видимые повреждения структуры.

Дополнительно следует отметить актуальность введения показателя, учитывающего снижение прочности от механических повреждений при воздействии песка, при оценивании расчетной прочности при растяжении и определяемого в соответствии с с приложением А [168] по формуле (3.3)

$$C_{\text{пес}} = \frac{T_{\text{к1}}}{T_0}, \quad (3.3)$$

где  $T_{\text{к1}}$  - прочность при растяжении материала после извлечения из песка, кН/м:

$T_0$  - прочность при растяжении исходного материала, кН/м.

Таким образом, расчетную прочность при растяжении рекомендуется вычислять по следующей формуле для продольного и поперечного направлений в отдельности (4.4)

$$T_{\text{расч}} = T_{\text{ном}} C_{\text{уф}} C_{\text{м}} C_{\text{т}} C_{\text{агр}} C_{\text{пес}}, \quad (3.4)$$

где  $T_{\text{ном}}$  - прочность при растяжении в продольном, поперечном направлении, кН/м,



$C_{уф}$  - показатель устойчивости материала к ультрафиолетовому излучению в продольном или поперечном направлении в соответствии с [123], не менее 0,8,

$C_m$  - показатель устойчивости материала к микробиологическому воздействию в продольном или поперечном направлении в соответствии с [121], не менее 0,8,

$C_T$  - показатель морозостойкости материала (30 циклов) в продольном или поперечном направлении в соответствии с [124], не менее 0,8,

$C_{агр}$  - наименьший показатель устойчивости материала к воздействию агрессивных сред в продольном или поперечном направлении в соответствии с [161], не менее 0,8,

$C_{пес}$  – показатель, учитывающий снижение прочности от механических повреждений при воздействии песка в продольном или поперечном направлениях, в соответствии с [168], не менее 0,8.

На основании полученных результатов испытаний могут быть сформулированы следующие требования к техническим характеристикам геосинтетических материалов, применяемых для борьбы с эрозией на откосах, которые установлены в [138]:

- расчетная прочность при растяжении - не менее 1,5 кН/м,
- коэффициент потери грунта - не более 0,9,
- коэффициент прорастания - не менее 0,4.

Данные результаты исследований были учтены при разработке национального стандарта [72].

Разработанная методология была адаптирована для данной функции, определены воздействующие факторы и предложена модель расчета прочностных характеристик, которая применима как для максимальной прочности при растяжении, так и для модуля упругости ГМ.

$$T_{дол} = \frac{T_{нор}}{k_{общ}} \quad (3.5)$$

$$k_{общ} = k_{1x} \cdot k_3 \cdot k_{4x} \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot k_8 \quad (3.6)$$

где  $k_{1x}$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений,

$k_3$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия УФ излучения,

$k_{4x}$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия агрессивных сред,

$k_5$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от микробиологического воздействия,

$k_6$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от многократного замораживания и оттаивания,

$k_8$  - коэффициент, учитывающий прочность швов геосотовых материалов.

Проведенные исследования позволили определить минимальные требования для ГМ, выполняющих функцию борьбы с эрозией на откосах, которые представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Минимальные требования для ГМ, выполняющих функцию борьбы с эрозией на откосах

Характеристика ГМ	Значения
Прочность при растяжении, не менее кН/м	6
Устойчивость к УФ-излучению	0,8
Устойчивость к микроорганизмам	0,8
Устойчивость к кислотам и щелочам	0,8
Устойчивость к циклическим нагрузкам	0,7
Прочность швов	0,8
Устойчивость к циклам замораживания и оттаивания	0,8
Гибкость при минус 30 С	отсутствует
Коэффициент прорастания	0,9
Коэффициент вымываемости	0,4

### 3.2 Геосинтетические материалы, применяемые для разделения слоев из зернистых материалов

#### 3.2.1 Общие положения по разделению слоев

Армирование слоев дорожной одежды является не единственной функцией, которую могут выполнять геосинтетические материалы, используемые в дорожном строительстве. Наравне с армированием, при строительстве автомобильных дорог на территории Российской Федерации геосинтетические материалы используются и как материалы, разделяющие слои из минеральных материалов (песок, щебень) и не позволяющий им смешиваться. Однако в этой области применения геосинтетических материалов отсутствует единое системное понимание физико-механических характеристик, обеспечивающих выполнение функции разделения, как в процессе укладки геосинтетического материала, так и в процессе эксплуатации всей конструкции автомобильной дороги. Отсутствуют количественные показатели физико-механических характеристик геосинтетических материалов, которые могут быть использованы как изготовителями при производстве геосинтетических материалов, так и строительными организациями для проведения входного контроля, а также независимыми организациями для нужд по подтверждению соответствия геосинтетических материалов.

В соответствии с международным стандартом [74] оценка данной функции производится на основании результатов испытаний по следующим характеристикам:

- прочность при растяжении по требованию заказчика;

- относительное удлинение — ключевая характеристика материала, определяющая его способность деформироваться без разрушения при взаимодействии смежных слоев;
- прочность швов и соединений на разрыв, что является важным аспектом для особых условий эксплуатации. В России отсутствует практика соединения полотен с целью их разделения, поскольку эта операция требует значительных временных затрат и специализированного оборудования;
- прочность при статическом продавливании (Метод CBR), также по требованию заказчика;
- ударная прочность (метод падающего конуса) — основной параметр, характеризующий устойчивость материала к механическим воздействиям при засыпке сыпучими материалами, например, из самосвала;
- устойчивость к сдвигу — важный показатель для особых условий эксплуатации, таких как основания насыпей;
- стойкость к циклическим нагрузкам — основной параметр, определяющий устойчивость материала к истиранию при уплотнении и эксплуатации;
- характерная ширина отверстий (открытых пор) — важный гидравлический параметр, определяющий способность материала пропускать мелкие частицы песка;
- водопроницаемость в перпендикулярном направлении — основной гидравлический параметр, влияющий на коэффициент фильтрации слоя, в котором размещён геосинтетический материал;
- устойчивость к ультрафиолетовому излучению — параметр, характеризующий способность материала сохранять прочность и относительное удлинение под воздействием солнечного света, когда материал не покрыт слоем песка, щебня и других материалов;
- устойчивость к воздействию агрессивных сред — параметр для специфических условий эксплуатации, характеризующий способность материала сохранять свойства в кислой или щелочной среде;
- устойчивость к воздействию микроорганизмов — параметр, характеризующий способность материала сохранять свои свойства при воздействии агрессивной среды, содержащей микроорганизмы и бактерии.

В российских нормативных документах для проектирования дорожных одежд ([77, 76], рекомендуется применение геотекстильных материалов, например, при устройстве защитного слоя. Также геотекстиль применяют в конструкциях дорожных одежд, чтобы предотвратить взаимопроникновение материалов и, следовательно, увеличить долговечность конструкции.

Однако в отечественных нормативных актах отсутствуют конкретные требования к характеристикам геосинтетических материалов, используемых для разделения слоев из

несвязанных материалов. В лучшем случае, регламентируется тип материала, например, геотекстиль, и иногда указывается его поверхностная плотность. Следует отметить, что поверхностная плотность является лишь технологическим показателем и не может гарантировать достижение основных физико-механических, химических и биологических характеристик материала.

### 3.2.2 Натурный эксперимент по разделению слоев дорожной одежды из минеральных материалов

По выявленным в результате анализа нормативным документам по характеристикам геосинтетических материалов, используемых для разделения, проведен целый комплекс лабораторных и полевых (натурных) испытаний.

Особо стоит отметить, что на момент начала проведения исследований на отечественном рынке геосинтетических материалов отсутствовали нормативные требования для обеспечения функции разделения, поэтому производители по-разному позиционировали свой товар, и задачей проводимых исследований являлось установить минимальный порог характеристик для обеспечения выполнения данной функции.

В силу того, что отсутствует необходимость в нормировании гидрофизических свойств геосинтетических материалов, то по данным показателям испытания не проводились. Это связано с тем, что в зависимости от условий эксплуатации могут быть важны данные свойства, а могут быть малозначительны, поэтому данные свойства рекомендованы как справочные. Особо стоит отметить, что гидрофизические свойства материалов важны при выполнении функции дренирования, фильтрации и гидроизоляции.

С точки зрения стоимости и технологичности геосинтетического материала, наиболее широко представленными геосинтетическими материалами для разделения слоев из минеральных материалов являются геополотна нетканые. Геополотна тканые и вязаные, в силу своих особенностей и прочностных характеристик, могут также использоваться и, например, для армирования.

Для подтверждения этой гипотезы были выбраны следующие виды материалов с паспортными характеристиками, которые указаны в таблице 3.2.

Результаты потери прочности от различных воздействий представлены на рисунке 3.9.

Впервые в нашей стране разработана методика [174] и проведены полигонные испытания для оценки механических повреждений при укладке геосинтетических материалов в реальных условиях на испытательном полигоне ООО «Роспромтекс инжиниринг» при участии ООО «Мегатех инжиниринг» и АНО «НИИ ТСК». Сущность разработанной методики [174] состоит в оценке сохранения прочности образцов геосинтетических материалов после нанесения

повреждений, которые создаются при моделировании строительства несвязных конструктивных слоев автомобильной дороги.

Таблица 3.2 – Характеристики материалов, принявших участие в эксперименте

Вид ГМ	Прочность при растяжении в продольном направлении, кН/м	Относительное удлинение при максимальной прочности в продольном направлении, %	Прочность при растяжении в поперечном направлении, кН/м	Относительное удлинение при максимальной прочности в поперечном направлении, %
Геополотно нетканое	8,4	71	7,3	60
Геополотно нетканое	16,70	123	16,4	102
Геополотно тканое	87,4	16	93	67
Геополотно вязаное	95,2	23	116	15
Геополотно нетканое	13,1	50	13,5	55

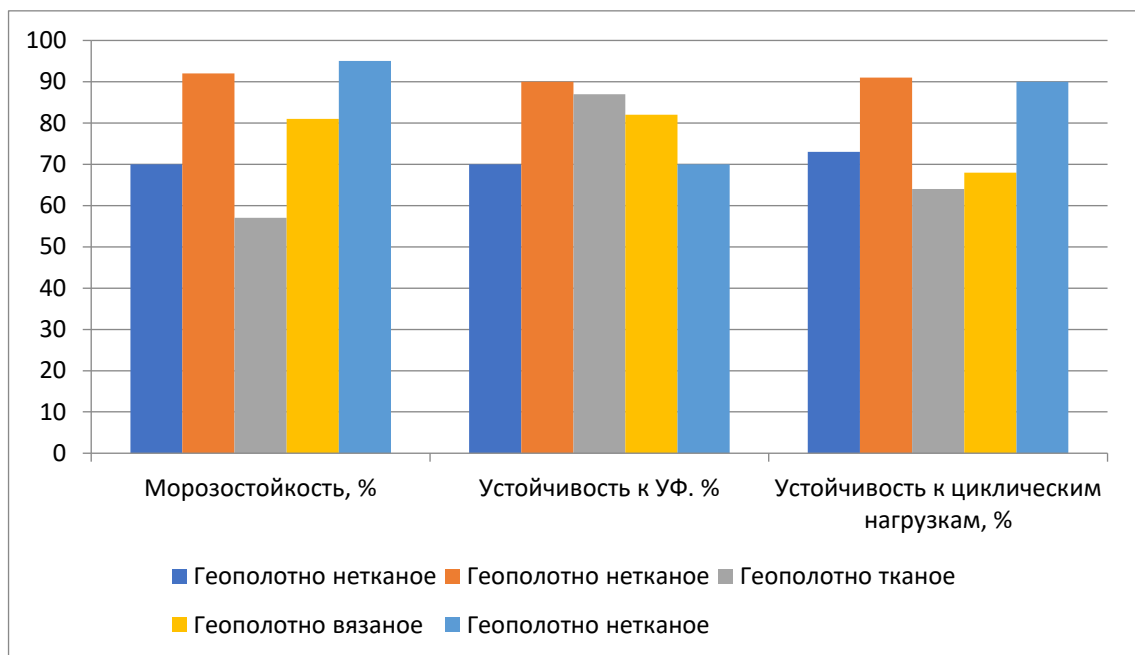


Рисунок 3.9 – Результаты лабораторных испытаний ГМ для разделения

На рисунке 3.10 показаны примеры общего вида полигона для изучения повреждаемости геосинтетических материалов при укладке.



Рисунок 3.10 – Испытательные полигоны с уложенными материалами

Полигон условно поделен на 2 равных части, на которых уложены одинаковые материалы, - это сделано с целью оценки повреждаемости геосинтетических материалов на разделении слоев песок-песок и песок-щебень.

На рисунках 3.11 – 3.15 представлены фотографии образцов после испытания на полигоне.



Рисунок 3.11 – Геополотно тканое после извлечения из конструкции (разделение слоев песок-щебень)



Рисунок 3.12 – Геополотно нетканое после извлечения из конструкции (песок-песок)





Рисунок 3.13 – Геополотно вязаное после извлечения из конструкции (песок-песок)



Рисунок 3.14 – Геополотно нетканое после извлечения из конструкции (песок-щебень)

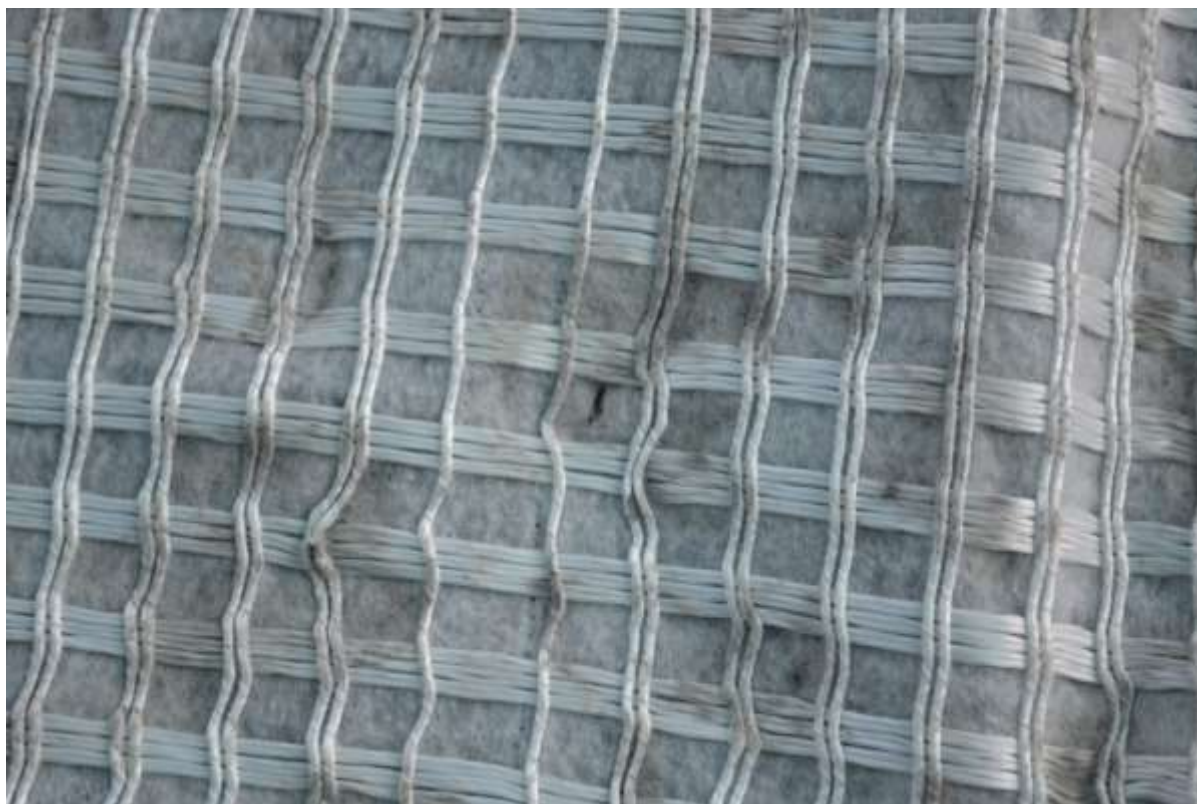


Рисунок 3.15 – Геополотно нетканое с георешеткой после извлечения из конструкции (песок-щебень)

Результаты полигонных испытаний, сопоставленных с повреждаемостью от циклических нагрузок в лабораторных условиях, приведены на рисунке 3.16.

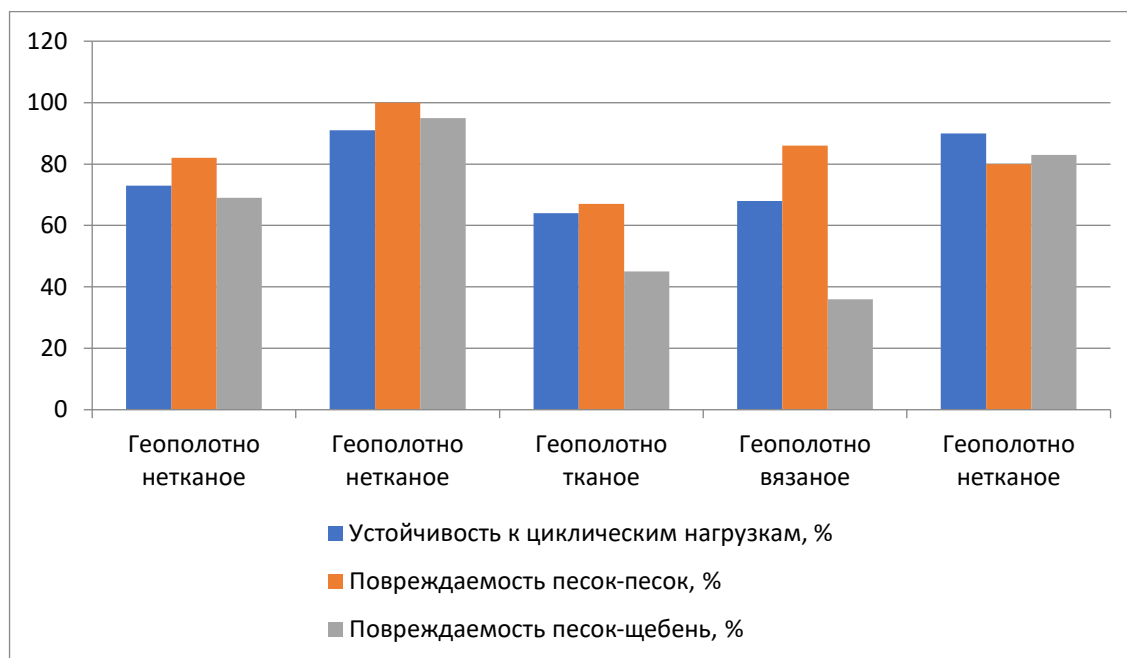


Рисунок 3.16 – Результаты повреждаемости ГМ в различных условиях

Как видно из гистограммы на рисунке 3.16 материалы одного вида имеют разное соотношение потерь прочности от данных повреждений, при этом существуют материалы, которые повреждаются от укладки в песок значительно, чем от укладки в щебень. Из гистограмм 3.9 и 3.16 виден большой разброс снижения прочности материала от воздействующих факторов,



что свидетельствует о реальном снижении прочности материала в процессе эксплуатации, а, значит, необходимости его измерения и контроля для прогнозирования области применения материала.

Результаты, представленные на рисунке 3.16, свидетельствуют о том, что лабораторный метод достаточно хорошо моделирует работу материала между слоями песок-песок. Поэтому было предложено остановиться на данном методе и не применять требования к проведению полигонных испытаний в связи с их высокой стоимостью проведения и сложности организации.

Результаты исследований на статическое (CBR-тест) и динамическое продавливание представлены на рисунке 3.17

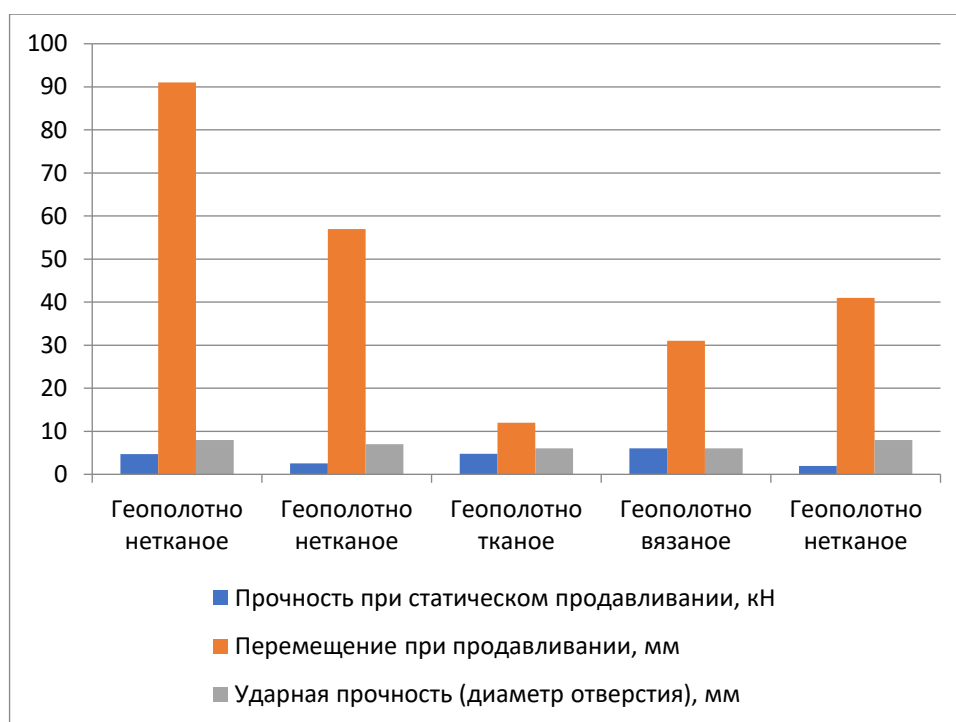


Рисунок 3.17 – Результаты испытаний на продавливание

Проведенный комплекс испытаний позволил сформировать представление о работе материала в конструкции, его остаточных свойствах, подверженности различным физико-механическим воздействиям, на основании которых был сформирован перечень характеристик геосинтетических материалов, применяемых для разделения слоев из дискретных материалов представлены в таблице 3.3. Т.к. испытать все возможные варианты ГМ не возможно, то испытаны были характерные представители основных видов материалов.

Технические характеристики таблицы 4.3 были использованы при разработке национального стандарта [70] в рамках научно-исследовательских работ, проводимых по заданию Федерального дорожного агентства (Росавтодор) [175].

Таблица 3.3 - Значения характеристик геосинтетических материалов для разделения слоев дорожной одежды из минеральных материалов

Технические характеристики (показатели)	Значения технических характеристик
Прочность при растяжении, не менее кН/м	5
Относительное удлинение при максимальной нагрузке, не менее %	20
Морозостойкость, не менее, %	80
Устойчивость к ультра-фиолетовому излучению, не менее, %	80
Стойкость к циклическим нагрузкам, не менее, %	70
Перемещение при продавливании, мм, не менее	30
Ударная прочность (метод падающего конуса), не более, мм	5
Характеристика открытых пор, мкм	справочное
Коэффициент фильтрации в плоскости перпендикулярной плоскости образца, м/сут	справочное

Разработанная методология была адаптирована для данной функции, определены воздействующие факторы и предложена модель расчета прочностных характеристик, которая применима как для максимальной прочности при растяжении, так и для модуля упругости ГМ.

$$T_{\text{дол}} = \frac{T_{\text{нор}}}{k_{\text{общ}}} \quad (3.7)$$

$$k_{\text{общ}} = k_{1x} \cdot k_3 \cdot k_{4x} \cdot k_5 \cdot k_6 \quad (3.8)$$

где  $k_{1x}$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений,

$k_3$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия УФ излучения,

$k_{4x}$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия агрессивных сред,

$k_5$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от микробиологического воздействия,

$k_6$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от многократного замораживания и оттаивания,

В результате проведенных исследований были получены значения характеристик, которые были включены в национальный стандарт и представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Требования к ГМ для разделения слоев из зернистых материалов

Характеристика ГМ	Значение
Прочность при растяжении, не менее кН/м	5
Устойчивость к УФ-излучению	0,8
Устойчивость к микроорганизмам	0,8
Устойчивость к кислотам и щелочам	0,8
Устойчивость к циклическим нагрузкам	0,7
Прочность при продавливании (падающий конус), не более мм	50
Прочность при статическом продавливании, не менее	1000
Устойчивость к циклам замораживания и оттаивания	0,8
Устойчивость к повреждаемости при укладке	0,6
Коэффициент фильтрации	Справочное

### 3.3 Геосинтетические материалы, применяемые для армирования слоев дорожной одежды

#### 3.3.1 Натурный эксперимент по армированию слоев дорожной одежды из минеральных материалов

Для оценки влияющих факторов, разработки методик испытаний и установления минимальных требований к свойствам геосинтетических материалов, обеспечивающих функцию армирования на автомобильных дорогах, были выполнены полевые испытания данных материалов на различных участках:

- Рязанская область, участок трассы Рязань-Ряжск-Ал.Невский-Данков-Ефремов, км 38-41 — проведено исследование дорожных конструкций с применением геосинтетических материалов для армирования асфальтобетонных слоев дорожных одежд. В рамках эксперимента уложены 12 геосинтетических материалов от 7 производителей, среди которых 2 зарубежных. Протяженность участка дороги с геоматериалами составила 100 м, контрольного участка без них — 50 м,

- Шацкий район Рязанской области, участок Старочернеево – Парсаты – Сявель (д. Парсаты) — исследование дорожных конструкций с использованием геосинтетических материалов для усиления нижних слоев оснований. Было организовано 6 участков: 5 участков длиной по 100 м с применением геосинтетических материалов от ведущих отечественных производителей и одного зарубежного, а также контрольный участок.

Проведение данных испытаний курировалось Министерством транспорта и автомобильных дорог Рязанской области совместно с Росавтодором. Сопоставительные испытания проводились в соответствии с «Регламентом проведения сопоставительных испытаний геосинтетических материалов для усиления нижних слоев оснований и разделения крупнопористых материалов и песчаного слоя», разработанным с активным участием автора диссертации и утвержденным Министром транспорта и автомобильных дорог Рязанской области.

В указанном Регламенте определены следующие этапы выполнения работ:

- 1) устройство песчаного слоя основания под укладку ГМ;
- 2) укладка геосинтетических материалов в соответствии с проектом и окончательное устройство слоя основания;
- 3) лабораторные испытания материалов слоев основания;
- 4) лабораторные испытания ГМ;
- 5) периодический мониторинг несущей способности всей конструкции дорожной одежды.

Для проведения комплекса натурных (полевых) и лабораторных испытаний были подобраны материалы следующих производителей, представленные на отечественном рынке:

- компания «Стеклонит» (Россия);
- компания «Славрос» (Россия);
- компания «Гекса нетканые материалы» (Россия);
- компания «Сетка» (Россия);
- компания «Юган маркетинг» (Израиль).

Данные компания представили на эксперимент следующие виды материалов:

- георешетка экструдированная;
- георешетка тканая;
- геополотно тканое;
- геосотовый материал.

Было устроено 6 участков: 5 участков по 100 м с геосинтетическими материалами, предоставленными ведущими отечественными производителями и один контрольный участок. Конструкция и применяемые материалы дорожной одежды были едиными. Дополнительно стоит отметить, что геосотовый материал был уложен на песчаное основание и заполнен песком, после чего был отсыпан слой щебня в соответствии с проектной документацией.

Для определения технических требований к данным материалам были проведены их лабораторные исследования. Результаты лабораторных исследований приведены в таблице 3.5.

Выполнялся мониторинг в течение 2-х лет за состоянием вышеуказанных участков и оценкой эксплуатационных свойств и дефектов дорожных одежд, таких как модуль деформации и колееобразование, наличие трещин и др.

Результаты исследования участков автомобильной дороги по прошествии 2-х лет эксплуатации оценивались проведением штаптовых испытаний и представлены на рисунке 3.18, в рамках которых определялось отношение несущей способности первичного и вторичного нагружений. Из гистограммы на рисунке 3.19 видно, что большие деформации наблюдались на контрольном участке, из чего следует вывод о том, что использованные в эксперименте материалы вносят вклад в упрочнение дорожной конструкции и действительно выполняют функцию армирования.

При этом получить адекватные корреляционные модели зависимости прироста модуля деформации от свойств геосинтетического материала не удалось. Однако независимые исследования Петряева А.В. показали эффективность применения геосинтетических материалов для повышения несущей способности и снижения деформаций земляного полотна. За счет их применения происходит увеличение несущей способности в 1,6 - 2,1 раза и увеличение модуля общей деформации до 3 раз [101].

Таблица 3.5 – Результаты лабораторных испытаний

Наименование показателя	Наименование материала				
	Георешетка ПП	Георешетка полиэфир	Геополотно ПП	Геосотопы й материал	Георешетка полиэфир
Прочность при растяжении в продольном направлении, кН/м	33,4	51,7	54,7	8,0	41,0
Относительное удлинение в продольном направлении при максимальной нагрузке, %	20	18	21	12	26
Прочность при растяжении в поперечном направлении, кН/м	27,7	50,7	58,6	-	40,8
Относительное удлинение в поперечном направлении при максимальной нагрузке, %	17	19	18	-	17
Стойкость к УФ в продольном направлении, %	93	99	100	100	98
Стойкость к УФ в поперечном направлении, %	95	100	100	-	88
Морозостойкость в продольном направлении, %	100	96	100	100	77
Морозостойкость в поперечном направлении, %	100	100	100	-	75
Индекс повреждения после циклической нагрузки в продольном направлении, %	97	100	97	100	94
Индекс повреждения после циклической нагрузки в поперечном направлении, %	100	100	90	-	94
Изгиб без разрушения при температуре, °С	-20	-40	-40	-40	-40
Устойчивость к микроорганизмам, не выше	ПГ <sub>113</sub>	ПГ <sub>113</sub>	ПГ <sub>113</sub>	ПГ <sub>113</sub>	ПГ <sub>113</sub>
Устойчивость к агрессивным средам, %, не менее	95	90	96	98	90
Прочность соединения (шва), кН/м: на отрыв на сдвиг	-	-	-	13,8 13,4	-

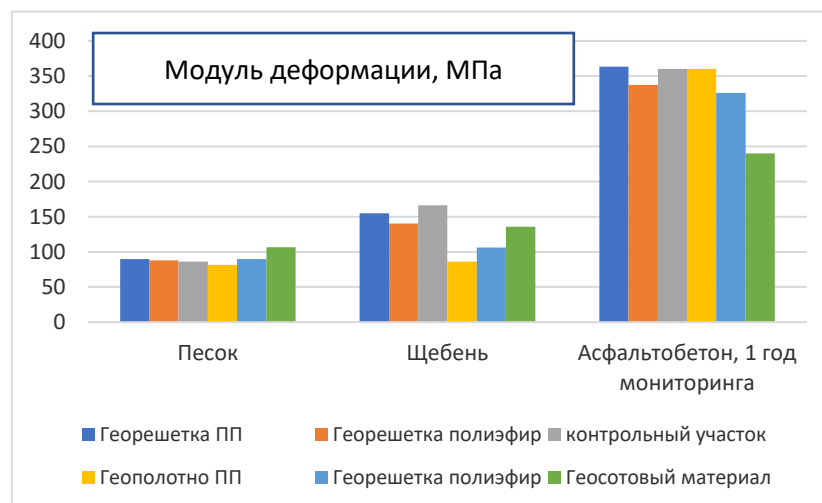


Рисунок 3.18 – Прирост модуля деформации в процессе мониторинга за экспериментальными участками

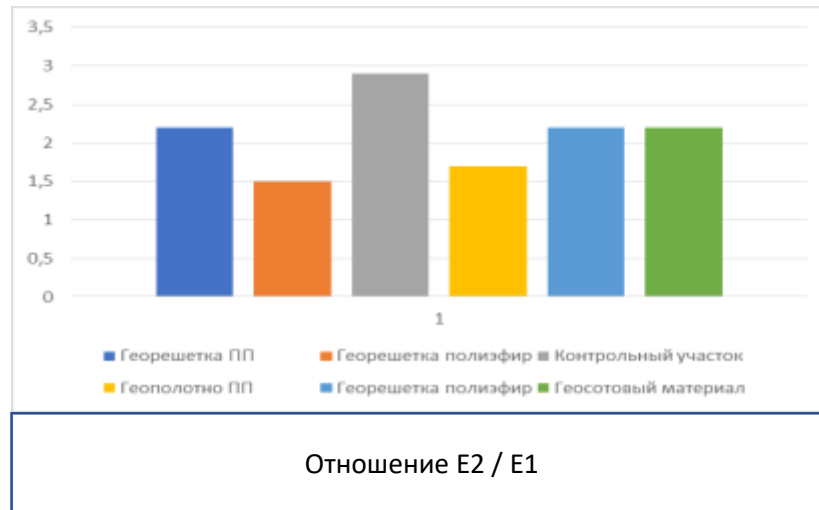


Рисунок 3.19 – Результаты определения деформации дорожного покрытия на экспериментальном участке по прошествии 2-х лет

Таким образом, при проведении исследований геосинтетических материалов, выполняющих функцию армирования конструктивных слоев из несвязанных материалов необходимо оценить влияние характеристик на модуль деформации дорожной одежды.

Полученные результаты [176] были учтены при разработке национального стандарта технические требования к геосинтетическим материалам, выполняющим функцию армирования слоев дорожной одежды из дискретных материалов – [69].

Разработанная методология была адаптирована для данной функции, определены воздействующие факторы и предложена модель расчета прочностных характеристик, которая применима как для максимальной прочности при растяжении, так и для модуля упругости ГМ.

$$T_{\text{дол}} = \frac{T_{\text{нор}}}{k_{\text{общ}}} \quad (3.8)$$

$$k_{\text{общ}} = k_{1x} \cdot k_3 \cdot k_{4x} \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot k_8 \quad (3.9)$$

где  $k_{1x}$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений,

$k_3$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия УФ излучения,

$k_{4x}$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия агрессивных сред,

$k_5$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от микробиологического воздействия,

$k_6$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от многократного замораживания и оттаивания,

$k_8$  - коэффициент, учитывающий прочность швов геосотовых материалов.

### 3.3.2 Геосинтетические материалы, применяемые для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды

Для сбора статистических данных и разработки требований к геосинтетическим материалам, применяемым для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды, которые впоследствии могут быть включены в национальные стандарты, было привлечено 12 образцов от 7 разных производителей, включая 2 иностранных [77].

В ходе экспериментальных исследований использовали материалы различных производителей, каждый из которых позиционировал свой материал для функции армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды и предотвращения трещин. Среди производителей, чьи материалы использовались в исследованиях, были следующие организации:

- ООО "Стеклонит Менеджмент" (Россия),
- ЗАО "ГЕО-Р" (Россия),
- ООО "Дорстройматериалы" (Россия),
- ООО "СКМ-Технология" (Россия),
- ООО "ГеоЛайн" (Россия),
- Huesker Synthetic GmbH (Германия),
- ООО "Пульсар и Ко" (Украина).

Все представленные материалы являются георешетками, и они были изготовлены из различных видов сырья. Некоторые из них также имели нетканую подложку.

Виды сырья, использованного при изготовлении геосинтетиков, были следующие:

- Стекловолокно,
- Полиэфир,
- Полиэстер.

Данные работы проводились по следующим этапам:

1) Контроль качества геосинтетических материалов через лабораторные испытания, включавшие:

- оценку прочностных характеристик материала при растяжении;
- измерение относительного удлинения при наибольшей нагрузке;
- проверку теплостойкости геосинтетических материалов;
- оценку устойчивости геосинтетических материалов к воздействию ультрафиолетового излучения (определение соотношения прочности до и после воздействия УФ-излучения);

- анализ устойчивости материала к циклам замораживания и оттаивания (определение соотношения прочности материала после проведения 30 циклов замораживания при температуре  $-18^{\circ}\text{C}$  и оттаивания при комнатной температуре);

- определение гибкости геосинтетических материалов при различных температурах ( $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $-40^{\circ}\text{C}$ );

2) Контроль качества процесса укладки асфальтобетонной смеси:

проверка соответствия технологии укладки геосинтетических материалов (подготовка основания, точность укладки, наличие и правильное закрепление материала, объем уложенного материала);

контроль за соблюдением технологии укладки асфальтобетона (оценка качества укладки и уплотнения в соответствии с [16]);

- оценка соответствия асфальтобетонной смеси требованиям [177];

3) Контроль качества уложенного асфальтобетонного покрытия, включавший:

- определение коэффициента уплотнения асфальтобетона [16];

- измерение водонасыщения;

- проверку толщины слоя [16];

- визуальную оценку сцепления асфальтобетона с геосинтетическим материалом;

4) Эксплуатационный контроль качества покрытия:

- визуальная оценка дефектов (наличие ям, просадок, трещин, шелушений и других повреждений с фиксацией местоположения);

- измерение расстояний между трещинами и величины их раскрытия (с использованием курвиметра и измерительных инструментов по [178] и [179]);

- определение величины колеиности;

- измерение модуля упругости покрытия;

- проверка ровности покрытия с использованием дорожной рейки на участках длиной 300-400 м в соответствии с [16]).

Результаты контроля качества асфальтобетонной смеси и процесса укладки в целом признаны удовлетворительными, однако отмечены отдельные нарушения, такие как перегретая смесь, попадание транспорта на разложенный материал, а также несоответствие части образцов требованиям [177].

Длина каждого участка с геосинтетическим материалом составила 100 м, между данными участками были организованы участки по традиционной конструкции без применения геосинтетических материалов длиной 50 м.



На рисунке 3.20 представлено распределение количества трещин по экспериментальным участкам, при этом длина участков с геосинтетическими материалами превышает длину контрольных участков в два раза.

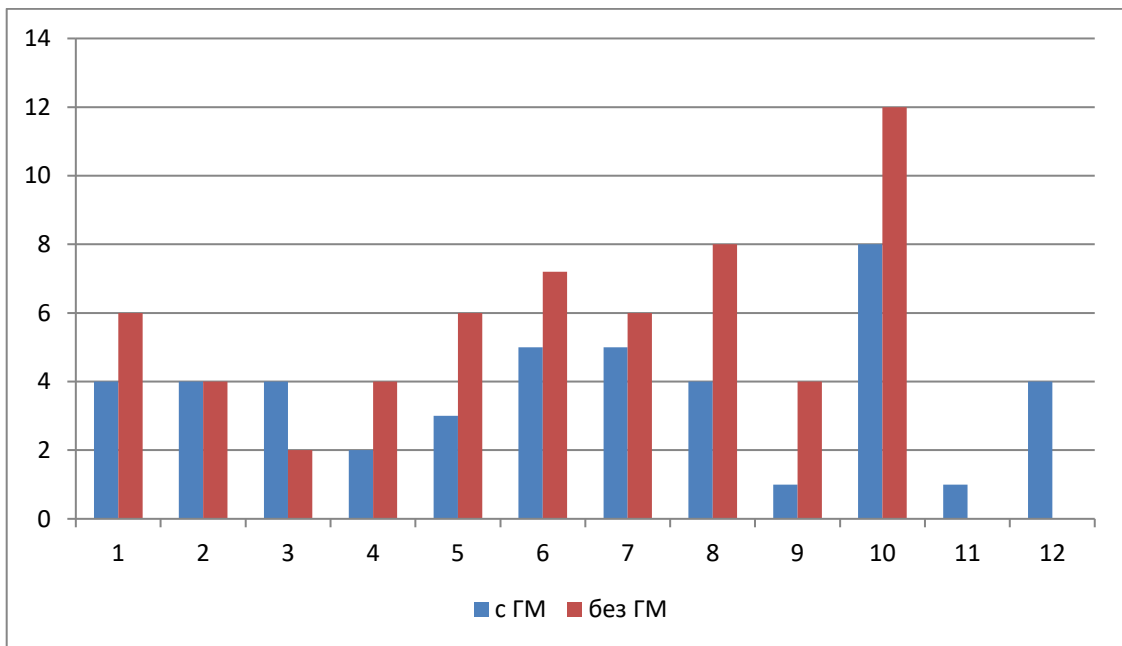


Рисунок 3.20 – Количество трещин на участках с геосинтетическим материалом и без него

Из рисунка 3.14 видно, что большинство участков автодороги с уложенным в дорожной одежде геосинтетическим материалом имеют меньшее количество трещин, чем соседние участки без геосинтетического материала, если привести данные к единице длины.

На рисунках 3.21 и 3.22 представлена зависимость количества трещин на экспериментальных участках в зависимости от фактической максимальной прочности материала и его относительного удлинения при максимальной нагрузке соответственно.

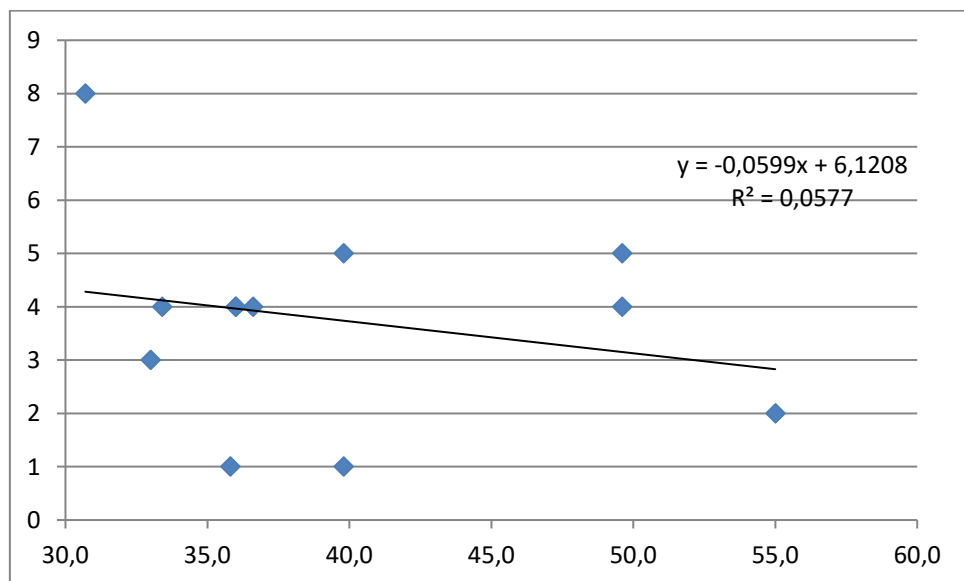


Рисунок 3.21 – Зависимость количества поперечных трещин от прочности геосинтетического материала

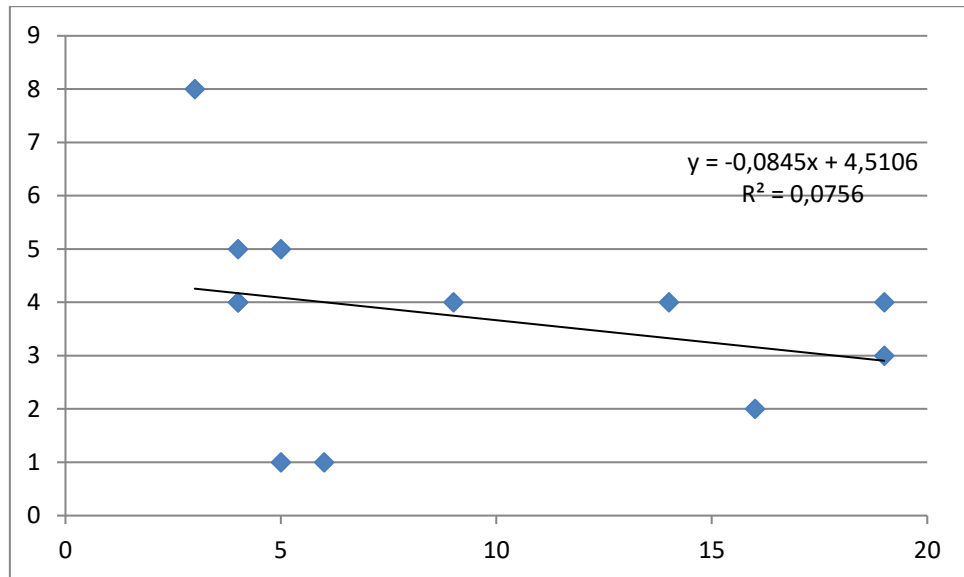


Рисунок 3.22 - Зависимость количества трещин от относительного удлинения геосинтетических материалов

Из рисунков 3.21 и 3.22 видно, что нет явной зависимости анализируемых показателей друг от друга. При этом из рисунка 3.20 следует, что наличие геосинтетического материала существенно снижает процесс образования трещин. Данные модели не учитывают долговечность материалов.

На рисунке 3.23 представлено количество трещин на участках с геосинтетическими материалами в течение 2 лет мониторинга.



Рисунок 3.23 - Трещины на участках с геосинтетическим материалом

На рисунке 3.24 представлено количество трещин на контрольных участках, до укладки и в течение 2 лет мониторинга.



Рисунок 3.24 - Трещины на контрольных участках

Из данных, которые получены в результате эксперимента и на основании которых построены гистограммы на рисунках 3.23 и 3.24, следует, что на участках автодороги с использованием геосинтетического материала количество трещин уменьшилось в 15 раз, а на контрольных - только в 8 раз, в сравнении с количеством трещин, которые были на этих участках до ремонта автомобильной дороги.

При этом корреляции прочностных характеристик (прочность при растяжении и относительное удлинение при максимальной нагрузке) геосинтетических материалов с количеством трещин не обнаружено, результаты представлены на рисунках 3.25 и 3.26.

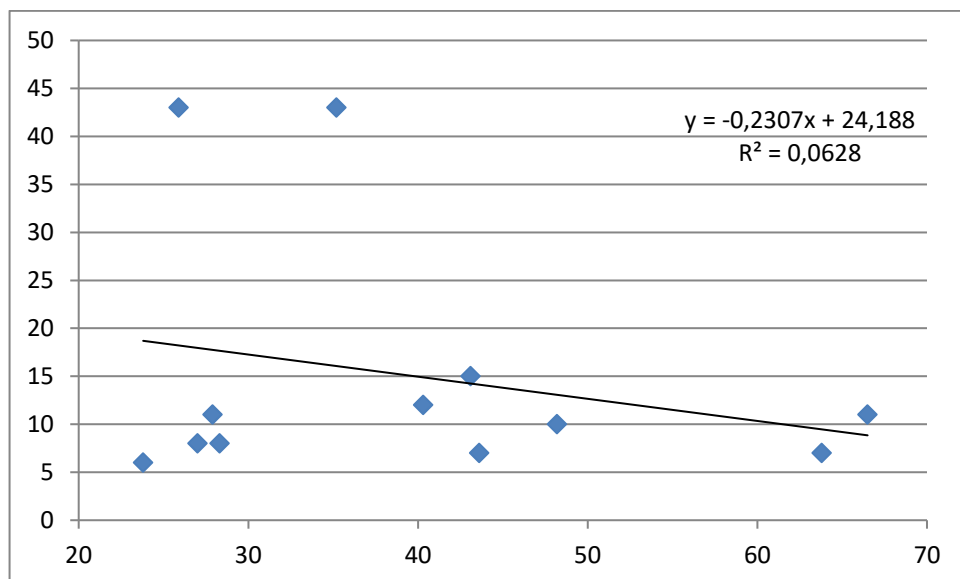


Рисунок 3.25 – Зависимость изменения количества трещин на исходном участке и после укладки асфальтобетона с геосинтетическим материалом в зависимости от прочности ГМ

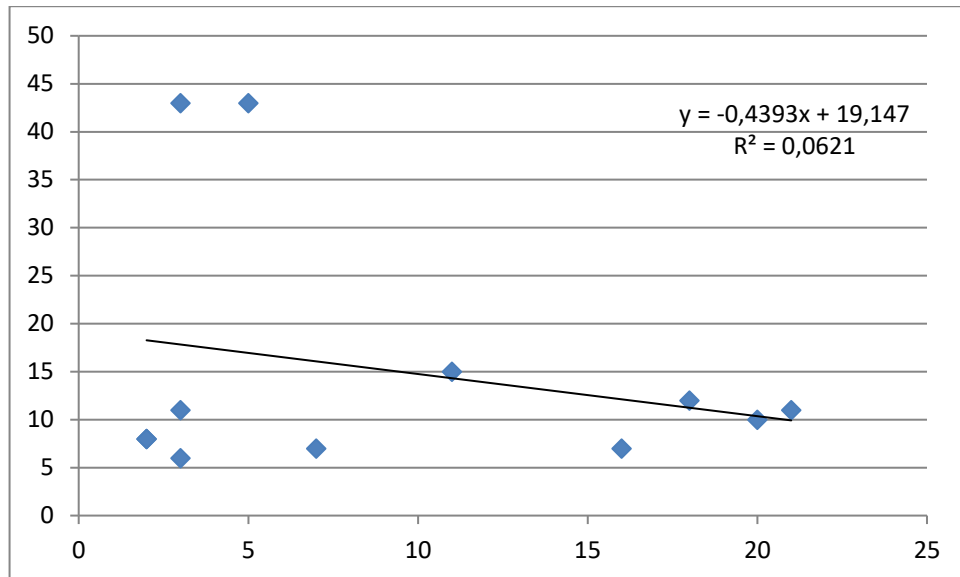


Рисунок 3.26 – Зависимость изменения количества трещин на исходном участке и после укладки асфальтобетона с геосинтетическим материалом в зависимости от относительного удлинения ГМ

На рисунке 3.27 представлено сравнение результатов измерений модуля упругости на участках с геосинтетическим материалом и на соседних контрольных участках. В целом видно, что применение геосинтетических материалов увеличивает в исследуемой конструкции модуль упругости. Среднее значение прочности материалов, на участках, с применением которых модуль упругости увеличился по сравнению с контрольным, составляет 40 кН/м.

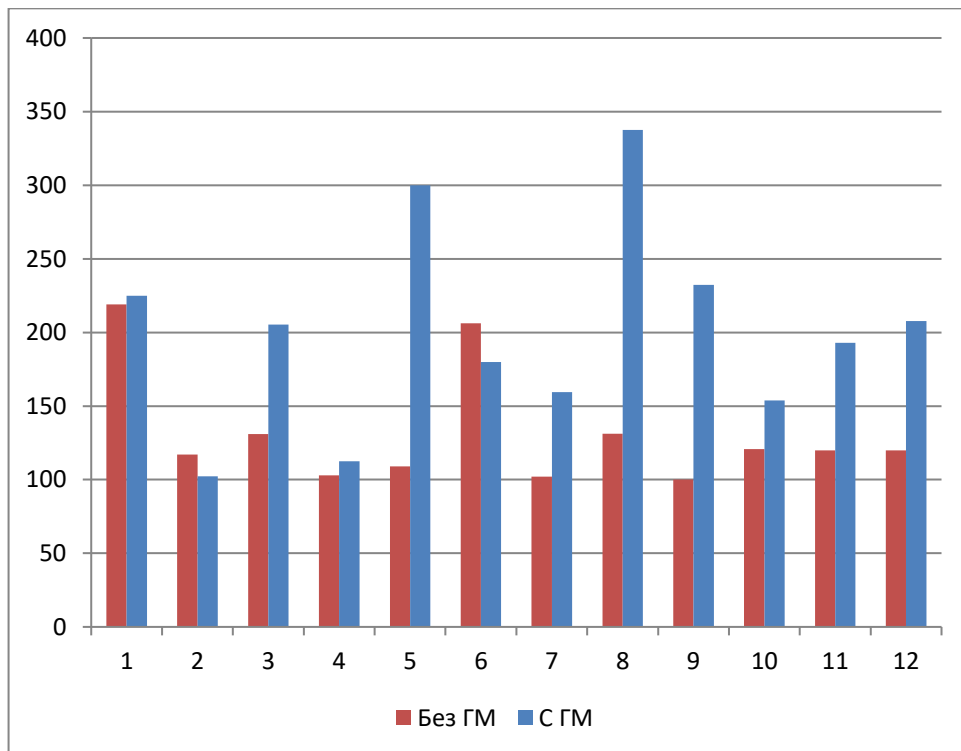


Рисунок 3.27 – Сопоставление результатов эксперимента по определению модуля упругости

Если же сопоставлять величину колеи на исследуемых участках, то зависимость от применения геосинтетического материала величины колеи не обнаружена, результаты представлены на рисунке 3.28.

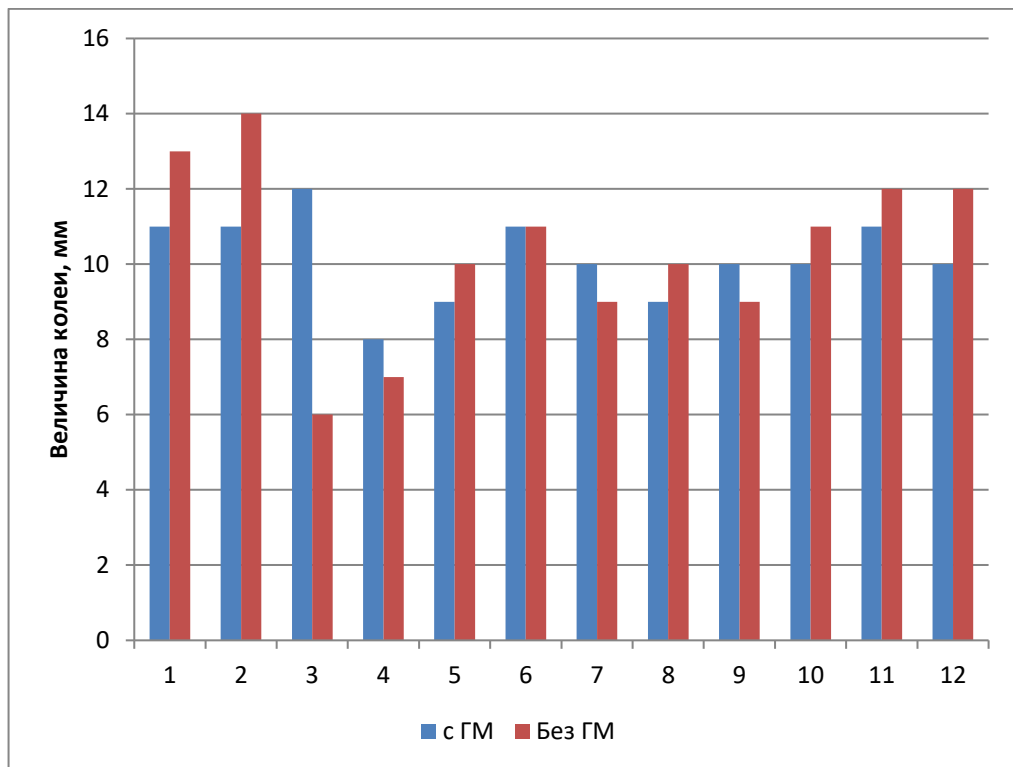


Рисунок 3.28 – Колееобразование на исследуемом участке через 2 года после ремонта

Результаты лабораторных испытаний материалов на устойчивость к ультра-фиолетовому излучению составили от 69% до 104%, а среднее значение составило 91%. Превышение потери прочности относительно 100% говорит о существенном расхождении физико-механических свойств некоторых геосинтетических материалов, примененных в данном эксперименте, в рамках одного рулона. С учетом данных особенностей было предложено установить требование по устойчивости к ультрафиолетовому излучению в 90%.

Результаты лабораторных испытаний материалов на теплостойкость составили от 87% до 132%, а среднее значение составило 98%. Превышение потери прочности относительно 100% говорит о существенном расхождении физико-механических свойств некоторых геосинтетических материалов, примененных в данном эксперименте, в рамках одного рулона. С учетом данных особенностей было предложено установить требование по устойчивости к теплостойкости в 90%.

Результаты лабораторных испытаний материалов на морозостойкость составили от 85% до 130%, а среднее значение составило 93%. Превышение потери прочности относительно 100% говорит о существенном расхождении физико-механических свойств некоторых геосинтетических материалов, примененных в данном эксперименте, в рамках одного рулона. С

учетом данных особенностей было предложено установить требование по устойчивости к ультрафиолетовому излучению в 90%.

Данные требования были интерпретированы в [71].

Далее были продолжены исследования для анализа технических требований, предъявляемых к ГМ для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды. Были рассмотрены результаты испытаний 97 образцов ГМ различного строения (тканые и нетканые полотна; тканые, вязаные и экструдированные георешетки), которые изготовлены из различного сырья (ПЭТФ, стекловолокно, базальт). По результатам испытаний было установлено, что значения некоторых технических характеристик ГМ, заявленных организациями-изготовителями для армирования асфальтобетонных слоев, не соответствуют требованиям [71].

На основании статистического анализа из общей совокупности данных материалов были выбраны характерные представители геосинтетических материалов - 6 образцов. В дальнейшем данные образцы были использованы в исследованиях высокотемпературных и низкотемпературных свойств асфальтобетона.

Определение низкотемпературных свойств (прочность на растяжение при изгибе и предельной относительной деформации растяжения) асфальтобетонных образцов, армированных и неармированных геосинтетическим материалом, осуществляли на основе методики [180].

Определение высокотемпературных свойств (стойкости к колееобразованию прокатыванием нагруженного колеса) образцов асфальтобетона, армированных и неармированных геосинтетическим материалом, осуществляли на основе методики [181].

Фото образцов (балочек) после разрушения приведены на рисунке 3.29.



а – образец в опорном устройстве после завершения испытания; б – образец без армирующей прослойки из ГМ, в – образец с армирующей прослойкой из ГМ

Рисунок 3.29 - Фото разрушенных образцов – балочек

Фото образцов-плиток с колеей приведены на рисунке 3.30.



Рисунок 3.30 - Фото образцов-плиток с колеей

Графическая интерпретация результатов статистического анализа – графики средних значений и размахов предела прочности на растяжение при изгибе и глубины колеей для асфальтобетонных образцов, армированных и неармированных ГМ – приведены на рисунках 3.31 и 3.32.

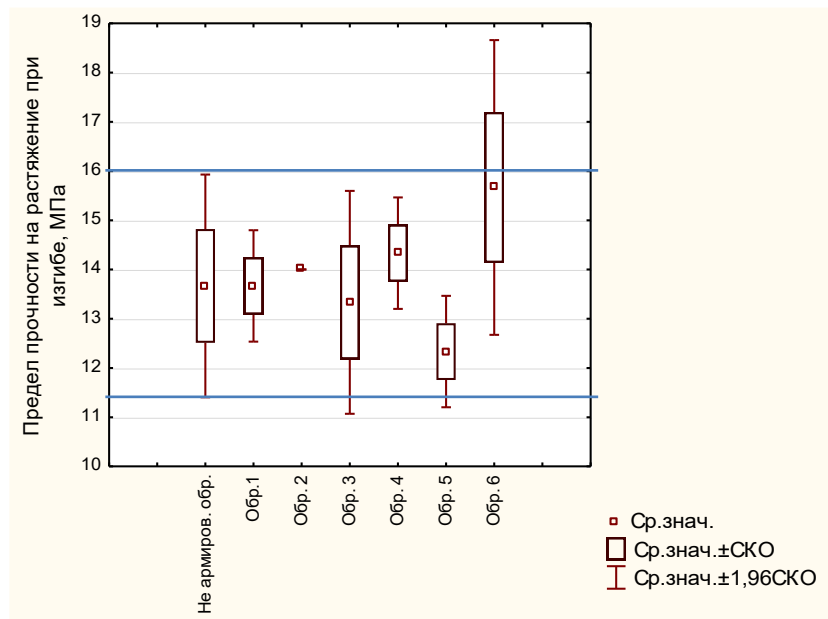


Рисунок 3.31 – График средних значений и размахов предела прочности на растяжение при изгибе для асфальтобетонных образцов, армированных и неармированных ГМ

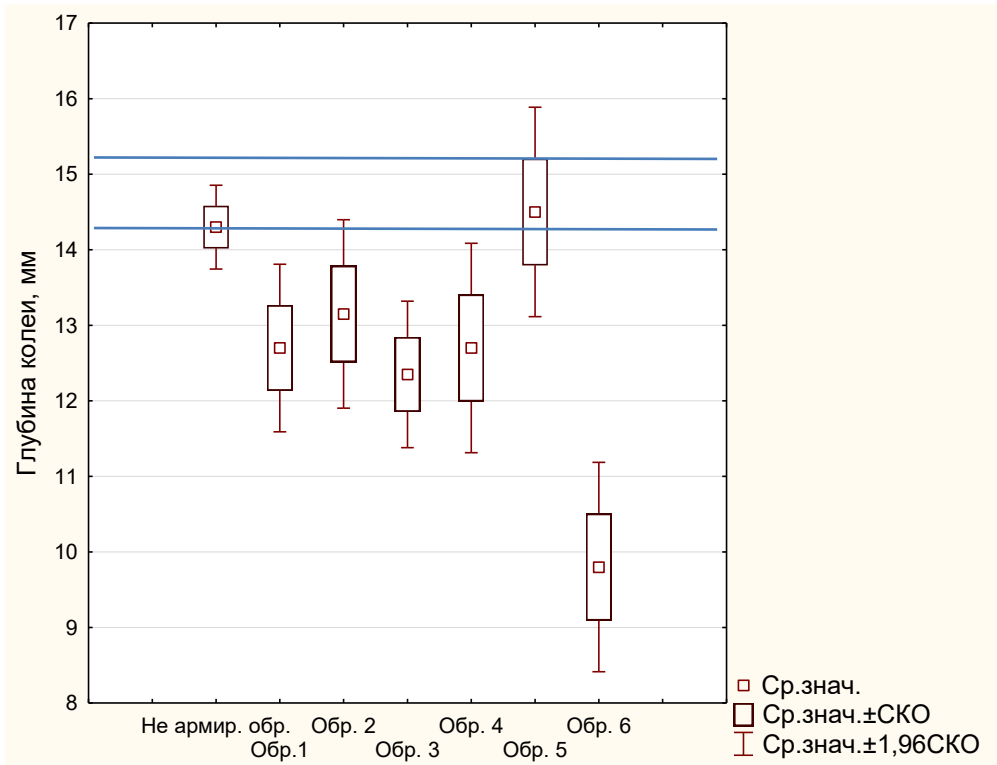


Рисунок 3.32 - График средних значений и размахов глубины колеи для асфальтобетонных образцов, армированных и неармированных ГМ

На рисунке 3.31 видно, что расхождение между результатами испытаний асфальтобетонных образцов, армированных ГМ №1 - №5, не является статистически значимыми. Исключение составляет асфальтобетонный образец, армированный ГМ №6, для которого зафиксировано увеличение предела прочности на растяжение при изгибе при низкотемпературных испытаниях. Данный эффект может быть связан со структурными и конструктивными особенностями данного материала - тканая георешетка из полиэфира замедляет образование трещин в конструкции, равномерно распределяя поступающую на него нагрузку, а битумная пропитка полиэфирной георешетки позволяет обеспечить наилучшее сцепление материала с асфальтобетоном путем повышения его сопротивляемости растягивающим усилиям при активной длительной эксплуатации дороги. Таким образом, битумная пропитка, термоскрепленная с тонким нетканым материалом, обеспечивает повышенную адгезию между слоями покрытия дорожной одежды.

График средних значений и размахов глубины колеи для асфальтобетонных образцов, армированных и неармированных ГМ, представлено на рисунке 3.32, свидетельствует об уменьшении глубины колеи асфальтобетонных образцов при армировании ГМ (исключение составляет образец ГМ №5). Существенное уменьшение глубины колеи наблюдается у асфальтобетонного образца, армированного ГМ №6. Очевидно, что данное изменение высокотемпературных и низкотемпературных свойств асфальтобетонных образцов, армированных ГМ №6, обусловлено особенностями структуры и конструкции материала.



В результате проведенных испытаний установлено, что армирование асфальтобетонных образцов геосинтетическими материалами оказывает положительное влияние на их эксплуатационные характеристики, включая стойкость к образованию колеи при высоких температурах и механические свойства при низких температурах, такие как предел прочности на растяжение при изгибе и предельная относительная деформация растяжения. Однако объем полученных данных недостаточен для подтверждения статистической значимости этих результатов.

Особое внимание следует уделить обеспечению необходимого уровня сцепления между слоями асфальтобетона в дорожных одеждах, как для неармированных, так и для армированных геосинтетическими материалами покрытий. При этом критически важно учитывать нормирование количества подгрунтовки, используемой при укладке. Ввиду того, что геосинтетические материалы производятся из различных типов сырья, с применением разнообразных пропиток и имеют различную геометрию, при нормировании напряжения сдвига следует учитывать необходимость нормирования количества подгрунтовки, что должно быть отражено в соответствующих стандартах, разрабатываемых производителями.

На образцах геосинтетических материалов, соответствующих [71] были проведены испытания по оценке повреждаемости в процессе уплотнения. Для этого были подготовлены образцы с прослойкой из геосинтетического материала в секторном уплотнителе. До того как асфальтобетон остыл из него аккуратно извлекался геосинтетический материал, после чего определялась по [121] его остаточная прочность.

Данные результаты испытаний были сопоставлены с результатами испытаний аналогичных образцов на устойчивость к циклическим нагрузкам. Разница между потерей прочности при циклических нагружениях и потерей прочности при укладке в асфальтобетон с последующим уплотнением в секторном уплотнителе составила в среднем 1,8 раза, среднеквадратичное отклонение 1,19, а коэффициент корреляции 0,46. Данные получены на 9 образцах геосинтетических материалов различных видов и производителей и соответствующие [71], представлено на рисунке 3.33.

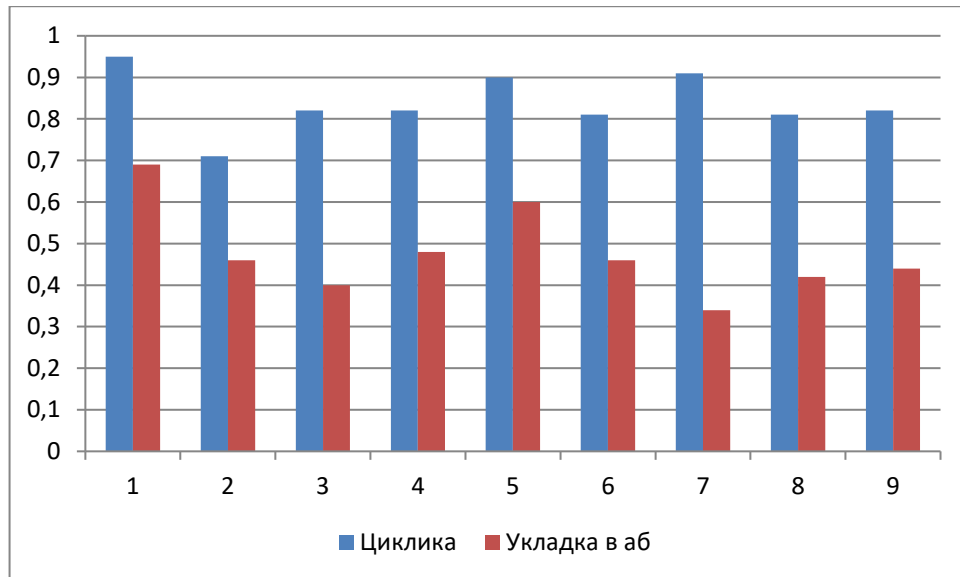


Рисунок 3.33 – Сопоставление результатов потери прочности от механических воздействий при укладке

Установлено, что оценка повреждения геосинтетического материала после уплотнения в секторном уплотнителе наиболее достоверно моделирует процесс укладки асфальтобетонной смеси при строительстве дорожного покрытия, но данный метод вводит и дополнительные неопределенности, которые связаны с типом и гранулометрическим составом асфальтобетонной смеси, которые, несомненно, будут влиять на результат, а также стоимость проводимых лабораторных испытаний. Поэтому, было дано предпочтение методике по определению повреждаемости при циклических нагрузках, в связи с чем, было принято решение ввести в национальный стандарт показатель устойчивости к циклическим нагрузкам – не менее 80 %.

Проведенные исследования участков автомобильной дороги показали, что геосинтетические материалы, уложенные между старым асфальтобетонным покрытием и новым слоем износа при ремонте дороги, уменьшают скорость появления новых поперечных трещин почти в два раза в первые два года наблюдения. Можно предположить, что однослойное армирование геосинтетическими материалами способно эффективно бороться с отраженными трещинами, прорастающими из старого покрытия в новое, что подтверждает выдвинутую гипотезу и дальнейшее моделирование напряженного-деформированного состояния асфальтобетонных слоев в окрестности трещины.

Результаты исследований геосинтетических материалов для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды показали, что:

1) Применение однослойного армирования специальными геосинтетическими материалами перед укладкой нового слоя асфальтобетонного покрытия является эффективным при борьбе с прорастанием трещин со стороны старого асфальтобетонного покрытия при

условии использования материалов с максимальной поверхностной плотностью на основе высокомодульных, например, стеклянных волокон.

2) Однослойное армирование неэффективно при борьбе с усталостными трещинами и температурными трещинами, возникающими на верхней поверхности покрытия по причине слишком малой жесткости армирующих слоев на растяжение в сравнении с жесткостью асфальтобетонных слоев.

3) Для надежной оценки напряженно-деформированного состояния слоев дорожной одежды требуется построение адекватной температурной модели, принимающей во внимание сезонные и суточные изменения температуры.

4) Предложенный расчетный алгоритм учитывает в первом приближении вязкоупругие свойства асфальтобетона, а именно, зависимость его модуля жесткости от температуры и времени приложения нагрузки. Вычисление напряжений по упрощенному методу Хиллса и Брайена не позволяет учесть эффект релаксации напряжений, однако, влиянием этого эффекта можно пренебречь при низкой температуре при условии ограничения расчетного времени.

Разработанная методология была адаптирована для данной функции, определены воздействующие факторы и предложена модель расчета прочностных характеристик, которая применима как для максимальной прочности при растяжении, так и для модуля упругости ГМ.

$$T_{\text{дол}} = \frac{T_{\text{нор}}}{k_{\text{общ}}} \quad (3.10)$$

$$k_{\text{общ}} = k_{12} \cdot k_3 \cdot k_{4x} \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot k_7 \quad (3.11)$$

где  $k_{12}$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений,

$k_3$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия УФ излучения,

$k_{4x}$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия агрессивных сред,

$k_6$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от многократного замораживания и оттаивания,

$k_7$  - коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия повышенных температур.

Полученные в результате исследований требования к геосинтетическим материалам для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды были использованы при разработке ГОСТ Р 55029 и представлены в таблице 3.29 [71].

Таблица 3.29 – требования к геосинтетическим материалам для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды

Характеристика ГМ	Значение
Прочность при растяжении, не менее кН/м	40
Устойчивость к УФ-излучению, %	90
Устойчивость к кислотам и щелочам, %	50
Устойчивость к циклическим нагрузкам, %	80
Устойчивость к циклам замораживания и оттаивания, %	90
Устойчивость к повышенным температурам, %	90
Напряжение сдвига слоев асфальтобетонных покрытий дорожных одежд, армированных геосинтетическим материалом, МПа	1,0
Гибкость при минус 10 С	отсутствует
Плотность, кг/кв. м; кг/куб. м	справочное

### 3.4 Выводы по главе 3

1) Проведены натурные испытания геосинтетических материалов с различной областью применения:

- для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды;
- для армирования слоев дорожной одежды из дискретных материалов;
- для разделения слоев дорожной одежды из дискретных материалов;
- для борьбы с эрозией на откосах земляного полотна.

2) Впервые была разработана методика и проведены полигонные испытания для оценки механических повреждений при укладке геосинтетических материалов в реальных условиях на испытательном полигоне.

3) Установлены факторы, определяющие требования к свойствам геосинтетических материалов в зависимости от области их применения.

4) Результаты исследований, изложенных в данной главе, были использованы для нормирования характеристик геосинтетических материалов в следующих национальных стандартах [69]; [70]; [71]; [72].

## ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ И ПОЛЕВЫХ МЕТОДИК ДЛЯ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

### 4.1 Метрологическое обеспечение исследований

Прошедшая в 2008 году реформа в области обеспечения единств измерений изменила концептуальный подход, сменив организационно-управленческую структуру со средств измерений на измерения. Следовательно, теперь ключевым элементом, с которого должен начинаться любой эксперимент является измерение.

В соответствии с [113], измерение - совокупность операций, выполняемых для определения количественного значения величины.

Для выполнения измерений необходимо разработать последовательность действий, которую можно назвать алгоритмом измерений. Этот алгоритм представляет собой методику (или метод) измерений. В целях унификации подходов к разработке таких методик в Российской Федерации принят национальный стандарт [114]. Согласно этому стандарту, требуется учитывать факторы, оказывающие влияние на результаты испытаний, такие как:

- условия проведения испытаний;
- требования к измерительным средствам, вспомогательному оборудованию и реактивам;
- порядок подготовки образцов;
- последовательность выполнения измерений;
- процедура обработки полученных данных;
- оформление результатов.

Следовательно, каждый из перечисленных факторов оказывает влияние на конечный результат измерений, и любое отклонение от них может привести к изменению результата. Организация испытаний, ориентированная только на измерительные средства, не гарантирует достижения сходимости и воспроизводимости результатов.

Именно поэтому, когда возникает необходимость нормировать какой-либо параметр важно установить следующие его характеристики:

- корректное, желательно, уникальное название измеряемого параметра, которое обеспечит понимание сути проводимых измерений;
- единицу физической величины, которая применяется при измерении нормируемого параметра. Единица физической величины должна соответствовать [115];
- количественное значение единицы физической величины. Именно с этим параметром будет сопоставляться числовое значение, полученное в результате измерений и приниматься решение о соответствии или несоответствии;

- методика (метод) проведения измерений.

Именно такой комплекс характеристик должен быть нормирован у любого параметра с целью обеспечения сходимости и воспроизводимости результатов измерений, а, следовательно, и принятия решения о соответствии параметра установленной норме.

И именно поэтому, как было уже сказано выше, методика (метод) измерений является ключевым элементом, характеризующим требования, и выступает в неразрывной связи с числовым значением единицы физической величины.

Особо стоит отметить, что применение более точных средств измерений, чем это нормировано в методике (методе) измерений, может исказить результат в задаче классификации соответствует или не соответствует, например, отправив в брак изделие, которое было бы признано годным средством измерений с более грубыми метрологическими характеристиками, но при этом соответствующим требованиям методики (метода) измерений.

Из сказанного выше следует, что для проведения исследования необходимо разработать или выбрать соответствующие методики (методы) измерений в виде существующих нормативных документов и только с их использованием выполнять исследования и набирать статистические данные. Более того все полученные результаты можно считать условными и выявленные закономерности будут применимы только к выборке результатов, полученных с применением заданных методик (методов) измерений.

Очевидно, что выбранные методики (методы) измерений должны быть четкими и однозначными, а в случае необходимости принятия какого-либо решения все возможные варианты и условия его принятия должны быть определены.

Указанные далее методики разработаны под руководством автора работы в рамках выполнения научно-исследовательских работ по заданию Федерального дорожного агентства [116].

#### 4.2 Разработка и совершенствование лабораторных методик определения физико-механических характеристик геосинтетических материалов

##### 4.2.1 Усовершенствование методики определения прочностных характеристик геосинтетических материалов

Как было отмечено выше, при выборе методики (метода) измерений необходимо полагаться на действующие нормативные документы или с учетом их разрабатывать новые.

Прочность при растяжении - максимальная нагрузка на единицу ширины, при которой образец растягивается до разрушения.

Основное различие методик испытания по [117] и по [118] заключается в том, что разными способами нормируется скорость проведения испытания:

- по европейской норме регламентируется установить постоянную скорость испытательной машины таким образом, чтобы обеспечивалась удлинение образца  $(20 \pm 5)\%$  в минуту между метками, которые наносятся на образец на расстоянии 60 мм (по 30 мм от середины испытательной длины образца) и по которым происходит оценка измерения удлинения при помощи экстензометра, при этом также допускается измерение относительного удлинения по перемещению подвижной траверсы испытательной машины. Также данной нормой допускаются различные виды зажимов: тисочные, клиновые, барабанного типа;

- в соответствии с [118] регламентируются разные скорости перемещении подвижной траверсы испытательной машины в зависимости от относительного удлинения при максимальной нагрузке материала, которые разбиты по диапазонам до 5%, свыше 5% до 25%, свыше 25%.

В силу того, что при выборе оборудования целесообразно отталкиваться от широко распространенного и применяемого во многих отраслях, а также чтобы отсутствовала привязка к конкретному производителю, разрывная машина выбиралась в соответствии с [119]. В данном национальном стандарте экстензометр был не предусмотрен и удлинение измеряется по перемещению зажима. В связи с этим при разработке методики целесообразно устанавливать требования к разрывным машинам в соответствии с [119].

В настоящее время исследования в области механики разрушения полимерных материалов приобретают всё большее значение, выходя за пределы оценки их несущей способности. Управление процессом разрушения и понимание его закономерностей играет ключевую роль в различных отраслях промышленности, влияя на технику и технологии. Например, для конструкций и сооружений важно увеличить их долговечность за счет замедления роста трещин, тогда как при резке материалов более эффективно их разрушение достигается через снижение прочности.

При увеличении скорости нарастания нагрузки, а соответственно и скорости роста напряжений и деформаций, материалы, находящиеся в пластическом состоянии, показывают тенденцию к повышению сопротивления деформированию. С увеличением скорости деформирования возрастает предел текучести и временное сопротивление. Особенно выражено это влияние у пластмасс и других органических материалов, в то время как у металлов оно проявляется только при значительных различиях в скоростях нагружения.

Для изучения зависимости предельных прочностных характеристик полимерных материалов от скорости нагружения были проведены испытания (ТОГУ, г. Хабаровск, РФ) на

одноосное растяжение при комнатной температуре, где скорость нагружения варьировалась от 173 до 1110 мм/час [120].

Анализ полученных данных показал, что скорость нагружения оказывает существенное влияние на процесс разрушения материала. Это выражается как в изменении временного интервала до разрушения образца или достижения предела вынужденной эластичности, так и в изменении предельных прочностных характеристик. Для всех исследованных материалов увеличение скорости нагружения в заданном диапазоне привело к сокращению времени до разрушения или появления "шейки". В термопластичных материалах (капролон, фторопласт) зарождение "шейки" происходит при более высоких значениях предела вынужденной эластичности, в то время как у реактопластов наблюдается рост предела прочности.

Также были проведены испытания трёх геосинтетических материалов, применяемых в дорожном строительстве, изготовленных тремя разными производителями. Скорость нагружения варьировалась от 5 до 100 мм/мин, что соответствует Европейским нормам и [118].

Было выбрано 3 материала на основе разного сырья: полиэфир, стекловолокно, полиэстер. Испытания проводились при следующих скоростях 5, 7, 10, 30, 50 и 100 мм/мин. При каждой скорости измерения проводились на 5 образцах. Далее полученный результат прочности и относительного удлинения образца усреднялся и оценивалась зависимость измеряемых характеристик от скорости.

Эксперимент проводился на разрывной машине с относительной погрешностью показаний разрывной нагрузки не более 1,0% от измеряемой величины, погрешностью показаний удлинения не более 1,0% от измеряемой величины, оборудованной зажимами тисочного типа и с точностью установления скорости нагружения 1 мм/мин. Разрывная машина соответствовала требованиям [119].

Результаты эксперимента представлены на рисунках 4.1 и 4.2.



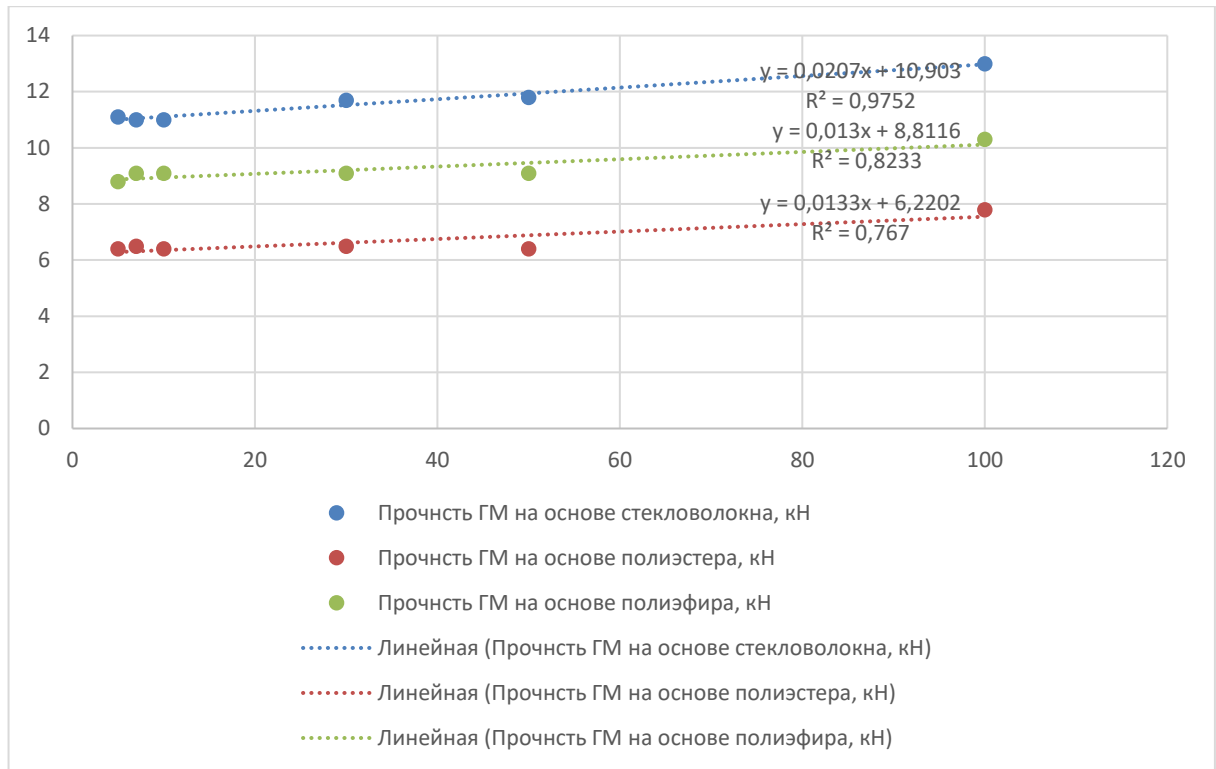


Рисунок 4.1 - Зависимость прочности ГМ от скорости нагружения

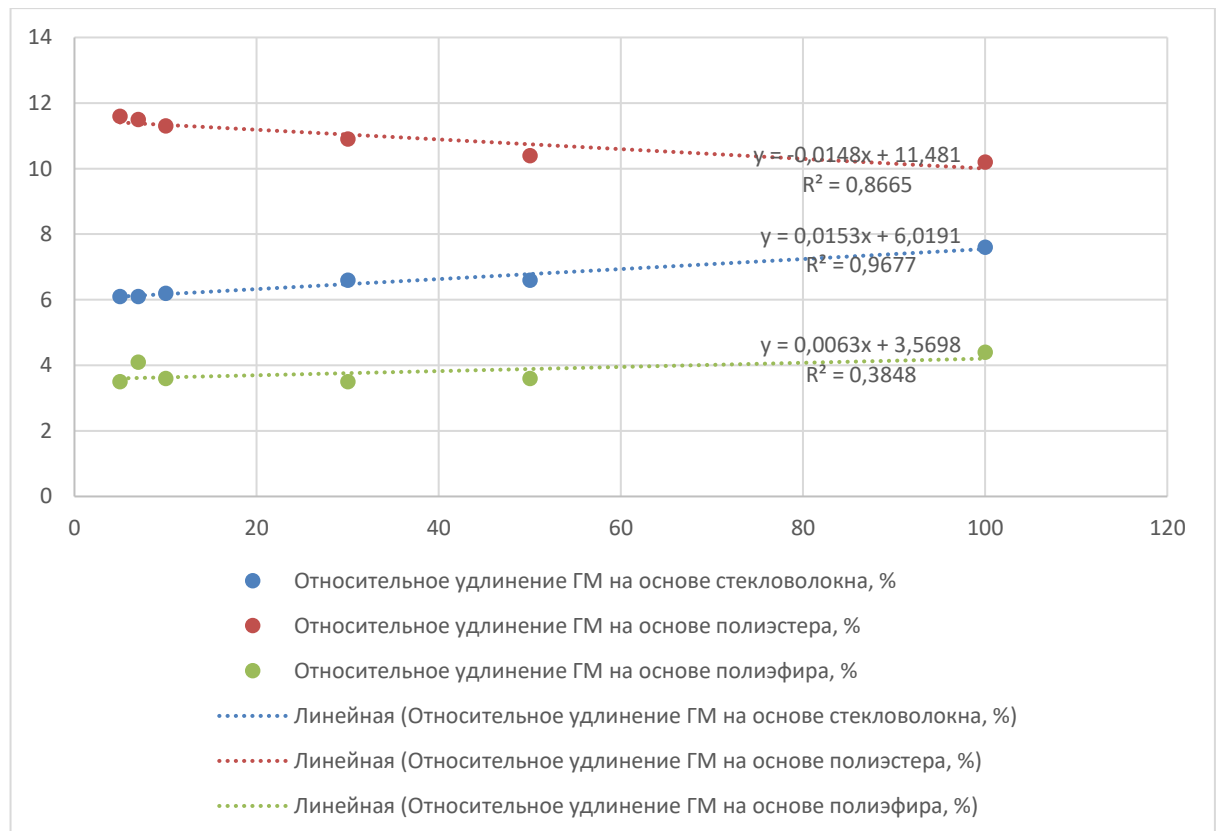


Рисунок 4.2 - Зависимость относительного удлинения ГМ от скорости нагружения

Из анализа рисунков 4.1 и 4.2 следует, что существенного влияния на прочностные характеристики геосинтетических материалов скорость нагружения в диапазоне от 5 до 100

мм/мин не влияет, поэтому в разрабатываемой методике (методе) измерений для ускорения проведения испытаний целесообразно выбрать скорость нагружения 100 мм/мин.

Самый простой и надежный вариант применяемых при испытании зажимов – это зажимы тисочного типа, еще одним немаловажным плюсом их использования является возможность измерения удлинения образца по перемещаемой траверсе. Но есть и отрицательный аспект их применения, который и был решен при разработке методики испытаний – разрушение образца на границе зажима при высокой степени сжатия образца в зажиме или же выскальзывание образца – при недостаточной силе сжатия.

[117] в этом случае предлагает следующие варианты:

- зажим может быть доработан (the jaw may be padded);
- испытательный образец может быть обернут в области зажима (the test specimen may be coated under the jaw-face area);
- поверхность зажима может быть усовершенствована (the jaw face may be modified).

Каких либо конкретных рекомендаций по применяемым насечкам, поверхности сами зажимов, либо же применяемых материалов в качестве прокладок или доработки самих образцов в действующих нормативных документах не определено.

Для оценки важности нормирования зажимов и их влияния на результат испытания был проведен эксперимент на 12 различных геосинтетических материалах. В рамках данного эксперимента было подготовлено по 6 образцов в продольном и по 6 образцов в поперечном направлениях для испытания в зажимах без каких-либо доработок, в тех же самых зажимах с использованием бельтинга (прочная хлопчатобумажная техническая ткань) и в тех же самых зажимах образцов, обмотанных малярной клейкой лентой (бумажным скотчем). Бельтинг и малярная лента были выбраны на основе опыта производителей при испытании своих геосинтетических материалов.

Результаты испытаний приведены на рисунках 4.3 и 4.4 для продольного направления и 4.5 и 4.6, соответственно, для поперечного.

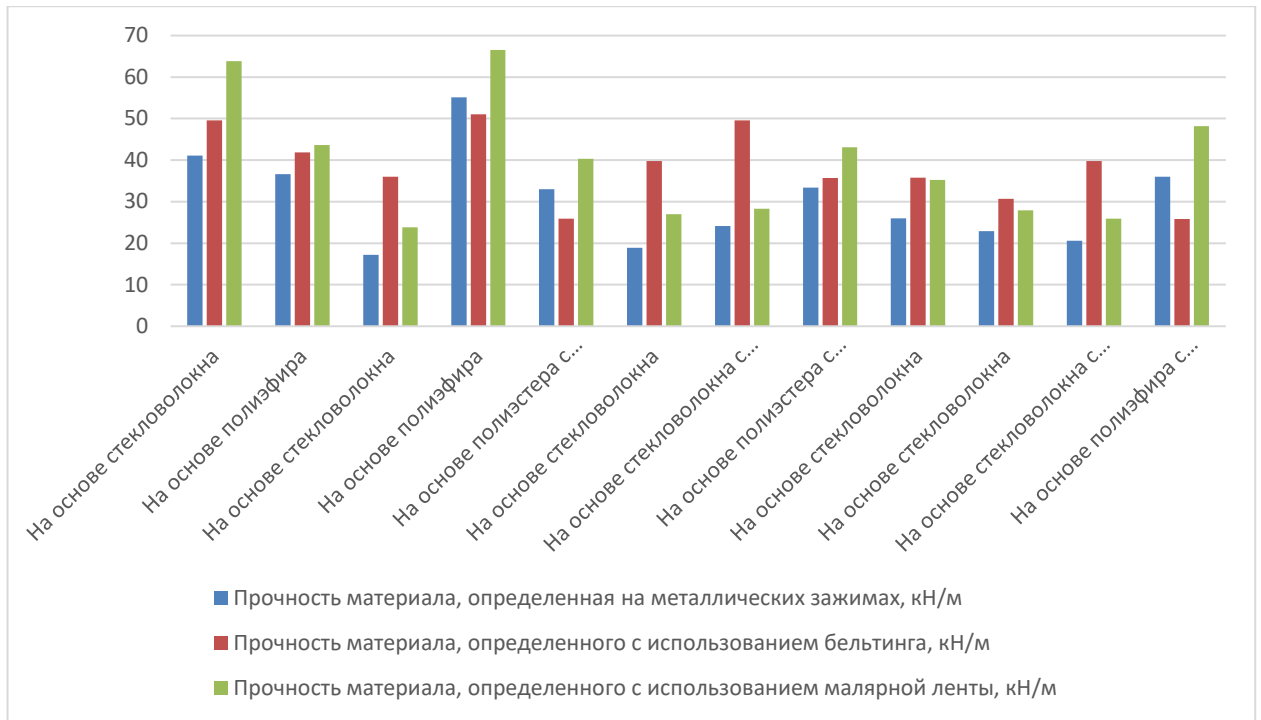


Рисунок 4.3 - Прочность ГМ в продольном направлении, испытанных с различной модификацией зажимов

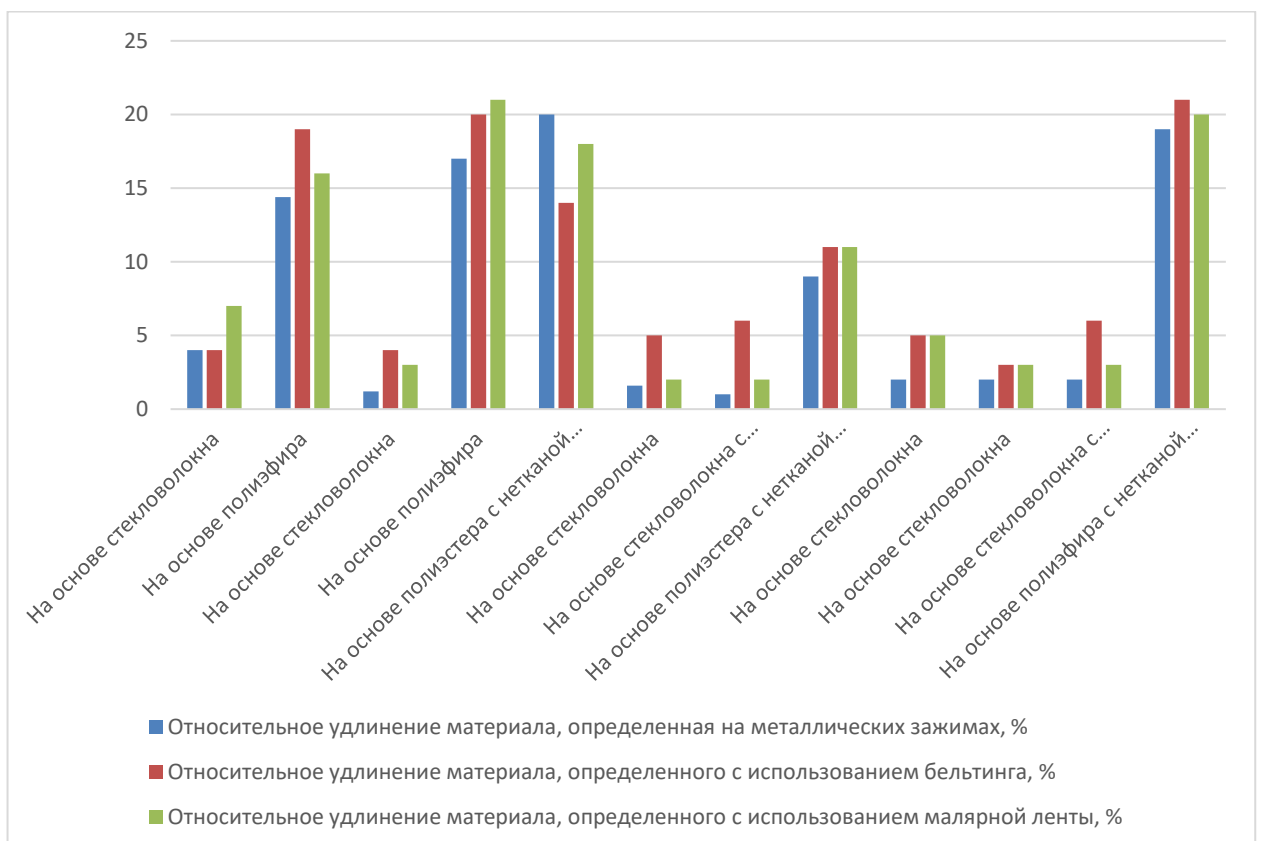


Рисунок 4.4 - Относительное удлинение ГМ в продольном направлении, испытанных с различной модификацией зажимов

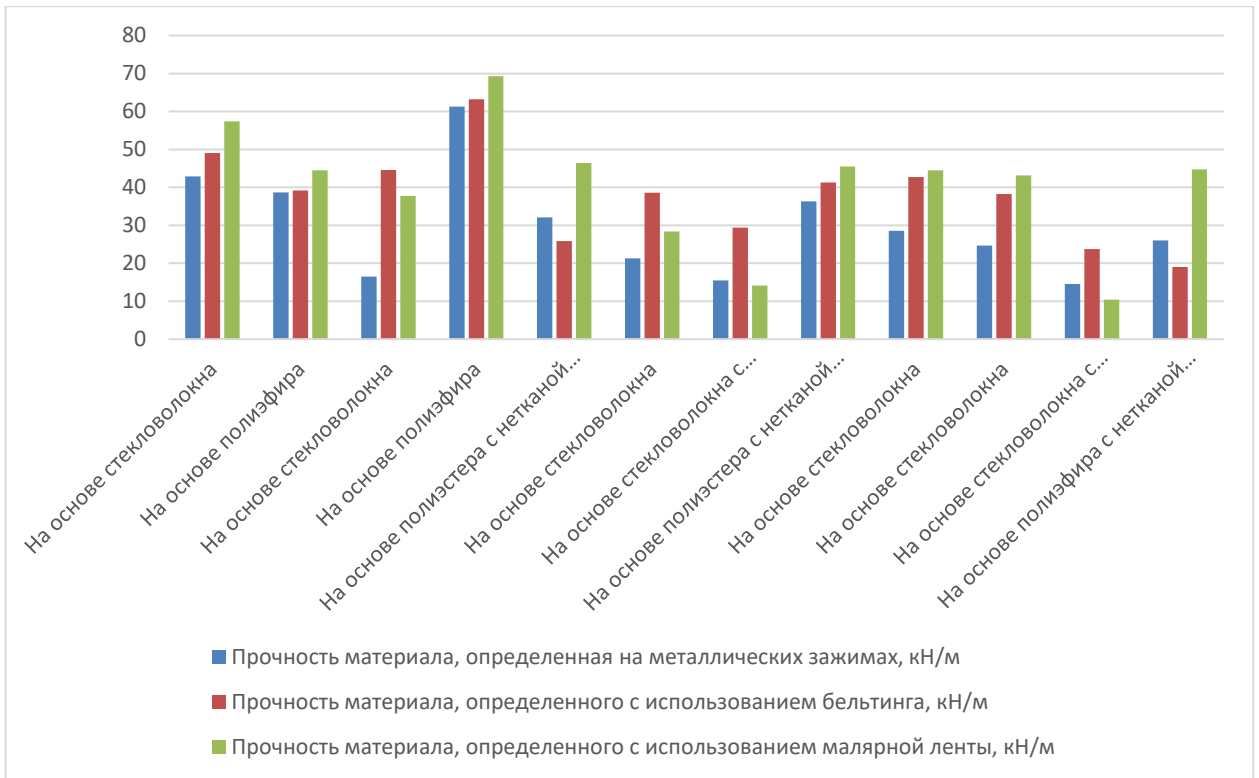


Рисунок 4.5 – Прочность ГМ в поперечном направлении, испытанных с различной модификацией зажимов

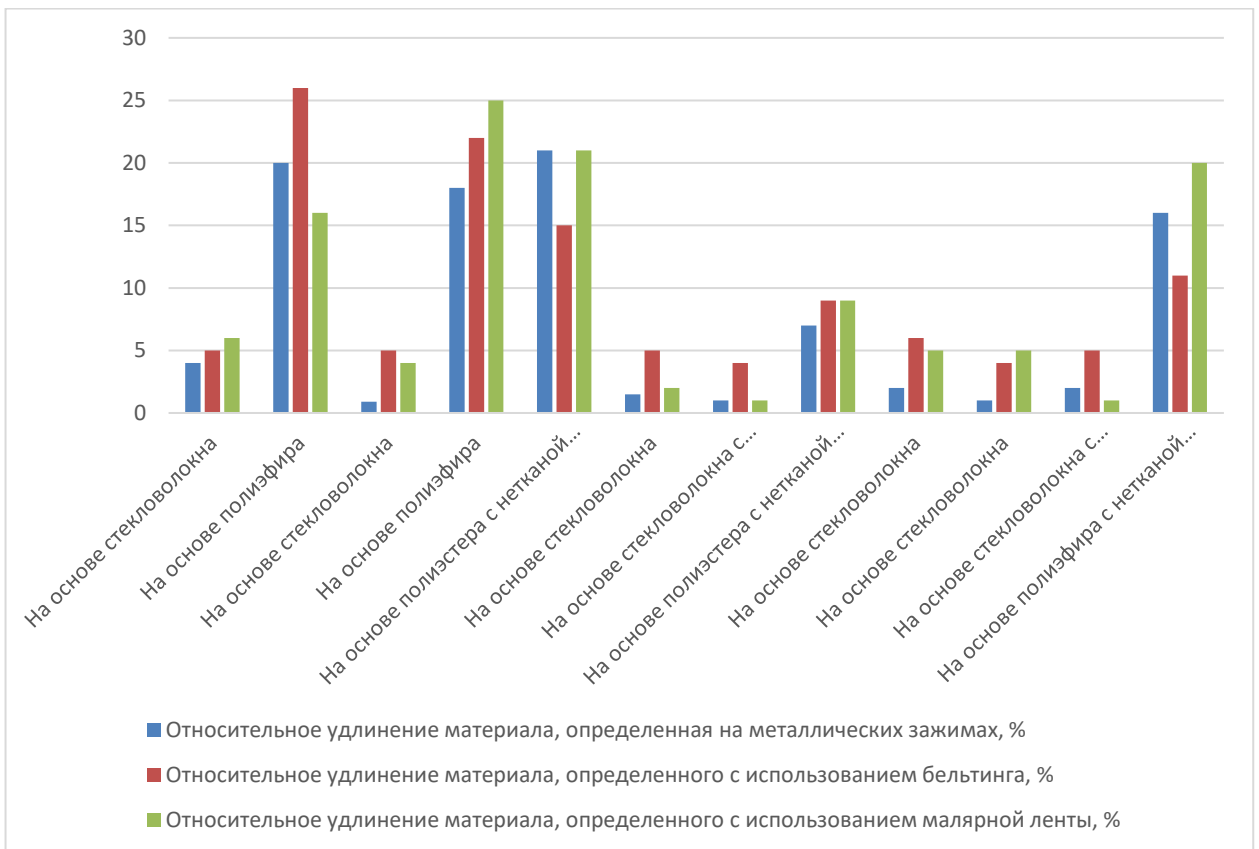


Рисунок 4.6 – Относительное удлинение ГМ в поперечном направлении, испытанных с различной модификацией зажимов

На основании анализа рисунков 4.3 – 4.6 можно сделать вывод, что модификация оказывает влияние на характеристики материалов. Учитывая доступность малярной ленты, было принято решение использовать обязательную обмотку образцов по 5 слоев с каждой стороны. Также были определены следующие критерии:

- равномерное приложение усилия при затягивании зажимов;
- допустимое выскользывание из зажима не должно превышать 5 мм, при этом, если выскользывание составляет менее 5 мм, необходимо внести поправку в расчет относительного удлинения;
- в случае разрушения образца на расстоянии менее 5 мм от зажима, результаты испытания не учитываются для дальнейшей обработки;
- количество образцов, испытанных в каждом направлении, должно составлять не менее 6.

Еще одним значимым критерием, который ранее не нормировался и оказывает влияние на результаты испытаний, является метод определения количества ребер в единице ширины материала. До настоящего момента расчет количества ребер производился на основе паспортных данных о размере ячеек.

В результате проведенных исследований был разработан национальный стандарт [121].

#### 4.2.2 Усовершенствование методики определения устойчивости геосинтетических материалов к ультрафиолетовому излучению

Устойчивость геосинтетических материалов перед воздействием ультрафиолетового излучения оценивается путем измерения потери прочности материала в процентах от его изначальной прочности без ультрафиолетового воздействия. Этот метод имитирует способность материала сохранять свои свойства при хранении на открытом воздухе и при укладке без дополнительных защитных слоев.

Однако методика [118], согласованная с европейским стандартом [122], обладает существенным недостатком, заключающимся в использовании узких образцов при оценке потери прочности. Учитывая, что прочность материалов традиционно определяется на образцах широкой полосы, целесообразно было бы внедрить единый обязательный стандарт для размеров образцов и проводить все испытания в соответствии с требованиями методики [121].

Отдельного внимания заслуживает расчет времени воздействия ультрафиолетового излучения на образцы. Он должен основываться на данных, полученных при периодической аттестации УФ-камеры, которые фиксируются в аттестате или протоколе аттестации. В процессе аттестации также необходимо определить энергетическую освещенность ( $Вт/м^2$ ) в диапазоне длин волн 320-400 нм.

С учетом анизотропии свойств материала, для повышения точности оценки рекомендуется проводить испытания по потере прочности как в продольном, так и в поперечном направлениях. Устойчивость к ультрафиолетовому излучению следует определять по минимальному значению, полученному в любом из направлений.

На основании вышеописанных рекомендаций был разработан национальный стандарт [123].

#### 4.2.3 Разработка методики определения устойчивости геосинтетических материалов к температурным переходам через ноль (морозостойкость)

В процессе эксплуатации геосинтетические материалы могут контактировать с водой и накапливать влагу. В регионах России, где наблюдаются частые переходы температуры через нулевую отметку, содержащаяся влага может замерзать, что приводит к повреждению материала. В связи с этим был введен термин «морозостойкость», характеризующий способность геосинтетических материалов противостоять данному воздействию. Впервые этот термин был использован на территории России применительно к геосинтетическим материалам, используемым в строительстве, и впоследствии был утверждён в качестве методики в национальном стандарте [124].

Морозостойкость геосинтетических материалов определяется их способностью выдерживать многократные циклы замораживания и оттаивания без разрушения. Ключевым показателем морозостойкости может выступать потеря прочности материала. В условиях российского климата, с частыми температурными колебаниями через ноль градусов Цельсия в осенне-зимний период, накопившаяся влага внутри геосинтетики может вызвать её разрушение.

Испытание морозостойкости геосинтетических материалов осуществляется путём сравнения результатов тестов на растяжение исходных образцов с результатами образцов, подвергшихся многократным циклам замораживания и оттаивания. Прочностные характеристики на растяжение определяются методом испытания широкой полосы геосинтетики согласно [121], что снижает влияние поперечного сужения на результаты испытаний.

Разработка методики оценки морозостойкости, зафиксированной в [118], предполагает замораживание образцов в течение 12 часов с общим циклом испытаний, равным 24 часам. Поскольку стандартный рабочий день длится 8 часов, проведение данных испытаний без автоматизированной климатической камеры вызывает определённые сложности. Важным параметром испытаний является не только длительность воздействия и температура выдержки, но и процесс перехода воды через точку замерзания, что критично для правильного проведения испытаний. Установленные температуры лишь обеспечивают быстрое замораживание и оттаивание среды, окружающей образцы.

Также, при испытаниях на морозостойкость по [118] были выявлены следующие важные моменты, которые необходимо учитывать при разработке национального стандарта:

- для минимизации испарения воды рекомендуется использовать закрытые ёмкости при испытаниях;
- образцы одного типа материала необходимо тестировать в одном контейнере, поскольку вымывающиеся вещества могут взаимодействовать с геосинтетикой, что недопустимо при совместном испытании с другими материалами;
- образцы должны быть полностью погружены в воду, и для их удержания под поверхностью следует использовать грузы.

Рекомендуется оценивать потерю прочности как в продольном, так и в поперечном направлениях, что позволит определить минимальное значение морозостойкости в обоих случаях, являющееся итоговым показателем.

#### 4.2.4 Разработка методики определения гибкости геосинтетических материалов при отрицательных температурах

Как исследования показывают, согласно зарубежным нормам, у геосинтетических материалов нет установленных требований к определению их гибкости при низких температурах, несмотря на наличие нормы [125], которая устанавливает процедуру тестирования в этом контексте.

Гибкость при низких температурах важна для моделирования процесса развертывания материала на стройплощадке при отрицательных температурах. В таких условиях геосинтетический материал может быть подвержен механическим повреждениям из-за его хрупкости, что может снизить его свойства. Дополнительно, в Российской Федерации существовал [126], применимый к пластмассам, для которых данная характеристика была существенной.

С учетом вышеперечисленного, было принято решение внести нормативные требования по гибкости при низких температурах для всех геосинтетических материалов, используемых в дорожном строительстве с целью армирования.

Для адаптации этой методики к широкому спектру материалов, включая георешетки, были внесены следующие изменения:

- установлен радиус грани испытательного бруска, по которой производится изгиб образца,
- определены критерии оценки результатов тестирования. Образец считается успешно прошедшим испытания, если в процессе изгибания не было замечено характерных звуков лома или разрушения волокон, и не возникло дефектов после тестирования (такие как трещины,

расслаивание, выцветание материала, цветовые отличия), которые могли бы быть видны без дополнительных оптических средств,

- определены температурные условия для оценки гибкости геосинтетического материала (минус 10°C, минус 20°C, минус 30°C и минус 40°C).

Эти испытания проводятся как в продольном, так и в поперечном направлениях. Материал считается успешно пройденным на конкретной температуре, если образцы в обоих направлениях изгибаются без дефектов.

В данной методике не проводится оценка потери прочности материала, так как это приводит к значительному увеличению стоимости испытания, а опытные данные показывают, что отрицательные результаты достигаются только в редких случаях, когда образец имеет локальный дефект или материал явно низкого качества.

Эта методика была разработана как национальный стандарт [127].

#### 4.2.5 Разработка методики определения устойчивости геосинтетических материалов к повышенным температурам

Для регулирования рынка и защиты интересов потребителей от использования геосинтетических материалов, которые могут утратить свои свойства под воздействием высоких температур в процессе укладки асфальтобетонных покрытий, возникла необходимость в создании соответствующей методики испытаний. Оценка теплостойкости материала заключается в определении его способности сохранять прочностные характеристики после воздействия температур, приближенных к температурному режиму укладки асфальтобетонных смесей.

Для измерения теплостойкости геосинтетических материалов используется метод сравнения результатов испытания на разрыв образцов исходного материала с результатами испытаний образцов, подвергшихся нагреву до 160°C (далее - нагрев). Нагрев выполняется на воздухе, поскольку в любой другой контролируемой среде, в том числе в составе асфальтобетонной смеси, существует вероятность механического повреждения материала. Когда рассматриваются одновременно несколько факторов (температура, механическое воздействие), их декомпозиция на отдельные составляющие затруднительна, что делает однозначную идентификацию воздействия на материал сложной задачей. Кроме того, нагрев материала в асфальтобетонной смеси, несмотря на моделирование реальных условий, существенно усложняет процедуру испытания и увеличивает их стоимость. Однако для полноценного прогрева материала в печи до температуры 160°C требуется выдерживать его в течение 2 часов.

Измерение прочности при разрыве проводится путем растяжения широкой полосы геосинтетического материала в соответствии с [121].



Эта методика направлена на моделирование воздействия температуры на геосинтетический материал в процессе укладки асфальтобетонной смеси. Основная задача заключается в исключении использования материалов, которые значительно утрачивают свои прочностные характеристики и удлинение при укладке, фактически перестают выполнять роль армирующего элемента в асфальтобетонных дорожных покрытиях. Кроме того, методика позволяет определить «рабочие» характеристики прочности уложенного материала.

Эта методика разработана в формате национального стандарта [128].

#### 4.2.6 Усовершенствование методики определения стойкости к циклическим нагрузкам

Стандарт разработан Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)» [129] на основе международного стандарта [130].

Суть данного метода заключается в воздействии истирающей нагрузки на геосинтетический материал, используя гранулированный состав. Исследуемый образец геосинтетического материала размещается между двумя слоями синтетической гранулированной породы и подвергается динамической нагрузке в течение установленного времени. После этого образец извлекается из испытательной установки, визуально оцениваются видимые повреждения, и образец подвергается механическому или гидравлическому воздействию для определения изменений его механических или гидравлических свойств. Результатом является процентное изменение рассматриваемого свойства, а также фиксация видимых повреждений.

В международном стандарте в качестве гранулированного состава используется спекшаяся окись алюминия. Однако, с учетом определенных трудностей при получении этого материала и его высокой стоимости, а также для приближения условий моделирования, было принято предложение от автора данной работы о замене спекшегося оксида алюминия на гранитный щебень согласно ГОСТ 8267 марки дробимости 1000, марки истираемости И1, с размером зерен от 5 до 10 мм и содержанием зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы до 15% по массе.

Эта замена была принята с учетом более легкой доступности гранитного щебня и более экономически эффективных условий для проведения испытаний.

#### 4.2.7 Усовершенствование методики определения прочности при статическом продавливании (CBR-тест)

Испытание на продавливание имитирует процесс проникновения грунта в материал при его эксплуатации, в результате чего материал подвергается сложным напряжениям. Эта методика

оценивает прочность при продавливании и является актуальной для геосинтетических материалов, которые используются для функции разделения и применимы только к сплошным материалам. Теоретически, этот метод можно было бы применить и к материалам, которые выполняют функцию армирования слоев из зернистых материалов. Однако из-за их высокой прочности данный вид испытания не является эффективным.

Суть данной методики заключается в нагружении цилиндрическим штампом с плоским основанием образца геосинтетического материала, который закреплен в кольцевом зажиме без предварительного натяжения. В результате проведения испытания измеряется максимальное усилие, достигнутое до разрушения образца.

Эта методика была разработана на основе международного стандарта [131]. Принцип испытания заключается в том, что образец материала закрепляется с использованием кольцевых зажимов и продавливается плунжером с плоским наконечником по центру с постоянной скоростью. В ходе испытания фиксируется зависимость создаваемого испытательной машиной напряжения от перемещения подвижной траверсы, на которой закреплен плунжер.

В дорожном хозяйстве существуют рекомендации и методики определения прочности при продавливании для геосинтетических материалов, одна из которых разработана с учетом стандарта [131].

В таблице 4.1 представлен сопоставительный анализ данных из указанных документов.

Во всех трех методиках применяются разные наименования. На английском языке метод известен как «Static puncture test», что дословно переводится как «метод статического прокалывания» или «метод статического пробоя». Согласно Толковому словарю Ожегова [132], «прокол» означает сквозное отверстие, созданное острым предметом. Таким образом, геометрия плунжера (штампа) предполагает, что он имеет тупой конец. Кроме того, слово «статический» в названии метода не совсем соответствует слову «прокол» с точки зрения смысла. Поэтому решено было заменить термин «прокол» на «продавливание», как это сделано в [118].

Для проведения испытаний были выбраны следующие материалы:

- геотекстиль, нетканый, изготовленный из полипропилена и полиэтилена (PP+PS, материал 1),
- геотекстиль, нетканый, изготовленный из полипропилена (PP) с поверхностной плотностью 300 г/м<sup>2</sup> (материал 2),
- геотекстиль, нетканый, изготовленный из полипропилена (PP) с поверхностной плотностью 350 г/м<sup>2</sup> (материал 3),
- геотекстиль, тканый, изготовленный из полиэтилена (PS, материал 4),
- геотекстиль, тканый, изготовленный из полипропилена (PP, материал 5),
- мягкий контейнер, изготовленный из полиамида (материал 6).

Таблица 4.1 – Сопоставительный анализ методик по статическому продавливанию

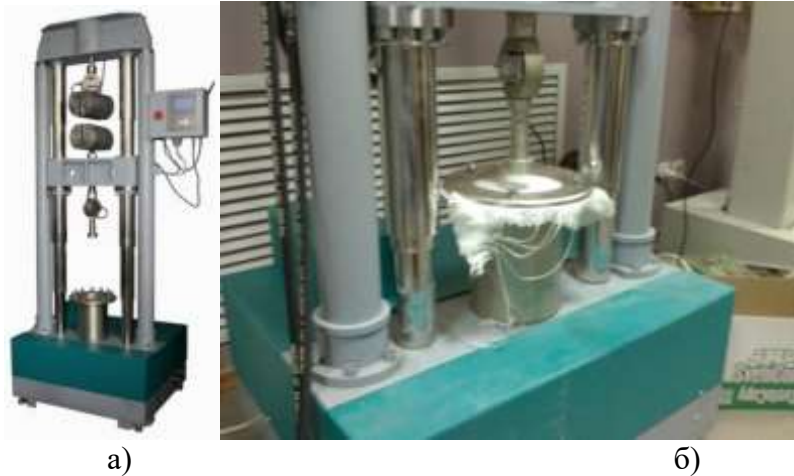
Название	ISO 12236 [131]	ОДМ 218.5.003-2010 [50]	ОДМ 218.5.006-2010 [118]
	Геотекстиль и связанные с ними изделия. Статическое испытание на прокол	Определение механических характеристик ГМ	Методика определения механических свойств геосинтетических материалов при продавливании
Ограничения по материалам	Не нормированы	Не нормированы	Размер ячейки не более 10 мм
Размер плунжера (штампа), мм	50,0±0,5	50,0±0,5	50,0±0,5
Радиус кромки плунжера, мм	2,5±0,2	2,5±0,2	2,5±0,2
Материал плунжера (штампа)	Нержавеющая сталь	Не нормирован	Сталь
Внутренний диаметр кольцевого зажима, мм	150,0±0,5	150,0±0,5	150,0±0,5
Дополнительные требования к кольцевому зажиму	Профиль поверхности, отступ от края зажима, минимальная ширина зажима	Профиль поверхности	Допускается использовать прокладки из резины, наждачной бумаги и других материалов
Погрешность измерения напряжения (силы продавливания)	1 или 0 класс точности	Не нормировано	±1,0% ГОСТ 28840 [119]
Погрешность измерения перемещения	1 или 0 класс точности	Не нормировано	±1,0% ГОСТ 28840 [119]
Скорость продавливания, мм/мин	50±5	50	50±5
Отбор проб	определено	Не определено	определено
Количество испытываемых образцов, не менее	5	5	5
Изготовление образцов	Не определено	Не определено	определено
Условия проведения испытаний: температура, °С; влажность, %	(20 ± 2); (65 ± 5)	Не нормировано	Не нормировано
Предварительное кондиционирование образцов	Потеря массы менее 0,25% за более чем 2 ч	Не нормировано	Выдержаны в условиях проведения испытания 24 ч
Проведение испытания	Перемещение считается после достижения нагрузки 20Н	С момента возрастания нагрузки	Предварительное нагружение образца до 20Н
Окончание испытания	Разрыв образца	Разрыв образца	Разрыв образца
Результат испытания: Средняя сила прокалывания, кН Коэффициент вариации, % СКО Перемещение	3 значащих цифры + - с точностью ±1 мм	+ - - -	3 значащих цифры + + с точностью ±1 мм
Построение кривой сила-перемещение	Рекомендуется	Обязательно	Рекомендуется

Испытания проводились на испытательной машине, учитывая все важные аспекты, отмеченные выше. Испытательная машина представлена на рисунке 4.7. Технические и метрологические характеристики данной испытательной машины включают в себя:

- верхний предел измерения нагрузки на образец (в зависимости от установленного датчика):

- 1) при растяжении: 1,0 т, 3,0 т и 10,0 т;
- 2) при сжатии: 0,5 т;

- точность измерения усилия не превышает 1%,
- скорость перемещения траверсы в мм/мин: от 5 до 100.
- обеспечение параметров испытания в соответствии с [118].



а) общий вид испытательной машины, б) оснастка для испытания на статическое продавливание

Рисунок 4.7 – Установка для испытания на продавливание

С каждым из указанных материалов было проведено более чем 20 измерений в соответствии с ранее определенной методикой. В силу того, что в некоторых случаях наблюдалось разрушение материала возле кольцевого зажима, разрушение материала зажимом или выскальзывание материала из него, то такие результаты отбрасывались как не надежные.

Результаты измерения прочности при статическом продавливании ( $F$ , Н) и перемещения плунжера до разрушения образца ( $l$ , мм) указанных выше материалов представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты измерений на статическое продавливание

Материал 1		Материал 2		Материал 3		Материал 4		Материал 5		Материал 6	
F	l	F	l	F	l	F	l	F	l	F	l
467	95	24,6	56	31,3	68	784	78	770	58	784	47
468	88	22,7	55	31	62	784	63	779	62	733	51
475	94	26,6	58	34,1	64	776	65	760	56	765	50
465	90	23,4	56	32,6	65	786	69	751	56	748	49
469	92	22,7	57	31,2	70	780	69	769	57	771	51
448	88	24,6	56	31,2	64	771	64	775	58	777	49
456	92	24,2	55	33,3	62	792	75	765	59	784	49
450	89	26,5	56	34,3	65	785	78	763	58	752	50
468	90	20,4	56	31,1	64	777	65	772	60	745	48
457	91	24,5	56	35,8	70	786	76	772	59	753	49
480	95	24,5	57	34,7	68	790	72	763	62	777	47
483	94	23,7	57	31,3	63	786	68	765	60	767	48
480	93	27,6	59	34,1	66	786	76	760	59	770	50
464	92	24,4	56	31,8	67	772	73	776	60	753	48
479	94	21,6	57	35,6	70	773	75	777	57	763	51
470	95	25,6	57	34,1	69	790	77	770	59	777	51
476	93	24,7	56	35,8	68	783	78	779	59	774	49
481	95	28,6	59	34,9	66	790	77	781	62	752	48
470	95	23,4	56	33,9	66	789	76	763	61	784	50
479	94	22,9	57	35,4	70	789	77	779	57	773	51

Статистическая обработка результатов испытаний представлена в таблицах 4.3 и 4.4.

Таблица 4.3 – Результаты испытаний материалов на статическое продавливание (усилие)

	Материал 1	Материал 2	Материал 3	Материал 4	Материал 5	Материал 6
Сырье	PP+PS	PP	PP	PS	PP	Полиамид
Среднее значение, Н	469,05	24,36	33,37	783,29	769,24	765,18
СКО	1,00	0,19	0,17	0,62	0,78	1,44
Коэф. вариации, %	2,13	7,8	5,09	0,79	1,01	1,87
Размах, Н	34,67	8,20	4,80	20,33	29,82	51,50
Макс. значение, Н	482,67	28,57	35,83	791,56	781,05	784,23
Мин. значение, Н	448,00	20,37	31,03	771,23	751,23	732,73

Таблица 4.4 - Результаты испытаний материалов на статическое продавливание (деформация)

	Материал 1	Материал 2	Материал 3	Материал 4	Материал 5	Материал 6
Сырье	PP+PS	PP	PP	PS	PP	Полиамид
Среднее значение, мм	92	57	66	73	59	49
СКО	2,31	1,06	2,63	5,13	1,84	1,31
Коэф. вариации, %	2,51	1,86	3,98	7,03	3,12	2,67
Размах, мм	7	4	8	15	6	4
Макс. значение, мм	95	59	70	78	62	51
Мин. значение, мм	88	55	62	63	56	47

Согласно данным [133], коэффициент вариации отражает степень отклонения измеренных величин относительно их среднеарифметического значения. При увеличении значения данного коэффициента можно говорить о более значительном разбросе и меньшей однородности анализируемых данных. В случае, когда коэффициент вариации составляет менее 10%, принято считать изменчивость показателей несущественной. Если этот диапазон находится между 10% и 20%, то изменчивость оценивается как средняя, от 20% до 33% — значительная. При превышении коэффициентом значения в 33% можно сделать вывод о неоднородности данных и необходимости исключения крайних значений.

На рисунках 4.8 – 4.10 показаны типичные кривые зависимости прочности при продавливании от перемещения плунжера при успешном проведении испытаний и при не успешном (повреждение материала в зажиме, выскользывание из зажима).

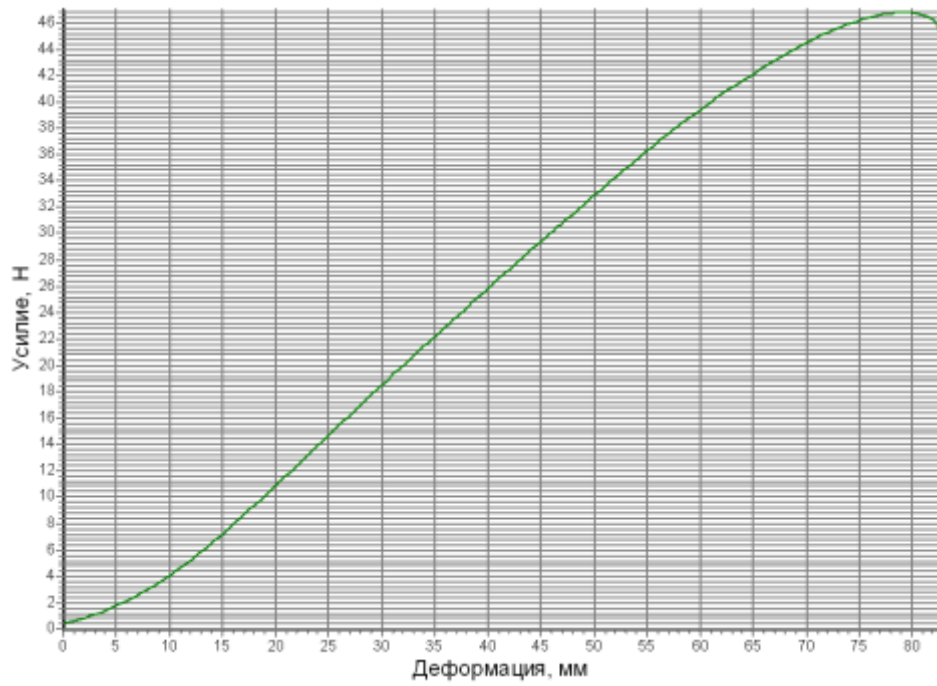


Рисунок 4.8 - Типичная кривая зависимости прочности при прокалывании от перемещения плунжера (деформация) при удачном проведении испытания

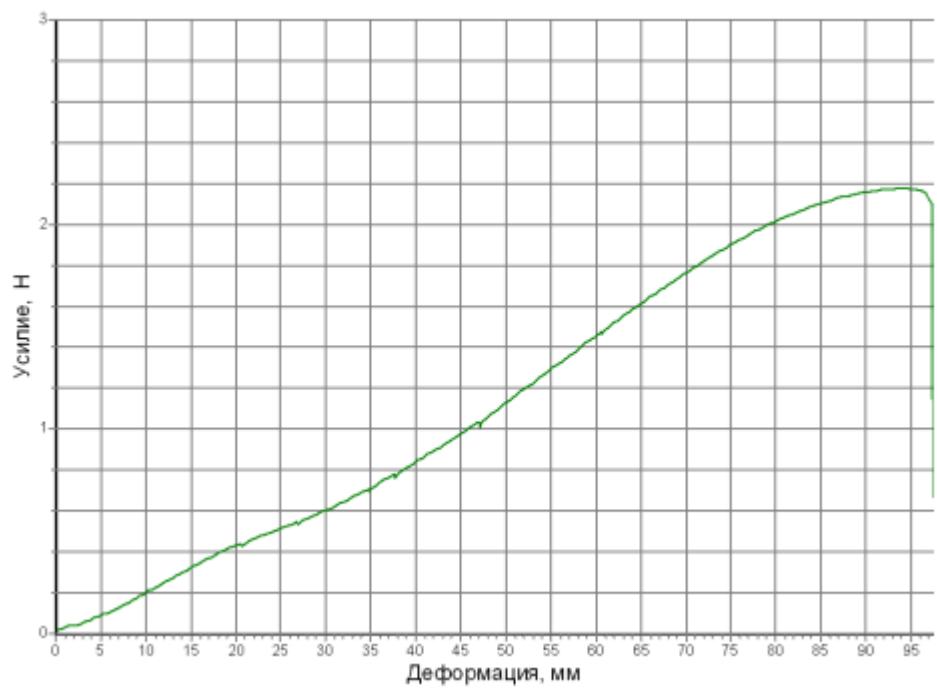


Рисунок 4.9 - Типичная кривая зависимости прочности при прокалывании от перемещения плунжера (деформация) при не удачном проведении испытания

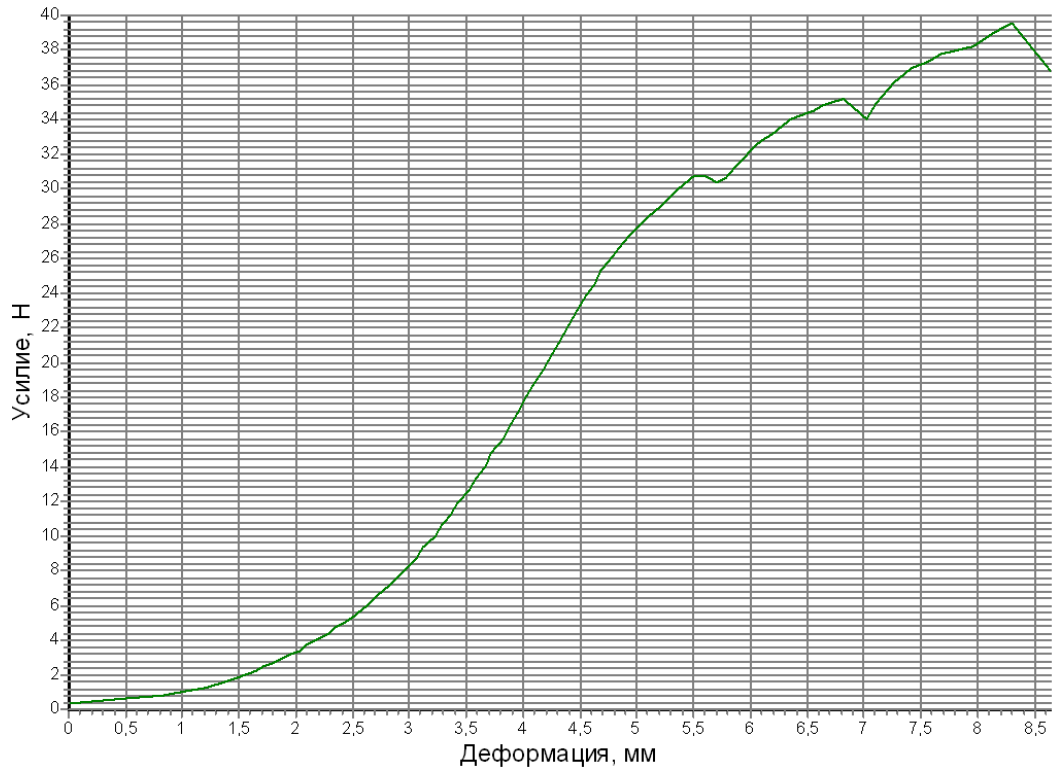


Рисунок 4.10 - Типичная кривая зависимости прочности при прокалывании от перемещения плунжера (деформация) при не удачном проведении испытания

На рисунке 4.9 видны незначительные «провалы» по прочности, причиной образования которых является повреждение материала возле зажима, а на рисунке 4.10 «провалы» как по прочности с приростом перемещения говорят о том, что материал выскользывает из зажимов.

Для устранения данных дефектов при испытании помогает использование различных прокладок между испытуемым геосинтетическим материалом и губками кольцевого зажима. В качестве прокладок, как показал опыт проведения данных испытаний, можно использовать картон или резину, вырезанные по форме кольцевого зажима, также может обеспечить целостность материала в зажиме оклейка площади крепления материала бумажным скотчем, но данная процедура трудоемка и значительно увеличивает время подготовки образцов для испытания.

Также в рамках проведения испытаний было выявлено, что качество вырубки отверстий в материале под болты крепления кольцевого зажима также влияет на повреждаемость материала в зажиме во время проведения испытаний. Рваные края отверстия являются инициаторами дальнейшего повреждения материала и его самым слабым местом в силу меньшей площади удержания материала в зажиме.

В соответствии с [134], полученные результаты измерений действительных значений (с учетом предположения нормального распределения) с доверительной вероятностью 0,95 можно записать в виде таблицы 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты испытаний геосинтетических материалов на продавливание

Материал	Сырье	Прочность при продавливании, Н	Перемещение плунжера до разрыва, мм
Материал 1	PP+PS	469,05±20,00	92±5
Материал 2	PP	24,36±0,38	57±2
Материал 3	PP	33,37±3,40	66±5
Материал 4	PS	783,29±12,4	73±10
Материал 5	PP	769,24±15,6	59±4
Материал 6	Полиамид	765,18±28,8	49±3

Относительные погрешности результатов измерений приведены в таблице 4.6

Таблица 4.6 – Относительные погрешности результатов испытаний геосинтетических материалов на продавливание

Материал	Сырье	Относительная погрешность измерения прочности при продавливании, %	Относительная погрешность измерения перемещения плунжера до разрыва, %
Материал 1	PP+PS	±4,2	±5,0
Материал 2	PP	±15,6	±3,7
Материал 3	PP	±10,2	±8,0
Материал 4	PS	±1,6	±14,0
Материал 5	PP	±2,0	±6,2
Материал 6	Полиамид	±3,8	±5,4

Из таблицы 4.6 видно, что относительная погрешность измерения прочности при продавливании по данному методу от 2% до 16%, а относительная погрешность измерения перемещения плунжера до разрыва от 4% до 14%. Такой разброс показателей относительной погрешности, скорее всего, является результатом нестабильности свойств материалов, принявших участие в тесте, а также влияние указанных выше аспектов, влияющих на результат испытания (выскальзывание и концентратор напряжений в местах крепления болтов).

#### 4.2.8 Анализ методики определения прочности при динамическом продавливании (испытание падающим конусом)

Методика испытания была разработана в 2015 году и представлена в виде национального стандарта Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)». При её создании учитывались основные нормативные положения международного стандарта ИСО 13433:2006, именуемого «Геосинтетические материалы. Испытания перфорации при динамической нагрузке (испытание падающим конусом)» [135].

Этот метод измерений основывается на оценке способности конуса с заранее заданными геометрическими характеристиками и массой проникать сквозь образец геосинтетического материала, на который он свободно падает с заданной высоты, представлено на рисунке 4.11. Оценка осуществляется на основе измерения размеров образовавшегося отверстия. Для этого второй конус, имеющий определённые геометрические размеры и массу, погружается в отверстие, и считается количество видимых отметок на шкале, представлено на рисунке 4.12.



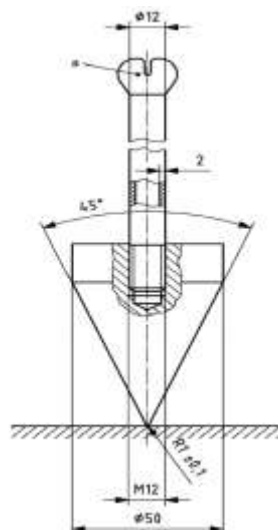


Рисунок 4.11 – Схема конуса, свободно падающего на образец

Это испытание позволяет моделировать устойчивость сплошных материалов к воздействию, аналогичному тому, что происходит при засыпке материала инертными (сыпучими) материалами, выгружаемыми с самосвала.

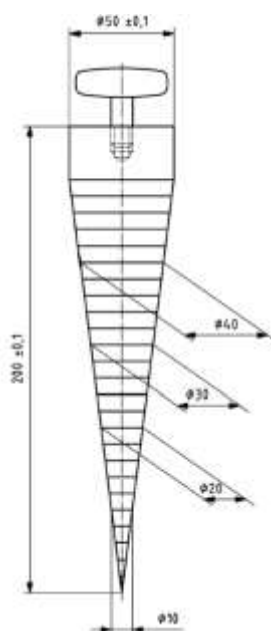


Рисунок 4.12 – Схема конуса для определения размера пробитого отверстия

Очевидно, что данное воздействие актуально только для относительно слабых материалов, которые в основном применяются для функции разделения. Материалы, которые используются для армирования слоев из дискретных материалов, конусом не пробиваются.

#### 4.2.9 Усовершенствование методики определения прочности швов геосотовых материалов

Геосотовый материал представляет собой структуру, состоящую из наложенных друг на друга полимерных полос, которые соединены между собой швами, обычно при помощи

ультразвука. При разворачивании этот материал растягивается подобно аккордеону и начинает напоминать пчелиные соты.

Понятно, что прочность материала в направлении полос обеспечивается самими полосами, в то время как в перпендикулярном направлении прочность зависит от качества швов, которые соединяют полосы между собой. В связи с этим необходима методика для оценки прочности этих швов.

Эта методика учитывает основные аспекты, представленные в [136] и включает в себя две части. Первая часть направлена на определение прочности шва при разрыве, представлено на рисунке 4.13 а), в то время как вторая часть направлена на определение прочности шва при сдвиге, представлено на рисунке 4.13 б). Условия испытаний предполагают определенные подготовительные этапы, обеспечивающие нужные параметры испытаний.

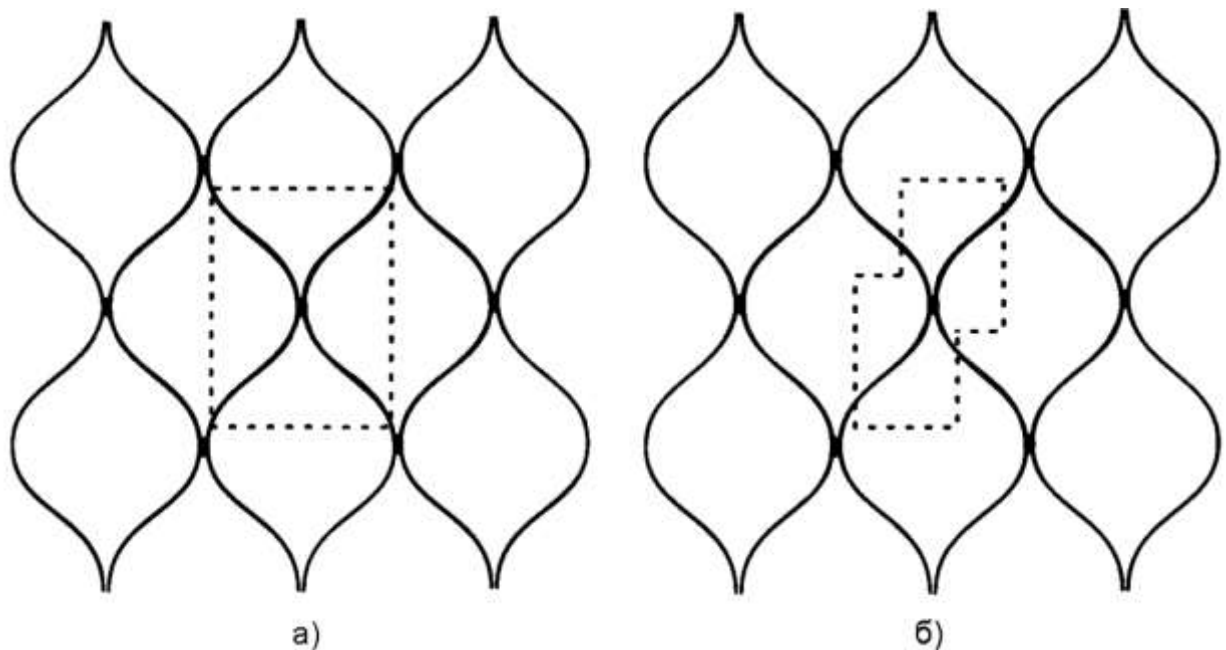


Рисунок 4.13 – Схема вырезания проб из геосотового материала

Затем длинные хвосты зажимаются в разрывной машине попарно, при проведении испытания на разрыв, от одной полосы. В случае испытания на сдвиг, короткие хвосты остаются свободными.

Испытания проводятся в соответствии с методикой для определения прочности при растяжении.

Исходя из результатов испытаний, определяется наименьший показатель прочности шва, независимо от того, проводилось испытание на разрыв или сдвиг. Затем этот показатель пересчитывается в процентное соотношение относительно прочности полосы материала.

Эта методика была разработана как приложение Б к национальному стандарту [69].

#### 4.2.10 Усовершенствование методики определения прорастания

Методика оценки прорастания травы через геосинтетический материал предназначена для имитации условий, при которых материал используется на откосах, способствуя формированию травяного покрова и развитию корневой системы. Этот процесс играет ключевую роль в предотвращении эрозии на откосах.

Суть метода заключается в сравнительной оценке травяного покрова, который развивается в одинаковых условиях с использованием двух групп образцов: первая группа включает геосинтетический материал, а вторая - не включает. Эта методика была разработана на основе основных принципов [137], и впоследствии внесен ряд уточнений для обеспечения надежности и воспроизводимости результатов.

В частности, было установлено количество семян многолетних трав, которые следует высевать в контейнеры определенного размера. Перед посевом семена проходят проверку на всхожесть. Процесс проращивания продолжается в течение 21 дня, и для обеспечения однородных условий используются ультрафиолетовые камеры для оценки стойкости геосинтетических материалов к ультрафиолетовому излучению.

По завершении испытаний, выращенную траву срезают с поверхности грунта и сушат для исключения влияния влаги. Затем сравнивают массу травы из контейнеров с геосинтетическими материалами и контейнеров без них и делают вывод о пригодности материала. Коэффициент прорастания определяется как отношение средней массы высушенной травы из контейнеров с геосинтетическими материалами к средней массе высушенной травы из контейнеров без них.

Эта методика изначально была создана как приложение к [138], и затем, с незначительными уточнениями, была переработана в национальный стандарт [72].

#### 4.2.11 Усовершенствование методики определения вымываемости

Методика определения вымываемости моделирует одну из ключевых функций, выполняемых геосинтетическим материалом, используемым для предотвращения эрозии на откосах, а именно, предотвращение вымывания грунта дождевыми осадками с поверхности откоса.

Стандарт [139] предоставляет инструкции для оценки способности геосинтетических материалов защищать грунт от вымывания под воздействием дождя в лабораторных условиях. Важным аспектом этой защиты является способность геосинтетического материала амортизировать удары дождевых капель, а также разделять их, что снижает потерю частиц грунта. В ходе испытаний используются контейнеры с грунтом, покрытым геосинтетическим

материалом, и контейнеры с незащищенным грунтом, которые подвергаются воздействию моделированных атмосферных осадков и стока воды в течение 30 минут.

Экспериментальная установка включает в себя наклонную поверхность, защищенную дождевой завесой. Дождь имитируется при помощи лабораторного капельного симулятора, создающего капли средним диаметром от 3,0 до 3,5 мм, которые падают с высоты 2 метра, чтобы моделировать осадки  $(51 \pm 5)$ ,  $(102 \pm 5)$  и  $(153 \pm 6)$  мм/час. После испытаний собирают и взвешивают количество вымытых грунтовых частиц. На основе этих данных определяется скорость потери грунта или рассчитывается индекс сравнения потери грунта с защищенной поверхности геосинтетическим материалом по отношению к контрольной незащищенной поверхности, учитывая тип грунта и конкретные условия проекта (наклон и интенсивность осадков).

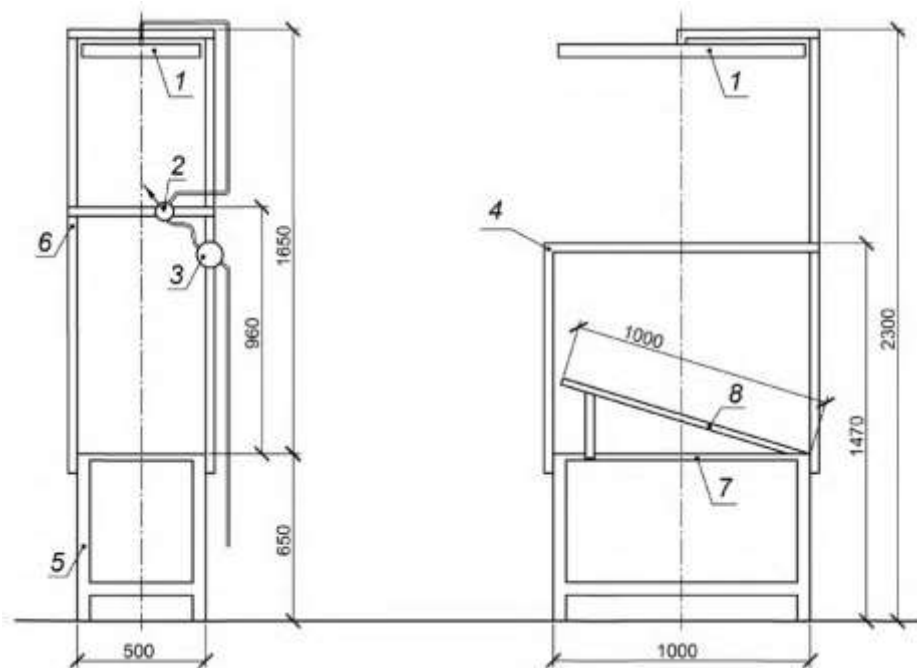
Индекс вымываемости рассчитывается по формуле (4.1):

$$BSCI = \frac{M_{RECP}}{M_{CONTROL}} \quad (4.1)$$

где  $M_{RECP}$  – средняя масса потерянных частиц грунта с защищенной ПЭМ поверхности;

$M_{CONTROL}$  – средняя масса потерянных частиц грунта с незащищенной поверхности.

Этот метод был использован для разработки дождевальной установки в соответствии с подобными принципами, представлено на рисунке 4.14.



- 1 - водораспылитель, 2 – датчик давления (манометр), 3 – счетчик воды (расходомер), 4 – боковой экран, 5 – опорная рама, 6 - боковая рама, 7 – система регулировки угла, 8 – испытательный контейнер

Рисунок 4.14 – Схема установки для определения коэффициента потери грунта

У данной установки были нормированы ее технические характеристики:

- водораспылитель должен обеспечивать равномерное распыление капель диаметром от 1 до 6 мм и имитировать интенсивность дождя на уровне 100 мм/час,
- датчик давления должен соответствовать требованиям, определенным в [140],
- счетчик воды должен соответствовать [141],
- система регулировки угла должна обеспечивать установку угла с точностью не менее 1 градуса.

Размеры контейнера были установлены следующие: 1000x500x250 мм.

Суть испытания заключается в сравнении массы вымытого грунта из контейнера, имеющего геосинтетический материал, и контейнера, не имеющего такого материала. Для обеспечения надежных результатов испытаний были установлены строгие требования к грунту и его влажности, а также к семенам и их всхожести. Для сравнения массы вымытого грунта также были установлены требования к времени и температуре сушки грунта.

Результаты получаются на основе испытаний с тремя контейнерами, содержащими геосинтетический материал, и тремя контейнерами без такого материала.

Эта методика была разработана как приложение А к [138] и впоследствии, с незначительными корректировками, была преобразована в национальный стандарт [72].

#### 4.2.12 Разработка методики определения коэффициента фильтрации

Анализ нормативной документации [142 - 151] и различных научно-исследовательских работ в области геосинтетики [152, 153] показал, что водопроницаемость зависит от пористости материала, которая, в свою очередь, определяется числом и площадью пор. Также на водопроницаемость геосинтетических материалов влияет нагрузка, которая в несколько раз уменьшает коэффициент фильтрации.

Следует отметить, что большинство нормативных документов [142], [143], [144], [145] определяют не коэффициент фильтрации геосинтетических материалов, а скорость фильтрации и расход воды на единицу длины материала.

Для более точного понимания воздействия фильтрационного потока на геосинтетический материал приведем водопроницаемость на единицу длины материала к коэффициенту фильтрации.

Водопроницаемость на единицу длины (толщины) геосинтетического материала  $q$ , в л/(м·с), определяют по формуле

$$q = \frac{Q}{L}, \quad (4.2)$$

где  $Q$  – расход воды, проникающий через материал,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,

$L$  – единица длины (толщины) материала (путь фильтрации), м.

Расход воды определяют по формуле:

$$Q = F \cdot v, \quad (4.3)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения материала,  $\text{м}^2$ ,

$v$  – средняя скорость движения воды через материал,  $\text{м}/\text{с}$ .

Отсюда получают зависимость, выраженную в  $\text{м}^2/\text{с}$ :

$$q = \frac{F \cdot v}{L}, \quad (4.4)$$

На основании закона Дарси для скорости движения воды через материал  $v$ , в  $\text{м}/\text{с}$ , записывают выражение:

$$v = k \cdot I, \quad (4.5)$$

где  $k$  – коэффициент фильтрации материала,  $\text{м}/\text{с}$ ,

$I = \frac{H}{L}$  – градиент напора,

$H$  – напор, м.

Путем проведения математических преобразований получают:

$$q = \frac{F \cdot k \cdot I}{L}, \quad (4.6)$$

$$k = \frac{q \cdot L}{F \cdot I} = \frac{Q \cdot L}{L \cdot F \cdot I} = \frac{Q}{F \cdot I}, \quad (4.7)$$

Так же расход можно выразить в виде следующей зависимости:

$$Q = \frac{V}{t_m}, \quad (4.8)$$

где  $V$  – объем профильтровавшейся воды через материал,  $\text{м}^3$ .

$t_m$  – время движения воды объемом  $V$  через материал, с.

Отсюда  $k$ , м/сут:

$$k = \frac{V}{t_m \cdot F \cdot I} = \frac{864 \cdot V}{t_m \cdot F \cdot I'} \quad (4.9)$$

Таким образом, определяют зависимость коэффициента фильтрации геосинтетического материала от параметров, которые можно легко измерить в ходе эксперимента. Зависимость коэффициента фильтрации грунта аналогична с зависимостью (4.9), если ввести температурную поправку для приведения значения коэффициента фильтрации к условиям фильтрации воды при температуре 10 °С. В нормативной литературе поправочный температурный коэффициент приводит значение коэффициента фильтрации геосинтетических материалов к температуре 20 °С, однако это не имеет очевидного практического смысла. Коэффициент фильтрации грунта приводится к 10 °С. Проведя аналогии, приходим к выводу, что коэффициент фильтрации геосинтетического материала необходимо приводить к той же температуре. Это позволит оценить совместную работу грунта и геосинтетического материала.

$$k = \frac{864 \cdot V}{t_m \cdot F \cdot I' \cdot T}, \quad (4.10)$$

где  $T = (0,7 + 0,03T_\phi)$  – поправка для приведения значения коэффициента фильтрации к условиям фильтрации воды при температуре 10°С.

$T_\phi$  – фактическая температура воды при испытании, °С,

Среднее значение коэффициента фильтрации геосинтетического материала и грунта основания будет определяться по формуле:

$$k_{\text{ср}} = \frac{k_r \cdot h_r + k_t \cdot \delta}{h_r + \delta}, \quad (4.11)$$

где  $k_t$  – коэффициент фильтрации геосинтетического материала, м/сут,

$h_r$  - толщина слоя грунта, м,

$\delta$  – толщина геосинтетического материала, м.

Воспользовавшись ранее найденной зависимостью коэффициента фильтрации геосинтетического материала (4.9) и зависимостью коэффициента фильтрации грунта (формула (4.10) [154]), запишем выражение (4.11) в новой форме:

$$k_{\text{ср}} = \frac{\frac{864 \cdot V \cdot h_{\Gamma}}{t_m \cdot F \cdot l \cdot T} + \frac{864 \cdot V \cdot \delta}{t_m \cdot F \cdot l \cdot T}}{h_{\Gamma} + \delta} = \frac{864 \cdot V}{t_m \cdot F \cdot l \cdot T}, \quad (4.12)$$

Отсюда приходим к выводу, что для определения коэффициента фильтрации системы из нескольких материалов, не имеют значения толщины и коэффициенты фильтрации отдельных элементов этой системы. На выходе будет усредненный коэффициент фильтрации всей системы в целом. В дальнейшем этот усредненный коэффициент фильтрации необходимо сравнить с коэффициентом фильтрации грунта, определенного заранее по методике, нормированной в [154]. Возможны следующие варианты:

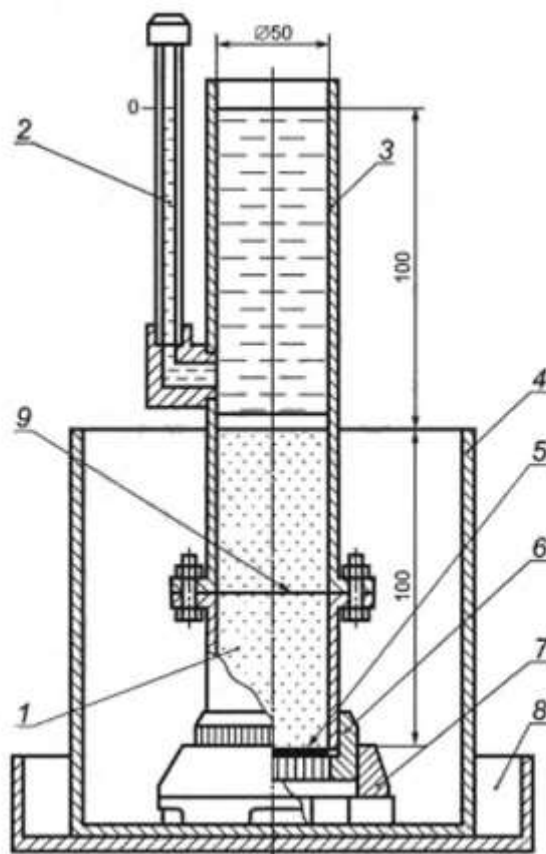
- среднее значение коэффициента фильтрации системы «грунт-геосинтетический материал- грунт» меньше значения коэффициента фильтрации грунта  $k_{\text{ср}} < k_{\Gamma}$ , тогда можно прийти к выводу, что прослойка геосинтетического материала создает гидравлическое сопротивление и коэффициент фильтрации этой прослойки меньше коэффициента фильтрации грунта,

- среднее значение коэффициента фильтрации системы «грунт-геосинтетический материал-грунт» больше или равно значению коэффициента фильтрации грунта  $k_{\text{ср}} \geq k_{\Gamma}$ , тогда можно прийти к выводу, что прослойка геосинтетического материала не создает гидравлическое сопротивление и коэффициент фильтрации этой прослойки либо больше, либо равен коэффициенту фильтрации грунта.

Основываясь на данных выводах, было принято решение о доработке методики определения коэффициента фильтрации грунта [154] с целью ее адаптации к испытаниям системы «грунт-геосинтетический материал – грунт».

Для этого был доработан прибор для определения коэффициента фильтрации песка КФ-1 путем встраивания специального патрона для крепления образца геосинтетического материала таким образом, чтобы не повлиять на его технические характеристики и обеспечить воспроизводимость проведения испытаний песка между доработанным прибором и прибором КФ-1, представлен на рисунке 3.15.





1 – песок, 2 – пьезометр, 3 – трубка, 4 – стакан, 5 – латунная сетка, 6 – съемное перфорированное дно, 7 – подставка, 8 – поддон, 9 – образец геосинтетического материала  
Рисунок 4.15 – Схема прибора для определения коэффициента фильтрации системы грунт - геосинтетический материал - грунт

Таким образом, можно определить изменение коэффициента фильтрации грунта непосредственно с объекта при использовании геосинтетического материала, а для сравнения коэффициента фильтрации между геосинтетическими материалами в методике определено использовать «стандартный» грунт – монофракционный песок по [155].

Данная методика разработана в виде национального стандарта [156].

#### 4.2.13 Разработка методики определения напряжения сдвига асфальтобетонных слоев с геосинтетическим материалом

До января 2020 года сцепление между слоями асфальтобетона оценивали визуально при отборе кернов и вырубках, что затрудняло определение величины сцепления как количественной характеристике асфальтобетона.

Ситуацию усложняет применение геосинтетических материалов в конструкции дорожных одежд, влияние которых на сцепление со слоями асфальтобетона также не оценивается. При этом очевидно, что два разных геосинтетических материала при прочих равных условиях могут оказать различное как положительное, так и отрицательное влияние на работу конструкции дорожной одежды. Данное влияние будет зависеть от множества факторов, таких как

геометрические размеры, применение и количество подгрунтовки, а также характеристик применяемого геосинтетического материала.

Структура геосинтетических материалов такова, что при укладке в асфальтобетонные слои дорожной одежды материал будет являться инородным телом, и, помимо функции армирования, любой геосинтетический материал будет в большей или меньшей степени выполнять и функцию разделения, что может неблагоприятно отразиться на работе конструкции, это, в том числе, доказывает то, что многие производители геосинтетических материалов изготавливают наравне с георешетками, композитные материалы, состоящие из георешетки и специальной тонкой подложки, которая должна выполнять при укладке в горячий асфальтобетон функцию клея.

По результатам анализа методик определения сцепления асфальтобетонных слоев по [157] стоит отметить, что все приведенные методы дают разные результаты, так как процедуры проведения испытаний и применяемое оборудование различны. Методы CSBT и CCSBT [157] являются факультативными, а установки для испытаний не распространены и являются очень дорогостоящими.

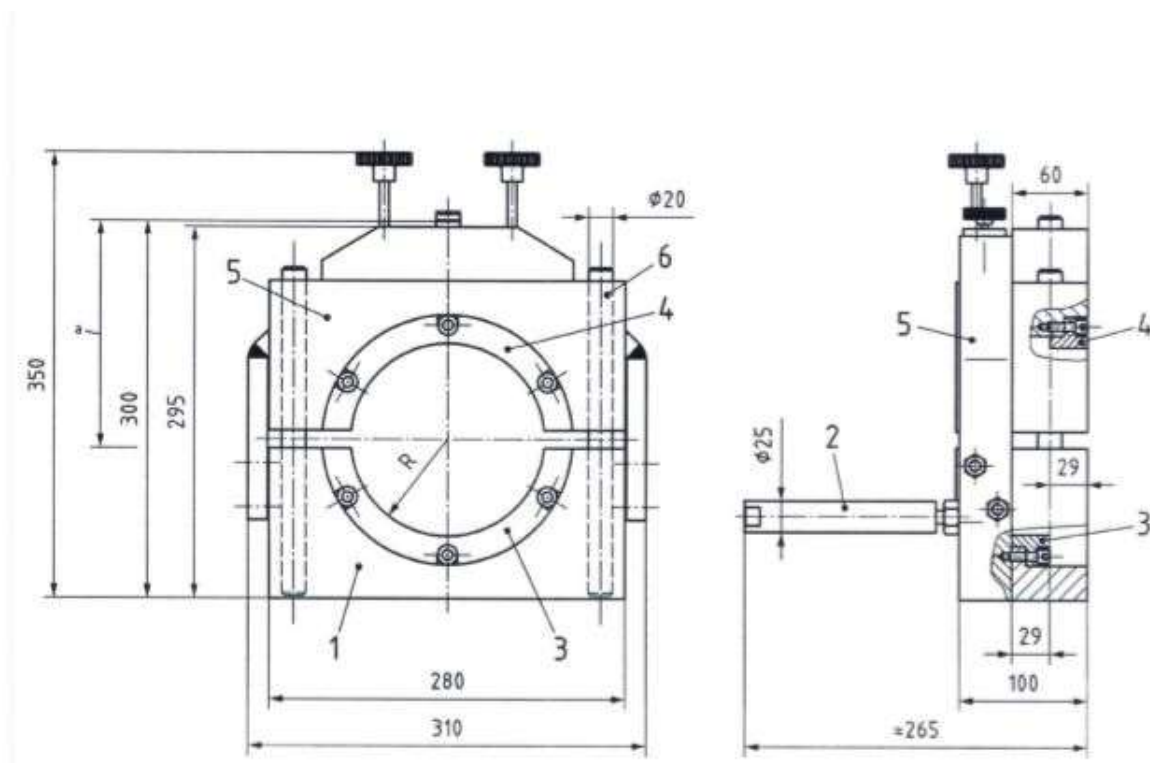
Метод определения сцепления слоев при растяжении (TAT) распространяется только на верхний слой асфальтобетона и имеет существенное ограничение по его толщине. Ко всему прочему, данный метод не моделирует того воздействия на слои, которое происходит в реальных условиях эксплуатации.

Метод определения сцепления слоев крутящим моментом (TBT) [157] сильно зависит от качества применяемого клеевого компонента. В результате проведения испытаний отрыв в большинстве случаев будет по границе соединения клея с металлической пластиной, что станет причиной приготовления необоснованно большого количества образцов для испытания. К недостаткам этого метода также можно отнести и отсутствие указаний конкретных технических характеристик к применяемому оборудованию.

С учетом сказанного выше за основу была принята методика определения сцепления асфальтобетонных слоев методом сдвига (SBT). Также положительным отличием от остальных методик является то, что при испытании на сдвиг в качестве нагружающего устройства может быть применен испытательный пресс, который имеется практически во всех дорожно-строительных лабораториях [158].

Наравне с этим, данный метод позволяет определять сцепление между уже уложенными слоями асфальтобетона непосредственно при отборе кернов с автомобильной дороги.

Принципиальная схема оснастки, совместимой с большинством испытательных прессов, используемой для определения напряжения при сдвиге приведена на рисунке 4.16.



1 – нижняя часть корпуса, 2 – держатель образца, 3 – нижнее поперечное кольцо, 4 – верхнее поперечное кольцо, 5 – верхняя часть корпуса, 6 – направляющие стержни

Рисунок 4.16 - Принципиальная схема устройства для определения напряжения при сдвиге

Образец готовят на вальцевом уплотнителе в два слоя, между которыми помещается геосинтетический материал с подгрунтовкой. Затем из полученного образца изготавливается керн методом выбуривания, чтобы центр ячейки георешетки совпадал с центром оснований керна.

Нагружение проводят с постоянной скоростью ( $50 \pm 2$ ) мм/мин. Во время испытания определяют максимальное значение нагрузки и смещение.

Расчет прочности сцепления при проведении испытания на сдвиг проводят по следующей формуле (4.13)

$$\tau_{SBT,max} = \frac{F}{\pi \times r^2} \quad (4.13)$$

где  $\tau_{SBT,max}$  – максимальное значение напряжения сдвига, МПа;

F – максимальное усилие при нагружении, Н;

r – начальный радиус образца, мм.

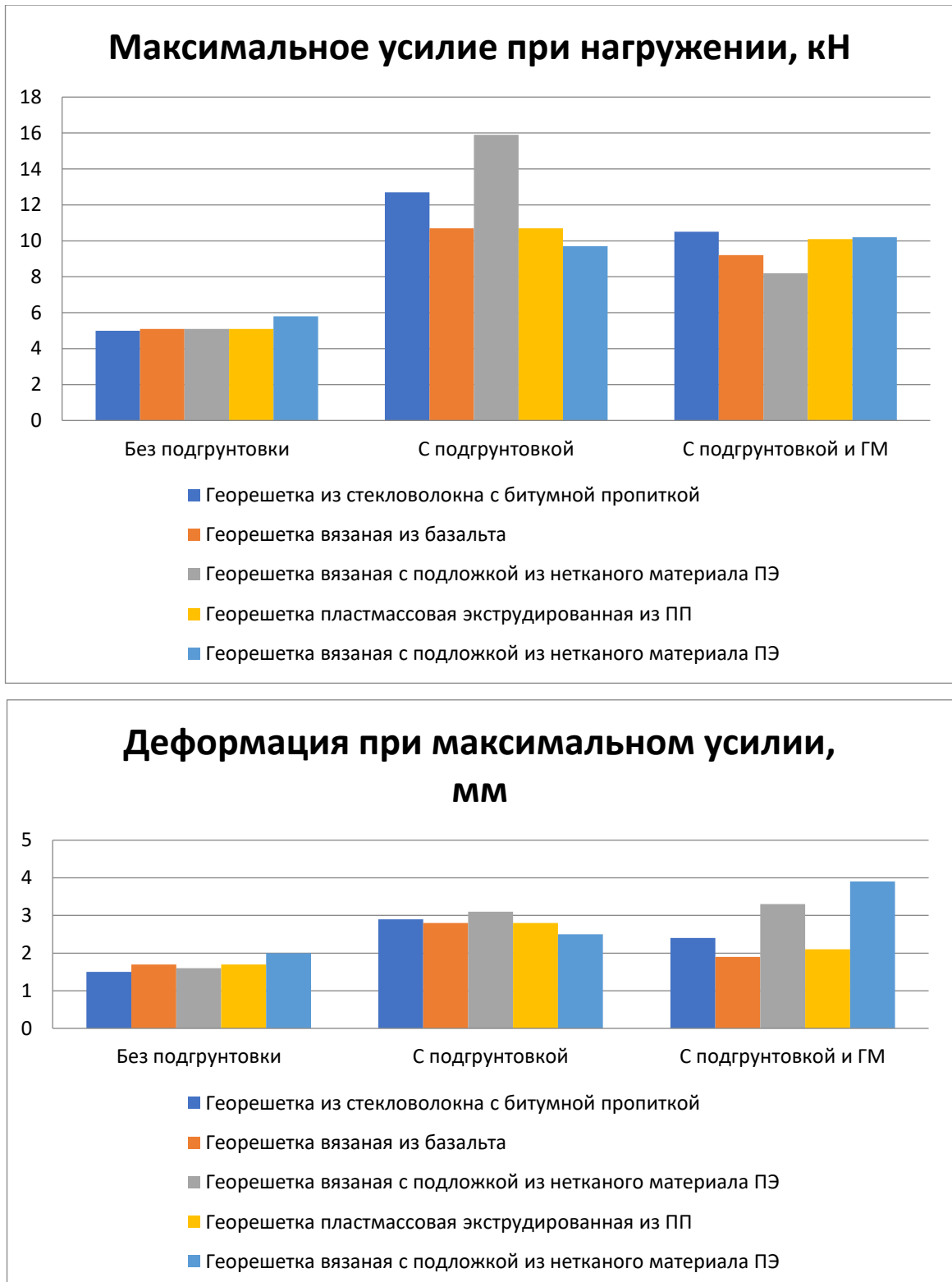
Расчет модуля упругости при проведении испытания на сдвиг проводят по следующей формуле (4.14)

$$k_{SBT,max} = \frac{\tau_{SBT,max}}{\delta_{SBT,max}} \quad (4.14)$$

где  $k_{SBT,max}$  – максимальное значение модуля упругости при сдвиге, МПа/мм;

$\delta_{SBT,max}$  – смещение при максимальном напряжении сдвига, мм.

Сопоставительные результаты испытаний представлены на рисунке 4.17.



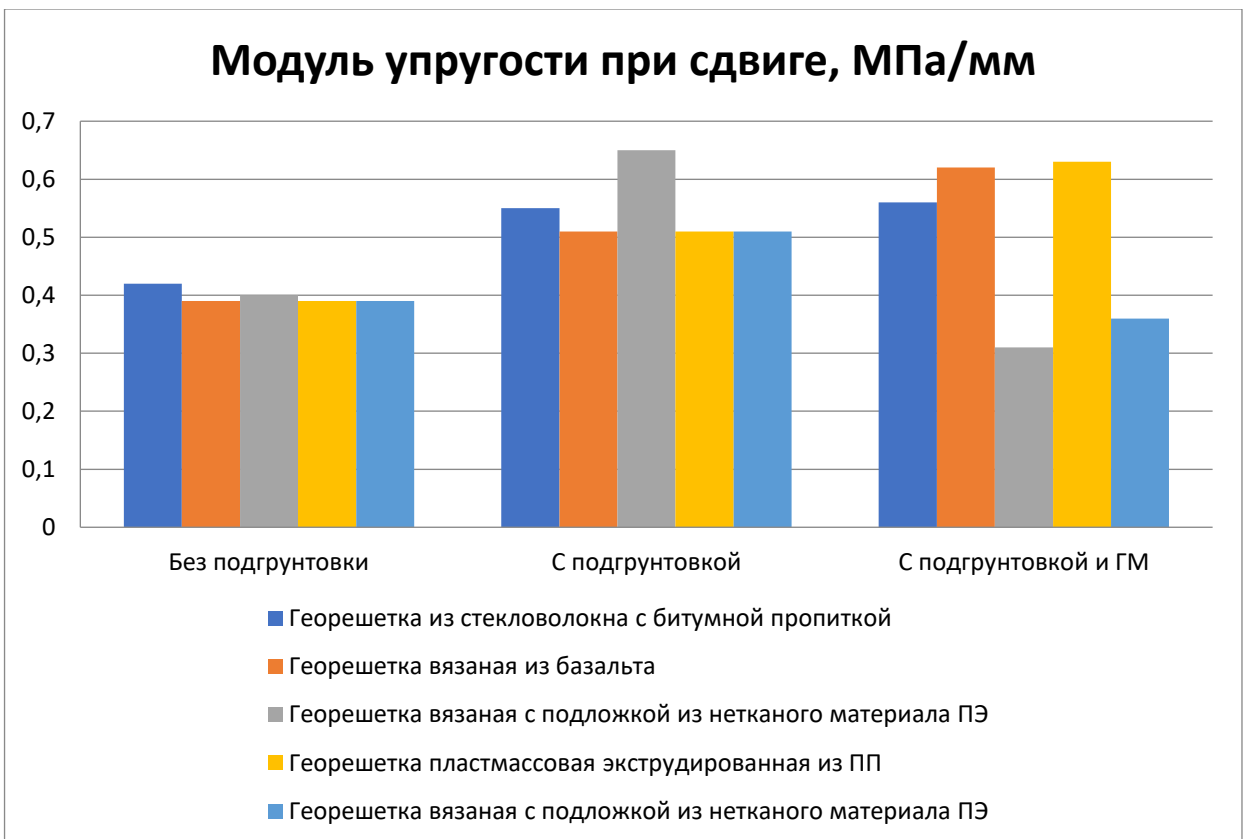
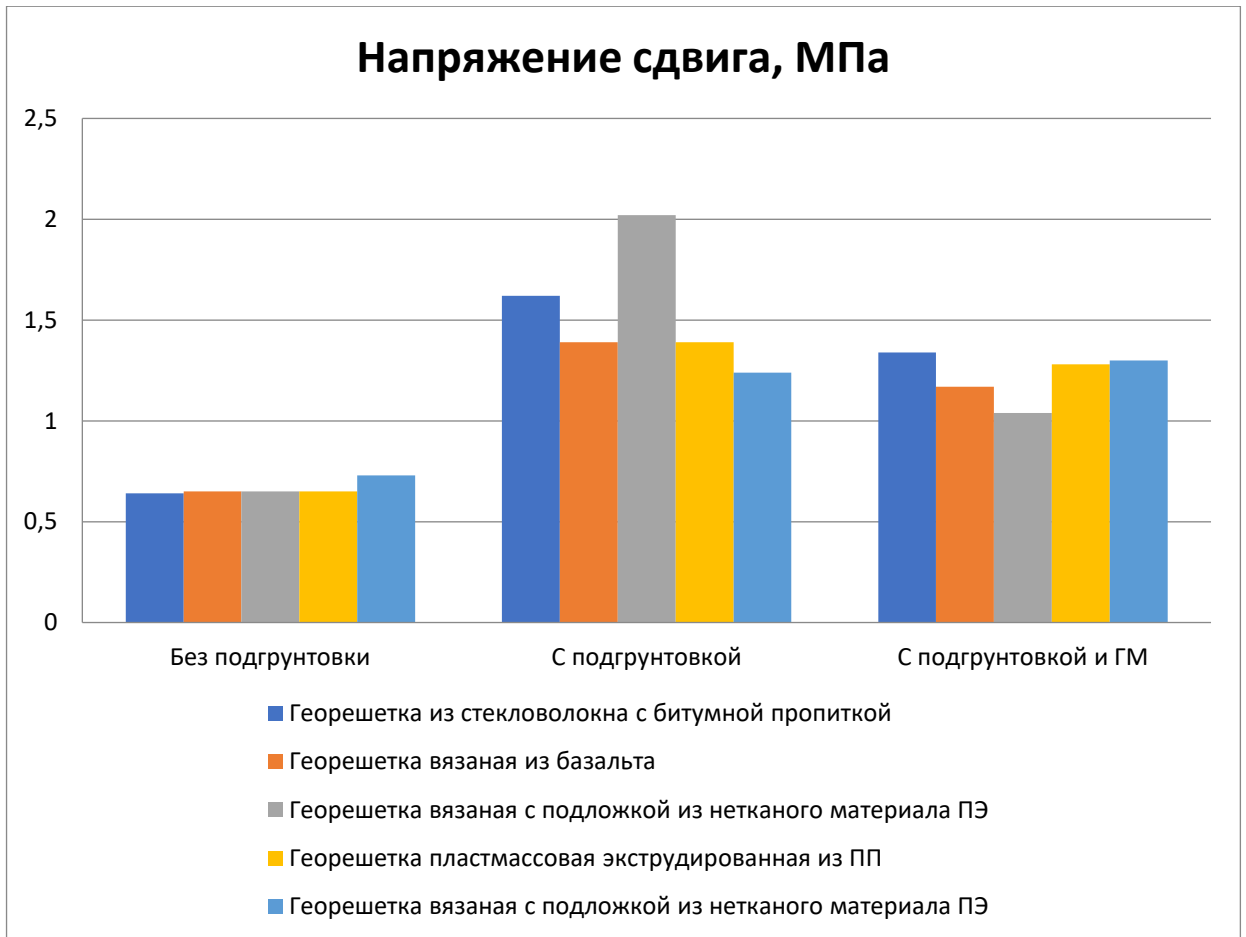


Рисунок 4.17 – Результаты испытаний образцов на сцепление

Данная методика разработана в виде предварительного национального стандарта [159].

### 4.3 Усовершенствование лабораторных методик определения химико-биологических характеристик геосинтетических материалов

#### 4.3.1 Усовершенствование методики определения устойчивости геосинтетических материалов к агрессивным средам

Стойкость геосинтетических материалов к воздействию кислот и щелочей за рубежом определяется в соответствии с [160] – официальный перевод отсутствует. Этот метод предназначен для определения устойчивости продуктов к агрессивным кислотам и щелочам, с учетом конкретных условий эксплуатации.

Пробы полностью погружаются на определенный срок в испытательную жидкость при установленной температуре. Свойства проб проверяются до и после погружения, и, при необходимости, после просушки. Результаты испытаний стараются сравнивать с результатами контрольных образцов, которые хранились при аналогичных условиях.

Исходя из данного документа, был разработан метод испытания, который заключается в измерении устойчивости геосинтетических материалов к агрессивным средам путем сравнения результатов испытания на растяжение образцов исходного материала с результатами испытаний образцов, выдержанных в агрессивной среде в течение 72 часов.

Геосинтетический материал подвергается воздействию либо 0,025М серной кислоты с добавлением 1 ммоль сульфата трехвалентного железа и 1 ммоль сульфата железа (кислая среда), либо гидроксида кальция в виде насыщенной суспензии (2,5 г/л) (щелочная среда) – данные компоненты и их концентрации соответствуют европейским нормам.

Измерения прочности при растяжении проводятся в соответствии с [121]. Используется широкая полоса, что позволяет уменьшить влияние поперечного сужения образца на получаемые характеристики.

Методика также содержит требования по технике безопасности и использованию средств индивидуальной защиты во время проведения испытаний.

Этот метод разработан в виде национального стандарта [161].

#### 4.3.2 Усовершенствование методики устойчивости к микроорганизмам

Геосинтетические материалы, применяемые в дорожном строительстве, в основном контактируют либо с асфальтобетоном, либо с грунтом, в том числе песок и щебень. Также нельзя исключать контакт с реагентами и горюче смазочными материалами.

В связи с этим, для применяемых в строительстве геосинтетических материалов важна их химическая стойкость, а для материалов, работающих в контакте с грунтом еще и устойчивость к микроорганизмам.

Стойкость геосинтетических материалов к микроорганизмам в европейских документах наиболее подробно определяется в соответствии [162] испытаниями на стойкость к микроорганизмам путем закапывания в землю. В данном документе [162] описывается метод определения стойкости геотекстиля и родственной продукции к микроорганизмам путем закапывания испытуемых образцов в землю. Эксперимент заключается в том, что испытуемые образцы при определённых условиях помещают в микробиологически активный грунт, то есть подвергают микробиологической нагрузке. По истечении должного срока пребывания под нагрузкой испытуемые образцы подвергают визуальному анализу (как до, так и после чистки) и далее исследуются физические характеристики образцов. Результаты исследования сравнивают с характеристиками образцов, не подвергавшихся нагрузке. Методика [162] и её основные положения приняты и в отечественной нормативной документации.

Отечественная методика согласно [163] учитывает основные положения [162] и является более универсальной и применимой с учетом ведения строительства на территории России. Другие рассмотренные методики не могут быть взяты за основу для разработки стандарта, так как являются достаточно сложными по подбору бактерий и проведению испытаний, не дадут реальных результатов повреждаемости бактериями и не возможностью последующих испытаний на разрывных машинах из-за размера испытуемого образца.

Сущность методики заключается в том, что испытуемые образцы при определенных условиях подвергаются воздействию микробиологически активного грунта. По истечении срока определяют устойчивость к микробиологическому разрушению по соотношению прочности при растяжении исходных образцов и прочности образцов, подвергшихся закапыванию в грунт.

Грунт должен быть биологически активным. Для достижения оптимального воздействия на геосинтетический материал всей микробиологической популяции насыщенность грунта влагой должна составлять 60%.

Для определения биологической активности грунта используют полоски отбеленной необработанной хлопчатобумажной ткани длиной 200 мм и шириной 50 мм с поверхностной плотностью 250 г/м<sup>2</sup>.

Перед испытанием определяют биологическую активность грунта путем закапывания в грунт полосок хлопчатобумажной ткани сроком на 7 дней. После этого определяют коэффициент биологической активности грунта.

Определение коэффициента биологической активности грунта проводят следующим образом. Подготавливают шесть серий образцов в форме полосок отбеленной необработанной хлопчатобумажной ткани. Одну серию образцов оставляют для сопоставительных испытаний.

Пять серий образцов закладывают в испытательный грунт. После этого образцы извлекают последовательно по истечении 48, 72, 96, 144 и 192 ч.

Определяют прочность при растяжении извлеченных образцов по методике [121]. По полученным данным строят график. По оси абсцисс откладывают время испытаний в часах, по оси ординат – прочность при растяжении.

По построенной зависимости находят время, за которое происходит падение прочности пробных полосок на 75 %.

Коэффициент биологической активности испытательного грунта определяют по формуле (4.15).

$$k_{\sigma} = \frac{t_0}{144}, \quad (4.15)$$

где  $t_0$  – время контакта образца хлопчатобумажной ткани с испытательным грунтом, за которое прочность при растяжении падает на 75%.

Испытательный грунт считается биологически активным, если коэффициент биологической активности лежит в диапазоне от 0,65 до 1,35, представлено на рисунке 4.18. Если это условие не выполняется, то следует заменить испытательный грунт, на грунт с более высокой биологической активностью. После этого вновь проводится определение биологической активности грунта.



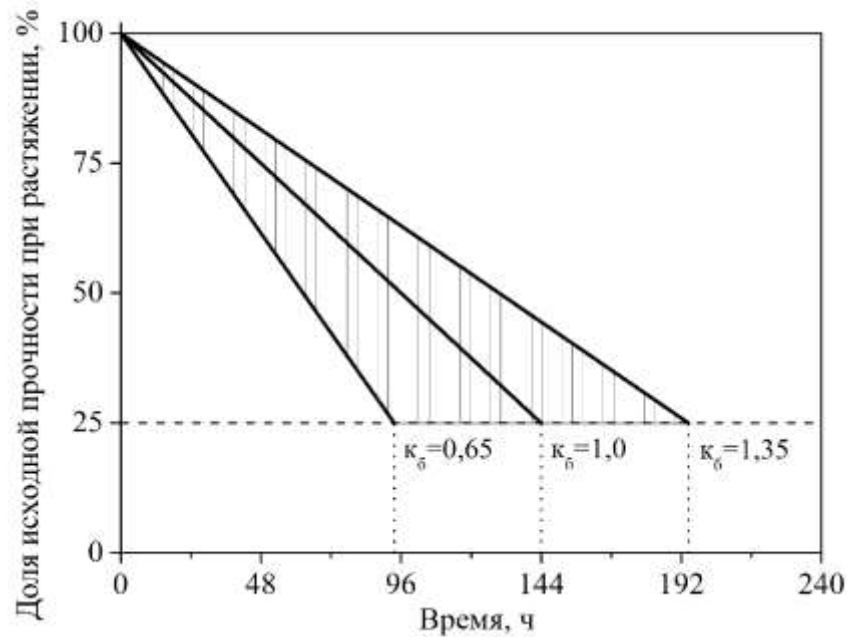


Рисунок 4.18 – Зависимость прочности при растяжении от времени контакта образцов с испытательным грунтом [164]

Условия испытания должны обеспечивать насыщенность грунта влагой, которая постоянно должна быть на уровне 60%. Грунт должен находиться в темном помещении, куда поступает свежий воздух и где циркуляция воздуха происходит при относительной влажности  $(95 \pm 5)\%$  и температуре  $(26 \pm 1)^\circ\text{C}$ . Во время эксперимента необходимо следить, чтобы грунт не стал сухим или влажным, так как это может привести к непригодной для эксперимента микробиологической среде.

При проведении испытаний устанавливают минимум 2 контейнера. Длительность испытания составляет 16 недель. В каждый контейнер с грунтом нужно поместить минимум 2 испытуемых образца и одну дополнительную хлопчатобумажную полоску. Испытуемые образцы закладывают на глубину 100 мм. Образцы должны контактировать с испытательным грунтом.

Испытательные контейнеры помещают в термостат. При испытании серийных образцов длительность эксперимента составляет 16 недель.

Насыщенность грунта влагой контролируют один раз в 4 недели, каждый раз проверяя массу грунта в контейнерах. Если необходимо, добавляют раствор аммиачной селитры и двукальевой соли ортофосфорной кислоты.

По истечении срока испытаний испытуемые образцы вынимают из грунта и отряхивают. Все образцы, включая исходные, погружают в водный раствор этанола (70:30) на 300 с. Затем образцы моют в проточной воде, протирают фильтровальной бумагой и сушат в течение минимум 72 ч при температуре  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  и относительной влажности воздуха  $(65 \pm 5)\%$ .

После этого проводят испытания образцов на растяжение для сравнительного анализа по [121].

Данная методика разработана в виде национального стандарта [165].

#### 4.4 Усовершенствование методики определения долговечности геосинтетических материалов

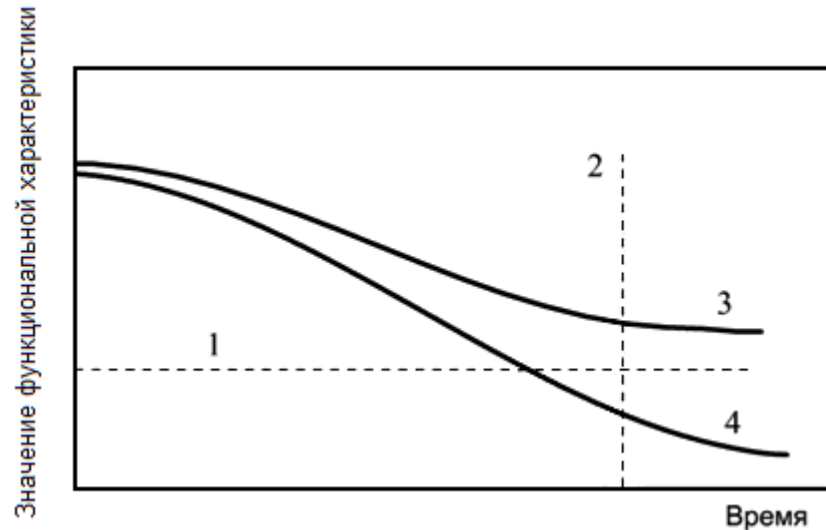
Полимерные материалы, в том числе и геосинтетики, подвержены процессам старения под влиянием различных факторов, таких как температура, кислород, световые и химические воздействия, и прочие. Старение сопровождается изменениями в химическом составе и физической структуре этих материалов, что, в свою очередь, приводит к ухудшению их физико-механических характеристик. С учетом того, что срок службы дорожных конструкций до капитального ремонта составляет около 24 лет, свойства геосинтетического материала в конце этого срока могут значительно отличаться от его первоначальных характеристик.

Старение геосинтетиков связано с воздействием различных эксплуатационных факторов. Долговечность этих материалов определяется их устойчивостью к воздействию погодных условий, механическим нагрузкам, химическим веществам, биологическим агентам и другим факторам, при этом они должны сохранять свои свойства на протяжении всего срока службы дорожных сооружений.

Погодные факторы включают осадки и ультрафиолетовое излучение, которое может влиять на материал на этапе монтажа, однако впоследствии материал защищается слоем грунта. Атмосферные воздействия подразумевают устойчивость геосинтетиков к УФ-излучению, температурам и влаге.

Оценка долговечности геосинтетических материалов представляет собой сложную задачу из-за множественного воздействия факторов. Для достоверной оценки изменения свойств материалов во времени проводятся различные испытания, как в лабораторных, так и в полевых условиях. Экспериментальные исследования проводятся для различных типов и составов геосинтетических материалов, подвергнутых различным режимам нагрузок и воздействий. Выбор методов испытаний для оценки долговечности геосинтетиков основывается на международной практике, а также на адаптации европейских и мировых стандартов, таких как [166] и [167].

На рисунке 4.19 показана динамика функциональных характеристик материалов: кривая 3 иллюстрирует приемлемые характеристики, а кривая 4 — неприемлемые. Значение неприемлемых характеристик (кривая 4) остается ниже проектного уровня (линия 1) на протяжении всего расчетного срока службы (линия 2). Запас прочности геосинтетического материала в дорожной конструкции на любом этапе времени можно определить как разницу между требуемым уровнем характеристик (линия 1) и фактическими значениями.



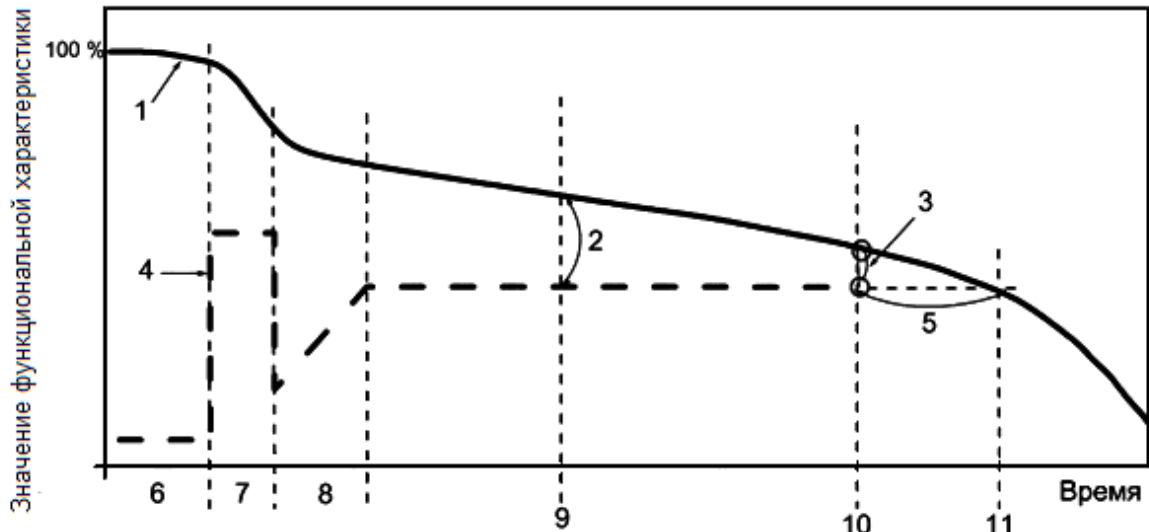
1 - требуемое значение функциональная характеристика; 2 - расчетный срок службы; 3 - приемлемая функциональная характеристика; 4 - неприемлемая функциональная характеристика

Рисунок 4.19 - Зависимость приемлемой функциональной характеристики и неприемлемой функциональной характеристики геосинтетического материала от времени

В реальных условиях взаимосвязь фактической функциональной характеристики и требуемой функциональной характеристики изменяется с течением времени в зависимости от последовательных событий, которые происходят от момента изготовления материала и укладки его в конструкцию (период 8) до конца расчетного срока службы (линия 10) – представлено на рисунке 4.20.

Во время транспортировки и хранения (период 6) геосинтетический материал может подвергаться изменениям в своей прочности, зависящим от погодных условий. Однако при установке (период 7) и последующем строительстве (период 8) его прочность может зависеть от механических повреждений, степень которых определяется следующими факторами:

- структура геосинтетического материала,
- тип строительных материалов, находящихся в контакте с геосинтетическим материалом,
- используемая техника и меры предосторожности в процессе строительных операций.



1 — реальная функциональная характеристика; 2 — запас между необходимым и реальным значением функциональной характеристики; 4 — требуемая характеристика функционирования; 5 — запас прочности между расчетным сроком службы и временем до наступления отказа; 6 — период перед установкой (включает хранение и транспортировку); 7 — продолжительность монтажных работ; 8 — длительность последующих строительных этапов; 9 — промежуточное время при стандартной эксплуатации; 10 — проектный срок службы; 11 — время до момента разрушения

Рисунок 4.20 — График зависимости между реальной функциональной характеристикой и требуемой характеристикой в зависимости от времени (включая периоды хранения, транспортировки, строительных и эксплуатационных процессов)

После укладки геосинтетического материала в дорожную конструкцию (период 8) начинается его период эксплуатации. В течение срока службы геосинтетический материал подвергается химическому, биологическому и физическому воздействиям от грунта, атмосферы, воды и содержания органических веществ. Это приводит к постепенному уменьшению доступных свойств материала до тех пор, пока не достигается расчетный срок службы (позиция 10 на рисунке 4.21). Значение запаса прочности в любой момент времени определяется позицией 2. Далее значение функциональной характеристики продолжает уменьшаться, и если геосинтетический материал остается в тех же условиях после завершения расчетного срока службы, то запас прочности, то есть разница между требуемым и фактическим значением функциональной характеристики, постепенно становится равным нулю (позиция 11).

В международном стандарте [167] приведены рекомендации по оценке долговременной прочности материалов, используемых для армирования грунтов. Стандарт описывает методики расчета понижающих коэффициентов, которые учитывают снижение долговременной прочности геосинтетических материалов под длительными нагрузками, а также влияние атмосферных, химических и биологических факторов.

Долговременная прочность рассчитывается на основе средней прочности материала при растяжении, с уменьшением этой величины за счет применения понижающих коэффициентов. В частности, учитываются следующие факторы:

- коэффициент, описывающий влияние ползучести геосинтетических материалов при постоянной нагрузке,
- коэффициент, определяющий снижение прочности из-за механических повреждений материала,
- коэффициент, отражающий воздействие атмосферных условий,
- коэффициент, учитывающий влияние химических и биологических воздействий на материал.

В стандарте также описан метод расчета коэффициента запаса прочности, который учитывает неопределенность значений прочности при растяжении при экстраполяции на расчетный срок эксплуатации.

Следует отметить, что стандарт [167] предоставляет методики испытаний для оценки понижающих коэффициентов при расчете долговременной прочности геосинтетических материалов для армирования грунтов. Гармонизованные методы испытаний для определения ползучести и долговременной прочности приведены в [163]. Факторы, влияющие на долговечность, включают механические, физико-химические и биологические аспекты. Регулирование проведения испытаний для определения этих факторов описано в нормативных документах.

С учетом указанных документов был разработан предварительный национальный стандарт [168]. В соответствии с [168], показатель долговечности геосинтетического материала используется для оценки  $T_{\text{дол}}$ , который характеризует прочность после воздействия факторов, зависящих от области применения геосинтетического материала. Этот показатель вычисляется согласно формуле (4.16).

$$T_{\text{дол}} = \frac{T_{\text{нор}}}{K_{\text{общ}}}, \quad (4.16)$$

где  $T_{\text{нор}}$  – прочность материала при растяжении, определяемая по [121] для всех материалов, кроме геосотовых, и по [69] для геосотовых материалов,

$k_{\text{общ}}$  – обобщенный коэффициент долговечности, вычисляемый в общем случае по формуле (4.17):

$$k_{\text{общ}} = k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_{4x} \times k_5 \times k_6 \times k_7 \times k_8, \quad (4.17)$$

где  $k_{1x}$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений материала при укладке:

- в песок ( $k_{11}$ ),
- щебень фракции от 4 до 8 мм ( $k_{12}$ ),
- щебень фракции от 31,5 до 63,0 мм ( $k_{13}$ );

$k_2$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от ползучести;

$k_3$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия ультрафиолетового излучения;

$k_{4x}$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия агрессивных сред:

- в кислотной среде ( $k_{41}$ ),
- в щелочной среде ( $k_{42}$ );

$k_5$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от микробиологического воздействия;

$k_6$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от многократного замораживания и оттаивания (далее морозостойкости);

$k_7$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия повышенных температур (теплостойкость);

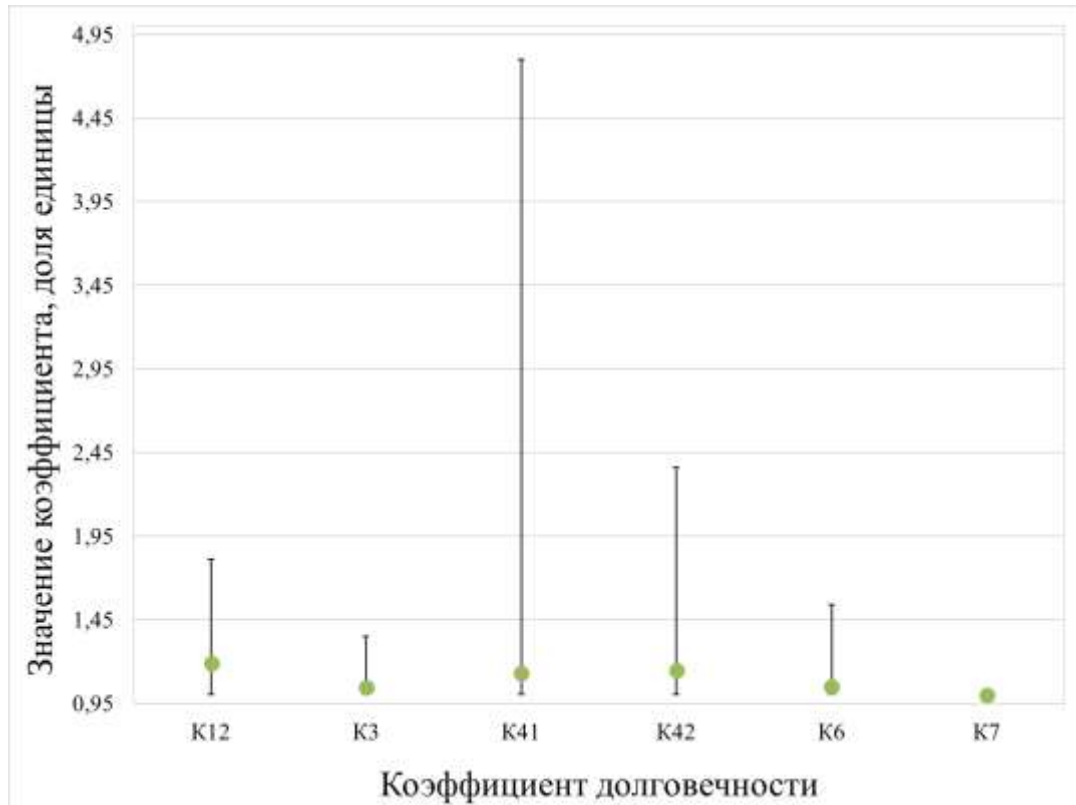
$k_8$  – коэффициент, учитывающий прочность швов геосотовых материалов (его вычисляют только в случаях применения геосотовых материалов).

Коэффициенты  $k_{12}$  и  $k_{13}$  получаются при определении повреждаемости при укладке на испытательном полигоне.

В [169] устанавливаются конкретные коэффициенты долговечности, которые зависят от выполняемой функции материалов. При этом коэффициенты долговечности больше или равны 1, в отличие от определяемых устойчивостей, которые меньше или равны 100%. Этот стандарт отличается от [138] исключительно по этим принципиальным аспектам.

Для проведения анализа долговечности геосинтетических материалов были исследованы результаты испытаний 84 материалов различной структуры, включая геополотна, георешетки, геосотовые материалы и геоматы. Эти материалы были изготовлены из различных сырьевых компонентов, таких как полипропилен (ПП), полиэтилен (ПЭ), полиэтилентерефталат (ПЭТ), ПЭТ с пропиткой на основе битума/ПВХ, стекловолокно, стекловолокно с пропиткой на основе битума и базальт. Каждый из них выполняет разные функции, такие как армирование асфальтобетонных слоев дорожной одежды, армирование слоев дорожной одежды из минеральных материалов, разделение слоев дорожной одежды из минеральных материалов и борьба с эрозией на откосах [170].

Как показано на рисунке 4.21, прочность при растяжении геосинтетических материалов, выполняющих функцию армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды, наиболее подвержена воздействию механических повреждений при укладке в щебень. Наименьшее влияние на прочность оказывает воздействие повышенных температур. Также стоит отметить, что сырье, используемое при производстве этих геосинтетических материалов, чувствительно к воздействию щелочей.



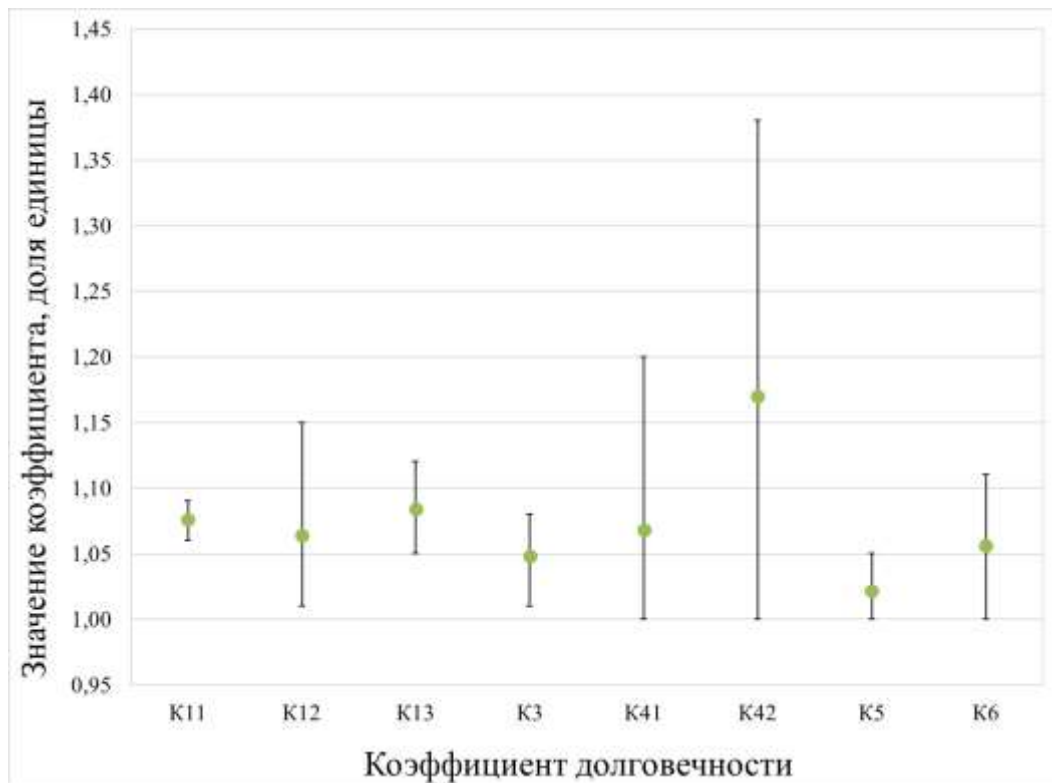
K<sub>12</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений материала при укладке в щебень фракции от 4 до 8 мм; K<sub>3</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия ультрафиолетового излучения; K<sub>41</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия щелочи; K<sub>42</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия кислоты; K<sub>6</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от многократного замораживания и оттаивания; K<sub>7</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия повышенных температур (теплостойкость)

Рисунок 4.21 – График средних значений и размахов для коэффициентов долговечности геосинтетических материалов, выполняющих функцию армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды

На прочность при растяжении геосинтетических материалов, выполняющие функцию армирования слоев дорожной одежды из минеральных материалов, наибольшее влияние оказывает воздействие кислоты, а наименьшее влияние – микробиологическое воздействие, как следует из рисунка 4.22. Сырье данных геосинтетических материалов чувствительно к воздействию кислоты.

Потеря прочности геосинтетических материалов, выполняющих функцию разделения слоев дорожной одежды из минеральных материалов, преимущественно связана с

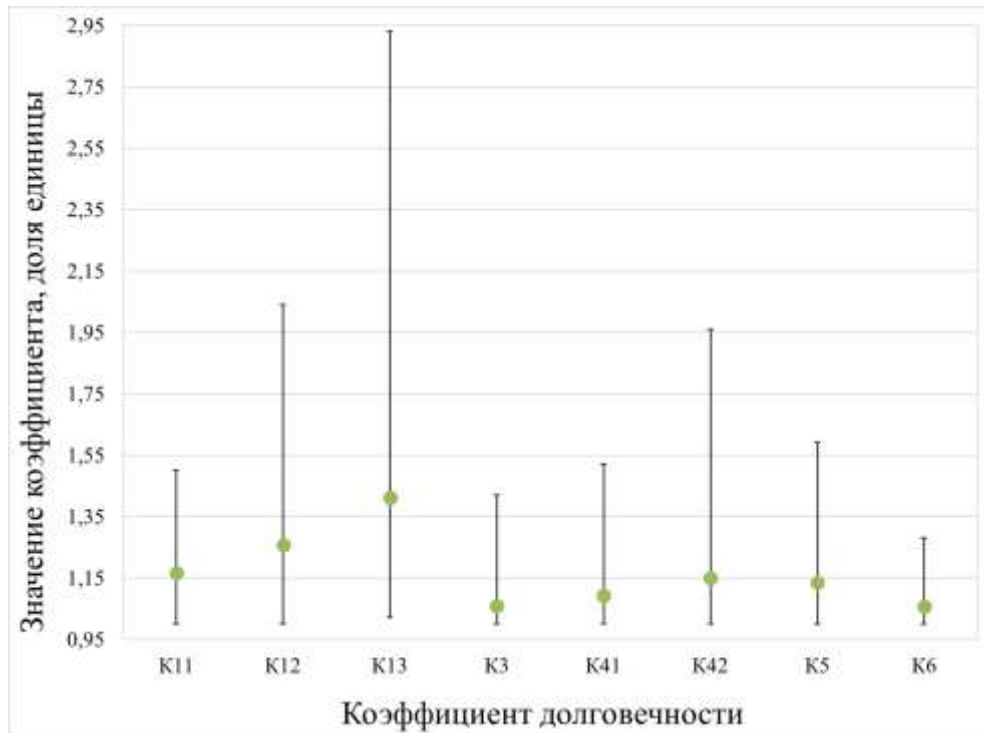
механическими повреждениями при укладке в щебень; а наименьшее влияние на прочность при растяжении оказывают воздействие ультрафиолетового излучения и многократные замораживания и оттаивания, представлено на рисунке 4.23.



$K_{11}$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений материала при укладке в песок;  $K_{12}$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений материала при укладке в щебень фракции от 4 до 8 мм;  $K_{13}$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений материала при укладке в щебень фракции от 31,5 до 63,0 мм;  $K_3$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия ультрафиолетового излучения;  $K_{41}$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия щелочи;  $K_{42}$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия кислоты;  $K_5$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от микробиологического воздействия;  $K_6$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от многократного замораживания и оттаивания

Рисунок 4.22 – График средних значений и результатов для коэффициента долговечности геосинтетических материалов, выполняющих функцию армирования слоев дорожной одежды из минеральных материалов

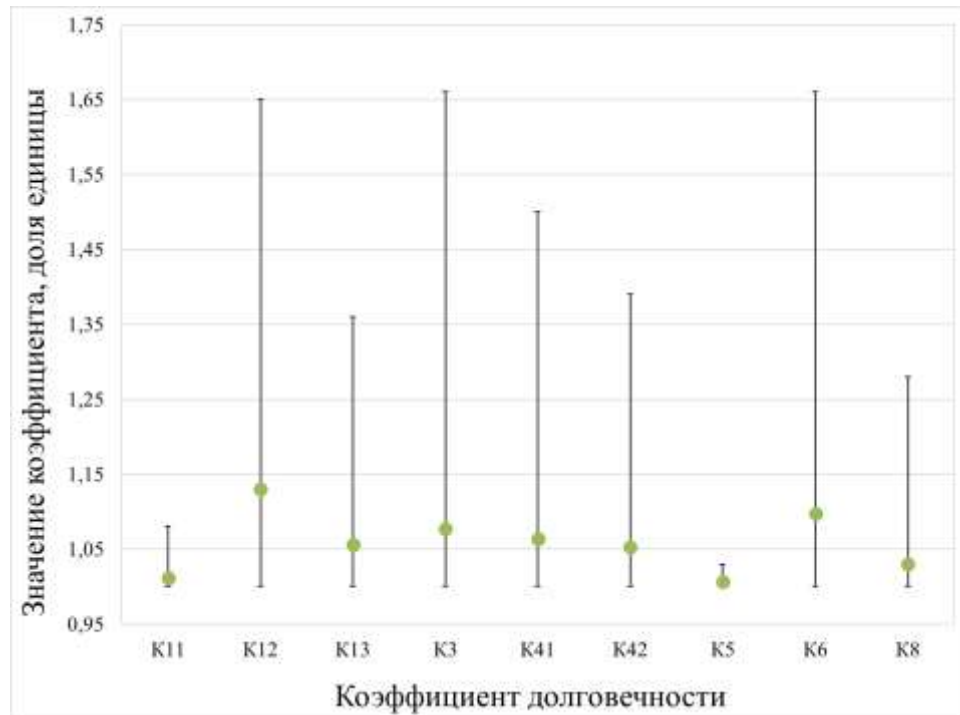




K<sub>11</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений материала при укладке в песок; K<sub>12</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений материала при укладке в щебень фракции от 4 до 8 мм; K<sub>13</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений материала при укладке в щебень фракции от 31,5 до 63,0 мм; K<sub>3</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия ультрафиолетового излучения; K<sub>41</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия щелочи; K<sub>42</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия кислоты; K<sub>5</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от микробиологического воздействия; K<sub>6</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от многократного замораживания и оттаивания

Рисунок 4.23 – График средних значений и результатов для коэффициента долговечности геосинтетических материалов, выполняющих функцию разделения слоев дорожной одежды из минеральных материалов

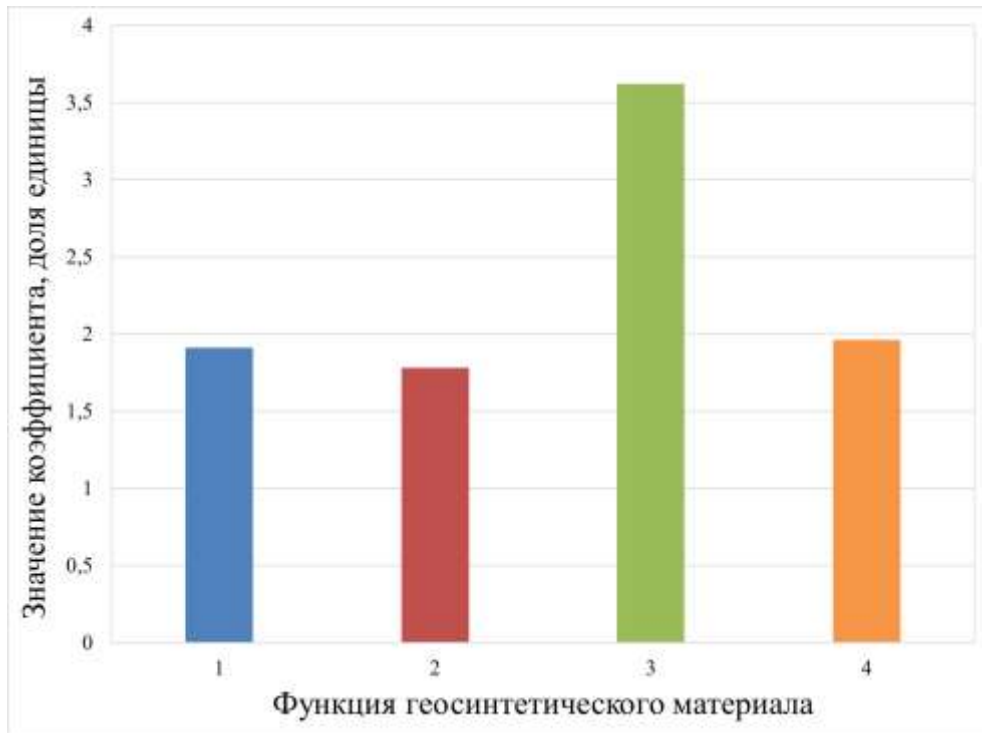
На геосинтетические материалы, выполняющие функцию борьбы с эрозией на откосах, наибольшее влияние на прочность при растяжении оказывают механические повреждения при укладке в щебень фракции от 4 до 8 мм, многократное замораживание и оттаивание, а наименьшее влияние – микробиологическое воздействие, следует из рисунка 4.24.



K<sub>11</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений материала при укладке в песок; K<sub>12</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений материала при укладке в щебень фракции от 4 до 8 мм; K<sub>13</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений материала при укладке в щебень фракции от 31,5 до 63,0 мм; K<sub>3</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия ультрафиолетового излучения; K<sub>41</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия щелочи; K<sub>42</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия кислоты; K<sub>5</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от микробиологического воздействия; K<sub>6</sub> – коэффициент, учитывающий снижение прочности от многократного замораживания и оттаивания; K<sub>8</sub> – коэффициент, учитывающий прочность швов геосотовых материалов

Рисунок 4.24 - График средних значений и результатов для коэффициента долговечности геосинтетических материалов, выполняющих функцию борьбы с эрозией на откосах

Столбчатый график обобщенных коэффициентов долговечности геосинтетических материалов, выполняющих различные функции, представлен на рисунке 4.25. На рисунке видно, что обобщенный коэффициент долговечности принимает наибольшее значение для материалов, выполняющих функцию разделения слоев дорожной одежды из минеральных материалов, что связано с влиянием механических повреждений при укладке в щебень фракции от 4 до 8 мм и от 31,5 до 63,0 мм на прочность при растяжении данных геосинтетических материалов.



1 – функция армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды; 2 – функция армирования слоев дорожной одежды из минеральных материалов; 3 – функция разделения слоев дорожной одежды из минеральных материалов; 4 – функция борьбы с эрозией на откосах

Рисунок 4.25 – Столбчатый график обобщенных коэффициентов долговечности геосинтетических материалов, выполняющих различные функции в конструкции автомобильных дорог и дорожных сооружений

Как было указано выше, полигонные испытания позволяют оценить повреждаемость геосинтетических материалов при укладке между слоями песок-щебень и песок-песок. Данный процесс полностью моделирует основные стадии устройства не асфальтобетонных слоев дорожной одежды, в том числе:

- выравнивание песчаного основания с последующим уплотнением (устранение каменных включений и строительного мусора);
- укладка материала и анкеровка образцов в четырех местах по периметру, представлено на рисунке 4.26а);
- засыпка щебнем по методу заклиновки и песком, представлено на рисунке 4.26б);
- уплотнение с помощью вибрационного дорожного катка, представлено на рисунке 4.26в);
- извлечение материала, представлено на рисунке 4.26г).



а) б)



в) г)

Рисунок 4.26 – Этапы проведения испытаний на устойчивость к механическим повреждениям  
Извлеченные образцы испытываются в лаборатории на прочность по [121]. Результаты испытания сравниваются с результатами испытаний исходных материалов.

Методика определения коэффициента, учитывающего снижение прочности от механических повреждений материала при укладке, была разработана впервые как документ по стандартизации Российской Федерации в виде приложения А [138], а потом перенесена в приложение А [169].

#### 4.5 Выводы по главе 4

1) Разработаны и усовершенствованы методики испытаний для оценки характеристик геосинтетических материалов, требуемых для их применения в дорожных конструкциях. Утвержденные в форме национальных стандартов методики испытаний включают в себя:

- определение прочностных характеристик;
- определение устойчивости к ультрафиолетовому излучению;
- определение устойчивости к температурным переходам через ноль (морозостойкости);
- определение гибкости при отрицательных температурах;
- определение устойчивости к повышенным температурам;
- определение устойчивости к агрессивным средам;

- определение стойкости к циклическим нагрузкам;
- определение прочности при статическом продавливании (CBR-тест);
- определение прочности при динамическом продавливании (испытание падающим конусом);
- определение прочности швов для геосотовых материалов;
- определение прорастания;
- определение вымываемости;
- определение коэффициента фильтрации;
- определение коэффициента сцепления ГМ со слоями асфальтобетона;
- определения долговечности.

В таблице 4.7-4.8 приведены методики, которые были усовершенствованы и разработаны вновь в соответствии с принятой методологией для нормирования свойств ГМ.

Таблица 4.7 – Усовершенствованные методики испытаний ГМ

Характеристики ГМ	Национальный стандарт, устанавливающий методику испытаний (аналог EN, ISO, ASTM)	Наихудшая остаточная прочность, %
1 Прочность при растяжении и относительное удлинение при максимальной нагрузке	ГОСТ Р 55030 (ISO 10319)[121]	-
2 Устойчивость к УФ-излучению	ГОСТ Р 55031 (EN 12224)[123]	60
3 Устойчивость к микроорганизмам	ГОСТ Р 58830 (EN 12225)[165]	70
4 Устойчивость к кислотам и щелочам	ГОСТ Р 55035 (ISO 12960)[161]	10
5 Устойчивость к циклическим нагрузкам	ГОСТ Р 56336 (ISO 10722)[129]	5
6 Прочность при продавливании (падающий конус)	ГОСТ Р 56337 (ISO 13433)[170]	-
7 Прочность при статическом продавливании	ГОСТ Р 56335 (ISO 12236)[171]	-
8 Прочность швов	ГОСТ Р 56338 (ISO 13426)[69]	-
9 Ползучесть геосинтетических материалов	ГОСТ Р 56339 (ISO 13431)[172]	-
10 Коэффициент прорастания	ГОСТ Р 59692 [72] (ASTM 7322 [137])	-
11 Коэффициент вымываемости	ГОСТ Р 59692 [72] (ASTM D 7101 [139])	-
12 Расчет долговечности	ГОСТ Р 70060 [169] (ISO/TS 13434 [166] и ISO/TR 20432 [167])	-

Таблица 4.8 – Вновь разработанные методики испытаний ГМ

Характеристики ГМ	Национальный стандарт, устанавливающий методику испытаний	Наихудшая остаточная прочность, %
1 Устойчивость к циклам замораживания и оттаивания	ГОСТ Р 55032 [124]	10
2 Устойчивость к повышенным температурам	ГОСТ Р 55034 [128]	10
3 Устойчивость к повреждаемости при укладке	ГОСТ Р 70060 [169]	5
4 Гибкость при отрицательных температурах	ГОСТ Р 55033 [127]	-
5 Коэффициент фильтрации	ГОСТ Р 59691 [156]	-
6 Коэффициент сцепления между слоями	ПНСТ 395 [159]	-

2) Показано, что геосинтетический материал в течение жизненного цикла меняет свои прочностные характеристики, поэтому методики испытаний учитывают снижение прочности ГМ

от воздействующих на них факторов, которые оказывают влияние на материал при устройстве и эксплуатации дорожных конструкций.

3) Показаны значения остаточной прочности у материалов за более чем 10 летний период контроля качества ГМ для каждого воздействующего фактора при устройстве и эксплуатации дорожных конструкций. Наихудшие значения остаточной прочности были установлены вследствие воздействия процесса засыпки ГМ дискретными минеральными материалами и их уплотнения катками при устройстве слоев дорожных одежд, а также под влиянием циклических нагрузок, что составило всего 5 % от исходной прочности геосинтетического материала.

4) Разработанные методики позволяют обеспечить создание обоснованной и стандартизированной системы для оценки качества ГМ в дорожной отрасли. Указанные методики способствуют повышению точности и объективности оценки характеристик геосинтетических материалов, что является важным условием для обеспечения эксплуатационной надежности дорожных конструкций.

Геосинтетический материал 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 (4.18) и (4.19) и таблицей 1.

$$T_{\text{дол}} = \frac{T_{\text{нор}}}{k_{\text{общ}}} \quad (4.18)$$

где  $T_{\text{нор}}$  – исходная прочность геосинтетического материала, кН/м;  $k_{\text{общ}}$  – определяется по формуле (4.19).

$$k_{\text{общ}} = k_{1x} \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_{4x} \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot k_7 \cdot k_8 \quad (4.19)$$

Таблица 4.9 – Коэффициенты долговечности применительно к функциям геосинтетического материала

Наименование коэффициента	Функция геосинтетического материала			
	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				

Результаты исследования легли в основу разработки системы контроля и оценки качества геосинтетических материалов (ГМ) в дорожном хозяйстве Российской Федерации. Эта система представлена в виде документов национальной системы стандартизации, основным разработчиком которых является 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 технических требований к каждой функции. Автор, выступая в роли основного исполнителя работ, активно участвовал в планировании экспериментов, лабораторных испытаниях и обработке результатов, а также в разработке стандартов и их сопровождении до утверждения. Созданная на настоящее время отраслевая система представлена на рисунке 4.26.



Рисунок 4.26 - Фонд документов по стандартизации на геосинтетические материалы и перспективы для его развития



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный комплексный аналитический обзор позволил определить 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 «ГМ – дорожная конструкция – природная среда». Учет двух групп факторов, внешних и техногенных, влияющих на ГМ 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 ГМ асфальтобетонных слоев дорожной одежды, которая показала снижение вероятности образования в них низкотемпературных трещин, и выполнены расчеты дорожной конструкции с применением геосинтетического материала, выполняющего функцию армирования несвязанных конструктивных слоев, подтвердивших эффективность применения ГМ 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 ГМ. 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 ГМ 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 в Российской Федерации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 ВекторСтрой. Применение геосинтетических материалов для строительства, рекомендации. – Режим доступа: [www.road-stroy.com](http://www.road-stroy.com). – Дата обращения: 26.02.2024.
- 2 Полилайн. Геосинтетические материалы - применение в строительстве. – Режим доступа: [polyline.ru](http://polyline.ru). – Дата обращения: 26.02.2024.
- 3 Репозиторий Белорусского национального технического университета. [rep.bntu.by](http://rep.bntu.by). – Дата обращения: 26.02.2024.
- 4 Левашов Г.М., Сиротюк В.В., Рычкова О.А. Влияние условного показателя деформативности геосинтетического материала на расчет усиления дискретных оснований. Вестник СибАДИ. 2017. № 4(50). С. 121-125. – Режим доступа: <https://doaj.org/article/062ac21e78764fb8835e57e8e9b5d37e>. – Дата обращения: 26.02.2024.
- 5 Юмашев В.М., Казарновский В.Д., Львович Ю.М., «Современный мировой опыт применения геосинтетики в дорожной отрасли» Науч.-практ. семинар, г. Владимир, 6-10 апр. 1998. , № Тр. / Союздорнии; Вып. 196, - М., 1998..
- 6 Львович Ю.М., Аливер Ю.А., Ким А.И., «Геосинтетические и геопластиковые материалы в дорожном строительстве,» Автомоб. дороги: Обзорн. информ. / Информавтодор, № 5, р. 76, М., 1998.
- 7 Львович Ю.М., «Дорожная геосинтетика. Тенденции и направления применения геосинтетических материалов в дорожном строительстве,» Строит. техника и технология, - 2002.
- 8 Геосинтетические и геопластиковые материалы в дорожном строительстве. Обзорная информация. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://meganorm.ru>. – Дата обращения: 26.02.2024.
- 9 ИСТОРИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОСИНТЕТИКОВ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://newchemistry.ru>. – Дата обращения: 26.02.2024.
- 10 Серг В. "GeoSynthetics" №2 [Электронный ресурс] / Серг В. - Режим доступа: [https://issuu.com/serg-apgm/docs/\\_geosynthetics\\_\\_2](https://issuu.com/serg-apgm/docs/_geosynthetics__2). - Дата обращения: 18.09.2023.
- 11 Геотекстиль Дорнит - описание и характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ridatex.ru>. Дата обращения: 18.09.2023.
- 12 Материал дорнит - это что такое? Технические характеристики дорнита [Электронный ресурс] // FB.ru. – Режим доступа: <https://fb.ru>. Дата обращения: 18.09.2023.
- 13 Геосинтетические материалы в дорожном строительстве. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dor-tech.net>. Дата обращения: 18.09.2023.
- 14 Квардицкая А.В. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ // Материалы X Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» - Режим доступа: <https://scienceforum.ru>. Дата обращения: 18.09.2023.

- 15 СНиП 2.05.02-85. Автомобильные дороги [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
- 16 СНиП 3.06.03-85. Мосты и трубы [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
- 17 ВСН 26-90. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации кабельных линий связи на железнодорожном транспорте [Текст]. – М.: Министерство путей сообщения РСФСР, 1990.
- 18 ВСН 84-89. Строительство зданий и сооружений на вечномёрзлых грунтах [Текст]. – М.: Министерство строительства СССР, 1989.
- 19 Симчук Е.Н., Медведев Д.В. Нормативно-техническое обеспечение применения геосинтетических материалов // Мир дорог. – 2015. – Апрель.
- 20 ГеоНовации. Обзор производителей геосинтетических материалов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.geonovation.ru> . Дата обращения: 26.09.2023.
- 21 Кларе Г., Фрицше Э., Греббе Ф. Синтетические полиамидные волокна. Санкт-Петербург: Химия, 1999.
- 22 Большая химическая энциклопедия. Сайт о химии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ximuk.ru/>. Дата обращения: 26.09.2023
- 23 Полиэтилен. Материал из Википедии — свободной энциклопедии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>. Дата обращения: 26.09.2023.
- 24 Сазанкова Екатерина Сергеевна Физико-механические свойства синтетических волокон используемых при изготовлении кордной ткани для резинотканевых конвейерных лент // ГИАБ. 2015. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-mehanicheskie-svoystva-sinteticheskikh-volokon-ispolzuemyh-pri-izgotovlenii-kordnoy-tkani-dlya-rezintkanevyh-konveyernyh-lent>. Дата обращения: 19.08.2023.
- 25 Пластинфо [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://plastinfo.ru/>. Дата обращения: 26.09.2023.
- 26 Справочник химика 21. Химия и химическая технология [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.chem21.info/>. Дата обращения: 26.09.2023
- 27 Общая характеристика базальтовых волокон [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://studfile.net/>. Дата обращения: 26.09.2023.
- 28 Виды переплетения тканей со схемами и их назначение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://alyans.su/stati/vidy-perepleteniya-tkani/>. Дата доступа: 27.02.2024.
- 29 Виды ткацких переплетений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pfkr.ru/blog/vidy-tkatskikh-perepleteniy/>. Дата доступа: 27.02.2024.
- 30 Виды переплетений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tradtex.ru/poleznaya-informatsiya/poleznye-stati/vidy-perepleteniy/>. Дата доступа: 27.02.2024.

- 31 Виды ткацких переплетений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vse-tkani.ru/stati/vidy-tkatskikh-perepleteniy>. Дата доступа: 27.02.2024.
- 32 Способы изготовления трикотажных изделий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iv-creative.ru/stati/sposoby-izgotovleniya-trikotazhnykh-izdeliy/>. Дата доступа: 27.02.2024.
- 33 Технология производства трикотажа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://dptf.drezna.ru/theory/production/06\\_04/](https://dptf.drezna.ru/theory/production/06_04/). Дата доступа: 27.02.2024.
- 34 Трикотаж - что за ткань, описание и состав, виды материала [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://star-tex.ru/article/chto\\_takoe\\_trikotazh/](https://star-tex.ru/article/chto_takoe_trikotazh/). Дата доступа: 27.02.2024.
- 35 Каковы особенности производства трикотажа? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://winwool.ru/specifika-i-tonkosti-proizvodstva-trikotazha/>. Дата доступа: 27.02.2024.
- 36 Технология производства нетканых материалов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://allfilters.ru/tehnologiya-proizvodstva-netkanyix-materialov-dlya-filtrovaniya.html>. Дата доступа: 27.02.2024.
- 37 Текстильные нетканые материалы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://uminex.by/blog/tekstilnye-netkanye-materialy>. Дата доступа: 27.02.2024.
- 38 Нетканые материалы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bigenc.ru/c/netkanye-materialy-e28a25>. Дата доступа: 27.02.2024.
- 39 Виды геотекстиля, изготовление и свойства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://polyline.ru/articles/raznovidnosti-geotekstilyaizgotovlenie-i-oblast-primeneniya>. Дата доступа: 27.02.2024.
- 40 Разработка классификации геосинтетических материалов, применительно к дорожному хозяйству [Текст]. – Отчет о научно-исследовательской работе, ООО «Мегатех инжиниринг» (контракт рег. № УД 47/160 от 09.10.2008), 2009, 127 с.
- 41 "Huesker (Ideen, Ingeneering, Innovationen)" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.huesker.de/referenzen/?filter=b2>. Дата обращения: 19.11.2022.
- 42 "DuPont de Nemours, Inc." [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dupont.co.uk/fabrics-fibers-and-nonwovens/roads.html>. Дата обращения: 19.11.2022.
- 43 "Машина-ТСТ" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mahina-tst.com/ru/проекты/>. Дата обращения: 19.11.2022.
- 44 "Группа компаний Рускомполит" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ruscomposit.com/portfolio/steklonit/>. Дата обращения: 19.11.2022.
- 45 "Группа компаний Миаком" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://miakom.ru/obekty/>. Дата обращения: 19.11.2022.
- 46 "РГК" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rusgc.ru/>. Дата обращения: 19.11.2022.

- 47 "Славрос Геосинтетические материалы" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://slavros.ru/>. Дата обращения: 19.11.2022.
- 48 Росавтодор, "Управление научно-технических исследований, информационных технологий и хозяйственного обеспечения Федерального дорожного агентства" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosavtodor.gov.ru/about/upravlenie-fda/upravlenie-nauchno-tekhnicheskikh-issledovaniy-informatsionnykh-tekhnologiy-i-khozyaystvennogo-obespecheniya/standarty-organizatsiy-sto>. Дата обращения: 18.11.2022.
- 49 ОДМ 218.1.002-2020. Отраслевой дорожный методический документ. Рекомендации по организации и проведению работ по стандартизации в сфере дорожного хозяйства [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosavtodor.gov.ru/>. Дата обращения: 19.11.2022.
- 50 ОДМ 218.5.003-2010. Рекомендации по применению геосинтетических материалов при строительстве и ремонте автомобильных дорог [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200077146>. – Дата доступа: 19.11.2022.
- 51 Анализ причин возникновения трещин в дорожных покрытиях [Электронный ресурс] // CORE. – Режим доступа: <https://core.ac.uk/download/39684571.pdf>. – Дата доступа: 27.02.2023.
- 52 Виды трещин на асфальте и причины их появления [Электронный ресурс] // Дзен. – Режим доступа: [https://dzen.ru/a/YbwwGo-SCk\\_ECiJF](https://dzen.ru/a/YbwwGo-SCk_ECiJF). – Дата доступа: 27.02.2023.
- 53 Трещины на асфальтобетонных покрытиях: причины [Электронный ресурс] // Молодой ученый. – 2016. – Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/110/26507/>. – Дата доступа: 27.02.2023.
- 54 ГОСТ 19331-81 Ватины холстопршивные технические. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200018445>. – Дата доступа: 28.02.2024.
- 55 ГОСТ 29104.12-91 Ткани технические. Метод определения стойкости к нефтепродуктам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294825/4294825574.pdf>. – Дата доступа: 28.02.2024.
- 56 ГОСТ 29104.14-91 Ткани технические. Метод определения термостойкости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294825/4294825572.pdf>. – Дата доступа: 28.02.2024.
- 57 ГОСТ 29104.16-91 Ткани технические. Метод водопроницаемости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data/384/38485.pdf>. – Дата доступа: 28.02.2024.
- 58 ГОСТ 29104.17-91 Ткани технические. Метод определения стойкости к истиранию по плоскости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294825/4294825569.pdf>. – Дата доступа: 28.02.2024.

- 59 ГОСТ 29104.22-91 Ткани технические. Метод определения компонентов полного удлинения при растяжении нагрузкой, меньше разрывной [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200019028>. – Дата доступа: 28.02.2024.
- 60 ГОСТ Р 50275-92 Материалы геотекстильные. Метод отбора проб [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294819/4294819880.pdf>. – Дата доступа: 28.02.2024.
- 61 ГОСТ Р 50276-92 (ИСО 9863-90) Материалы геотекстильные. Метод определения толщины при определенных давлениях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200027933>. – Дата доступа: 28.02.2024.
- 62 ГОСТ Р 50277-92 (ИСО 9864-90) Материалы геотекстильные. Метод определения поверхностной плотности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294819/4294819878.pdf>. – Дата доступа: 28.02.2024.
- 63 ОДМ 218.5.002-2008. Методические рекомендации по применению полимерных геосеток (георешеток) для усиления слоев дорожной одежды из зернистых материалов.– М.: Федеральное дорожное агентство, 2008.
- 64 ОДМ 218.5.001-2009. Методические рекомендации по применению геосеток и плоских георешеток для армирования асфальтобетонных слоев усовершенствованных видов покрытий при капитальном ремонте и ремонте автомобильных дорог. – М.: Федеральное дорожное агентство, 2009.
- 65 ОДМ 218.5.005-2010. Классификация, термины, определения геосинтетических материалов применительно к дорожному хозяйству.– М.: Федеральное дорожное агентство, 2010.
- 66 Е.Н. Симчук, Д.В. Медведев, А.Е. Симчук «Проблемы и перспективы расчетов дорожных конструкций с применением геосинтетических материалов» // Научно-технический журнал «Автомобильные дороги и мосты» №2 (32) / 2023 // SSN 2225-9082 // с.89-95.
- 67 ГОСТ Р 55028-2012 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Классификация, термины и определения // Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2019 год.
- 68 ISO 10318:2005. Geosynthetics — Terms and definitions.
- 69 ГОСТ Р 56338-2015. Требования к армированию слоев дорожной одежды из дискретных материалов. Москва: Стандартинформ, 2015.
- 70 ГОСТ Р 56419-2015. Требования к разделению слоев из дискретных материалов. Москва: Стандартинформ, 2015.
- 71 ГОСТ Р 55029-2012. Требования к армированию асфальтобетонных слоев дорожной одежды. Москва: Стандартинформ, 2012.

- 72 ГОСТ Р 59692-2021. Требования по борьбе с эрозией на откосах. Москва: Стандартинформ, 2021.
- 73 ПНСТ 503-2020. Общие технические требования к геосинтетическим материалам для дорожного строительства. Москва: Стандартинформ, 2020.
- 74 Симчук Е.Н., Медведев Д.В., Богомолова С.А., Никитин М.И. "Современное развитие системы стандартов в области применения геосинтетических материалов в дорожном строительстве". Дороги России, №3 (123), 2021.
- 75 DIN EN 13249:2005 Geotextiles and geotextile-related products. Required characteristics for use in the construction of roads and other trafficked areas (excluding railways and asphalt inclusion) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/806759bf-9c7b-4079-945f-148d8b54b466/en-13249-2000-a1-2005>. – Дата доступа: 28.02.2024.
- 76 ОДН 218.046-01 Проектирование нежестких дорожных одежд автомобильных дорог общей сети [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294847/4294847959.pdf>. – Дата доступа: 28.02.2024.
- 77 Медведев Д.В. Результаты сопоставительных испытаний геосинтетических материалов для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды // Технический вестник дорожного хозяйства. – 2011. – № 2
- 78 ВСН 46-83 Инструкция по проектированию покрытий автомобильных дорог [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.russiagost.com/p-20071-vsn-46-83.aspx>. – Дата доступа: 28.02.2024.
- 79 EN 15381:2008 Геотекстили и материалы, связанные с геотекстилями - характеристики, необходимые для применения в покрытиях дорог и асфальтовых настилах. [Текст] / Европейский комитет по стандартизации. – CEN, 2008
- 80 Teltayev B., Radovskiy B. Predicting thermal cracking of asphalt pavements from bitumen and mix properties. Road Materials and Pavement Design, 2018, Iss. 8. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1350598>
- 81 Радовский Б.С., Телтаев Б.Б. Р Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям / Б.С. Радовский, Б.Б. Телтаев. – Алматы: «Білім» баспасы, 2013. – 152 с.
- 82 Альбом типовых решений по применению геосинтетических материалов компании ООО «ГеоСМ»: [сайт]. URL: [www.geo-sm.ru/wp-content/uploads/Al-bom-tipovy-h-reshenij-1.pdf](http://www.geo-sm.ru/wp-content/uploads/Al-bom-tipovy-h-reshenij-1.pdf)
- 83 Феодосьев В.И. Десять лекций-бесед по сопротивлению материалов. М.: Физматлит, 1975. 176 с.



- 84 Демидов А.В. Оптимизация методов спектрального моделирования процессов деформирования полимерных материалов: автореферат дис. ... доктора технических наук: 05.13.18 / С.-Петерб. политехн. ун-т. - Санкт-Петербург, 2006. - 32 с.
- 85 ГОСТ Р 58406.4-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Приготовление образцов-плит вальцовым уплотнителем.
- 86 ГОСТ Р 58406.6-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения предела прочности на растяжение при изгибе и предельной относительной деформации растяжения.
- 87 “Автодор” представил новый подход к мониторингу автомобильных дорог: [сайт]. [2018]. URL: <https://russianhighways.ru/press/news/59154/>
- 88 Дистанционный мониторинг состояния дорожных конструкций как способ повышения долговечности автомобильных дорог / В. П. Матуа [и др.] // Автомобильные дороги. 2019. № 3. С. 100-106
- 89 Строительство, содержание, ремонт, капитальный ремонт и эксплуатация на платной основе скоростной автомобильной дороги М-11 «Москва - Санкт-Петербург» на участке км 58 - км 149 (1 и 2 этап). Информационный меморандум. М.: ГК «Автодор», 2014. URL: [http://m11-section1-2.avtodor-invest.com/files2/Information\\_memorandum.pdf](http://m11-section1-2.avtodor-invest.com/files2/Information_memorandum.pdf)
- 90 ОДМ 218.2.061-2015 «Рекомендации по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов» М.: Росавтодор, 2016. 78 с.
- 91 Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- 92 Справочная энциклопедия дорожника. Том 5. Проектирование автомобильных дорог. Под ред. Г.А. Федотова, П.И. Поспелова. М.: Информавтодор, 2007. 1466 с.
- 93 Завьялов М.А., Завьялов А.М. Теплоемкость асфальтобетона. Строительные материалы, 2009, №7, С. 6-10.
- 94 Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. 5-е изд. М.: Наука, 1977. 736 с.
- 95 Справочная энциклопедия дорожника. Том 2. Ремонт и содержание автомобильных дорог. Под ред. А.П. Васильева. М.: Информавтодор, 2004. 1129 с.
- 96 Пат. 2649993 Российская Федерация, МПК E01C 7/32. Армированное асфальтобетонное покрытие / Подшивалов С.Ф и др; заявитель и патентообладатель ФГВКОУВПО "Военная академия материально-технического обеспечения". – № 2017101048; заявл. 11.01.2017; опубл. 06.04.2018, Бюл. № 10 – 8 с.

- 97 Hills J.F., Brien D. The fracture of bitumens and asphalt mixes by temperature induced stresses, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1966, vol. 35, pp. 292-309.
- 98 Pszczoła, M., Judycki, J. Evaluation of Thermal Stresses in Asphalt Layers Incomparison with TSRST Test Results. In: Scarpas, A., Kringos, N., Al-Qadi, I., A., L. (eds) 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, 2012. RILEM Bookseries, vol 4. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4566-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4566-7_5)
- 99 Van der Poel C. A general system describing the visco-elastic properties of bitumens and its relation to routine test data. Journal of Applied Chemistry, 1954, Vol. 4, pp. 221-236.
- 100 ОДМ 218.3.096-2017 «Методические рекомендации по объемному проектированию асфальтобетонных смесей по методологии Маршалла» М.: Росавтодор, 2019. 80 с.
- 101 Петряев А.В. Механическая стабилизация грунтов подспального основания геосинтетическими материалами: дис. доктора технических наук: 2.9.2. - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.dissercat.com/>. Дата обращения: 03.03.2024.
- 102 ОДН 218.046-01. Проектирование нежестких дорожных одежд. М.: ФГБУ Инфрмавтодор, 2001. – 148 с.
- 103 ВСН 46-72. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. – М.: Транспорт, 1973. – 83 с.
- 104 ВСН 46-83. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. – М.: Транспорт, 1985. – 152 с.
- 105 ПНСТ 542-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. – М.: Стандартинформ, 2021. – 151 с.
- 106 ПНСТ 265-2018. Дороги автомобильные общего пользования. Проектирование нежестких дорожных одежд. М.: Стандартинформ, 2018. – 77 с.
- 107 Совершенствование методики расчета нежестких дорожных одежд с учетом применения решения задачи теории упругости для многослойного полупространства / М. Ю. Горский, Г. Ф. Кадыров, А. В. Стрельцов, Е. Н. Симчук // Дороги и мосты. – 2021. – № 2(46). – С. 53-74. – EDN TPWVZF.
- 108 ОДМ 218.5.002-2008. Методические рекомендации по применению полимерных геосеток (георешеток) для усиления слоев дорожной одежды из зернистых материалов // - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://gostassistant.ru/doc/e9c75e3d-3ae9-45ca-bc48-ea1cdca08d79>. Дата обращения: 19.07.2024.
- 109 ОДМ 218.3.1.005-2021. Проектирование нежестких дорожных одежд. Методические рекомендации по расчету параметров напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций при воздействии колесных нагрузок // - [Электронный ресурс]. - Режим доступа:

<https://docs.cntd.ru/document/573741138?ysclid=lz1cipvq4w854287470&section=status>. Дата обращения: 19.07.2024.

110 ГОСТ Р 59918-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Методики оценки прочности// - [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/77243/> Дата обращения: 19.07.2024.

111 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: AVXNA.

112 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). – С....

113 Федеральный закон Российской Федерации от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ "Об обеспечении единства измерений" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.consultant.ru/>. – Дата доступа: 28.02.2024.

114 ГОСТ Р 8.563-2009 "Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики (методы) измерений" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200077909>. – Дата доступа: 28.02.2024.

115 Постановление Правительства Российской Федерации от 31 октября 2009 г. № 879 "Об утверждении Положения о единицах величин, допускаемых к применению в Российской Федерации" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://base.garant.ru/196573/>. – Дата доступа: 28.02.2024.

116 Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработка комплекса проектов национальных стандартов ГОСТ Р, устанавливающих методы испытаний геосинтетических материалов в дорожном хозяйстве» // Контракт № УД 47/47 от 22.04.2011 года / АНО «НИИ ТСК», Москва 2011, 128 с.

117 EN ISO 10319:2008. Geosynthetics — Wide-width tensile test. Brussels: European Committee for Standardization.

118 ОДМ 218.5.006-2010. Рекомендации по проектированию, строительству и контролю качества дорожных одежд из геосинтетических материалов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosavtodor.gov.ru/>. – Дата доступа: 02.03.2024.

119 ГОСТ 28840-90 Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – Режим доступа: <http://www.consultant.ru>. – Дата обращения: 02.03.2024.

120 Еренков О.Ю. Влияние скорости нагружения на прочностные характеристики полимерных материалов [Электронный ресурс] // Научно-технический вестник БГИТА. 2007. Режим доступа: [http://science-bsea.bgita.ru/2007/mashin\\_2007/erenkov\\_vliyanie.htm](http://science-bsea.bgita.ru/2007/mashin_2007/erenkov_vliyanie.htm). - Дата обращения: 02.03.2024.

121 ГОСТ Р 55030-2012 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения прочности при растяжении [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – Режим доступа: <http://www.consultant.ru>. – Дата обращения: 02.03.2024.

122 EN 12224:2000. Geotextiles and geotextile-related products — Determination of the resistance to weathering. [Текст] / European Committee for Standardization. — Brussels: CEN.

123 ГОСТ Р 55031-2012 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения устойчивости к ультрафиолетовому излучению [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – Режим доступа: <http://www.consultant.ru>. – Дата обращения: 02.03.2024.

124 ГОСТ Р 55032-2012 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения устойчивости к многократному замораживанию и оттаиванию [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – Режим доступа: <http://www.consultant.ru>. – Дата обращения: 02.03.2024.

125 DIN EN 495-5:2001. Flexible sheets for waterproofing - Determination of foldability at low temperature - Part 5: Plastic and rubber sheets for roof waterproofing; German version EN 495-5:2000. [Текст] / Deutsches Institut für Normung e.V. — Berlin: DIN.

126 ГОСТ 6943.10-79 Группа И19. Межгосударственный стандарт. Материалы текстильные стеклянные. Метод определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – Режим доступа: <http://www.consultant.ru>. – Дата обращения: 02.03.2024.

127 ГОСТ Р 55033-2012 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения гибкости при низких температурах [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – Режим доступа: <http://www.consultant.ru>. – Дата обращения: 02.03.2024.

128 ГОСТ Р 55034-2012 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для армирования асфальтобетонных дорожных покрытий. Метод определения теплостойкости [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – Режим доступа: <http://www.consultant.ru>. – Дата обращения: 02.03.2024.

- 129 ГОСТ Р 56336-2015 Материалы геосинтетические. Метод определения стойкости к циклическим нагрузкам [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – Режим доступа: <http://www.consultant.ru>. – Дата обращения: 02.03.2024.
- 130 ISO 10722:2007. Geosynthetics — Test methods for the determination of the long-term protection efficiency of geosynthetics in contact with geosynthetic barriers. [Текст] / International Organization for Standardization. — Geneva: ISO.
- 131 ISO 12236:2006. Geosynthetics — Static puncture test (CBR test). [Текст] / International Organization for Standardization. — Geneva: ISO.
- 132 Толковый словарь Ожегова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ozhegov.org/words/27813.shtml>. – Дата обращения: 02.03.2024.
- 133 Инструменты финансового и инвестиционного анализа. Статистические параметры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://investment-analysis.ru/metodFC2/daily-variance-arithmetic-mean-deviation.html>. – Дата обращения: 02.03.2024.
- 134 Яворский В.А. «Планирование научного эксперимента и обработка экспериментальных данных Методические указания к лабораторным работам», Московский физико-технический институт (государственный университет) Факультет молекулярной и биологической физики, 45 с.
- 135 ISO 13433:2006. Geosynthetics — Dynamic perforation test (cone drop test). [Текст] / International Organization for Standardization. — Geneva: ISO.
- 136 EN ISO 13426-1:2003. Geosynthetics — Part 1: Determination of tensile properties using a wide-width strip. [Текст] / European Committee for Standardization; International Organization for Standardization. — Brussels: CEN; Geneva: ISO.
- 137 ASTM D7322-13. Standard Test Method for Determination of Fiber Content in Composite Materials by Loss on Ignition (LOI). [Текст] / ASTM International. — West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.
- 138 ПНСТ 268-2018. Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для борьбы с эрозией на откосах. Общие технические условия [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы "Консорциум Кодекс". – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/>. Дата обращения: 02.03.2024.
- 139 ASTM D7101-07. Standard Test Method for Determination of Fusion Bonded Epoxy Coating Weights on Steel Reinforcing Bars. [Текст] / ASTM International. — West Conshohocken, PA: ASTM International, 2007.
- 140 ГОСТ 22520-85 Группа П14. Межгосударственный стандарт. Датчики давления, разрежения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП.

- Общие технические условия. [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – Режим доступа: <http://www.consultant.ru>. – Дата обращения: 02.03.2024.
- 141 ГОСТ 6019-83. Счетчики холодной воды крыльчатые. Общие технические условия. [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». – Режим доступа: <http://www.consultant.ru>. – Дата обращения: 02.03.2024.
- 142 ГОСТ Р 52608-2006 Материалы геотекстильные. Методы определения водопроницаемости [Текст]. – Введ. 01.01.2008. М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов: 2007. - 15 с.
- 143 ISO 12958:2010 «Geotextiles and geotextile-related products -- Determination of water flow capacity in their plane». International Organization for Standardization
- 144 ГОСТ 33068-2014 «Материалы геосинтетические для дренажных систем. Общие технические требования» [Текст]. – Введ. 2015-07-01. М.: Стандартиформ, 2015. - 35 с.
- 145 ISO 11058:2019 «Geotextiles and geotextile-related products -- Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load» International Organization for Standardization.
- 146 ГОСТ Р ИСО 10776-2014 «Материалы геотекстильные и изделия из них. Определение характеристик водопроницаемости под нагрузкой в направлении, перпендикулярном плоскости образца». [Текст]. – Введ. 2016-01-01. М.: Стандартиформ, 2016. - 13 с.
- 147 ГОСТ Р ИСО 10772-2014 «Материалы геотекстильные. Метод испытаний для определения фильтрационных характеристик в условиях турбулентного потока воды». [Текст]. – Введ. 2016-01-01. М.: Стандартиформ, 2016. - 10 с.
- 148 СТБ 1980-2009 «Полотно нетканое мелиоративное. Технические условия». [Текст]. – Введ. 2009-08-21. Минск: Госстандарт, 2009. - 22 с.
- 149 ГОСТ 25584-2016 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации». [Текст]: [принят Росстандартом 02.11.2016]. – Профессиональная справочная система Техэксперт (кодекс) ([bnd.kodeks.ru](http://bnd.kodeks.ru)).
- 150 ГОСТ Р ИСО 4920-2014 Материалы текстильные. Определение стойкости к поверхностному смачиванию (метод испытания разбрызгиванием). [Текст]. – Введ. 2016-01-01. М.: Стандартиформ, 2016. - 8 с.
- 151 ГОСТ Р 50276-92 (ИСО 9863-90) Материалы геотекстильные. Метод определения толщины при определенных давлениях. [Текст]: [принят Госстандартом России 16.09.1992]. – Профессиональная справочная система Техэксперт (кодекс) ([bnd.kodeks.ru](http://bnd.kodeks.ru)).
- 152 Гусев, К.А. Разработка методики экспериментальной оценки водопроницаемости геотекстильных материалов /А.Н. Девятилов, А.Ю. Баранов, К.А. Гусев, Г.А. Бронз // Известия вузов. Технология легкой промышленности. – 2012. – № 4. – С.7-11,

- 153 Гусев К.А. Особенности проектирования и прогнозирования свойств основовязаных геополотен: Текст диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. - СПб., 2013. -148 с.
- 154 ГОСТ 25584-2016 Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы " Консорциум Кодекс". – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/>. Дата обращения: 02.03.2024.
- 155 ГОСТ 6139-91 (СТ СЭВ 6951-89) Песок стандартный для испытаний цемента. Технические условия [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы " Консорциум Кодекс". – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/>. Дата обращения: 02.03.2024.
- 156 ГОСТ Р 59691-2021 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические. Метод определения водопроницаемости [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы " Консорциум Кодекс". – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/>. Дата обращения: 02.03.2024.
- 157 EN 12697-48:2014. Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 48: Determination of the resistance to de-icing fluids.
- 158 Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработка ПНСТ на методику измерения сцепления слоев асфальтобетонных покрытий» // Государственный контракт № ФДА 47/86 от 20.08.2018 г. // ООО «ЦМИиС», Москва 2019, с. 36.
- 159 ПНСТ 395-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Асфальтобетон дорожный. Метод измерения сцепления слоев [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы " Консорциум Кодекс". – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/>. Дата обращения: 02.03.2024.
- 160 EN 14030:2003. Geotextiles and geotextile-related products - Screening test method for determining the resistance to acid and alkaline liquids. Brussels: European Committee for Standardization, 2003.
- 161 ГОСТ Р 55035-2012 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения устойчивости к агрессивным средам [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы " Консорциум Кодекс". – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/>. Дата обращения: 02.03.2024.
- 162 DIN EN 12225:2000 Geotextiles and geotextile-related products - Method for determining the microbiological resistance by a soil burial test; German version.
- 163 ОДМ 218.2.047-2014. Методические рекомендации по применению нормативных документов при проектировании автомобильных дорог. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/>. – Дата доступа: 02.03.2024.
- 164 Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработка ГОСТ Р «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические. Метод определения

устойчивости геосинтетических материалов к микробиологическому разложению в грунте» // Контракт № ФДА 47/89 от 20.08.2018 / ООО «ИТЦ», Москва 2018, - с.97.

165 ГОСТ Р 58830-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Методика определения устойчивости геосинтетических материалов к микробиологическому воздействию» [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы " Консорциум Кодекс". – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/>. Дата обращения: 02.03.2024.

166 ISO/TS 13434:2008. Geosynthetics — Guidelines for the assessment of durability. [Текст] / International Organization for Standardization.

167 ISO/TR 20432:2007. Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement. [Текст] / International Organization for Standardization.

168 ПНСТ 318-2018 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические. Методы испытаний на долговечность [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы " Консорциум Кодекс". – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/>. Дата обращения: 02.03.2024.

169 ГОСТ Р 70060-2022 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические. Методы испытаний на долговечность [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы " Консорциум Кодекс". – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/>. Дата обращения: 02.03.2024.

170 ГОСТ Р 56337-2015 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические. Метод определения прочности при динамическом продавливании (испытание падающим конусом) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/59001/>. – Дата доступа: 28.05.2024

171 ГОСТ Р 56335-2015 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения прочности при статическом продавливании) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/59074/>. – Дата доступа: 28.05.2024

172 ГОСТ Р 56339-2015 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения ползучести при растяжении и разрыва при ползучести [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/59002/>. – Дата доступа: 28.05.2024

173 Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработка комплекса ПНСТ по исследованию геосинтетических материалов, выполняющих функцию борьбы с эрозией откосов и устанавливающего методики определения водопроницаемости геосинтетических материалов» // контракт № ФДА 47/231 от 10.08.2016 // АНО «НИИ ТСК», Москва 2016.



174 Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработка комплекса ПНСТ, устанавливающих методы определения долговечности и контроль качества геосинтетических материалов, применяемых при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте автомобильных дорог и сооружений на них» // Контракт № ФДА 47/101 от 04.09.2017 // АНО «НИИ ТСК», Москва 2018, с. 128

175 Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработка проекта национального стандарта ГОСТ Р «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для разделения слоев дорожной одежды из минеральных материалов. Технические требования» // Контракт № ФДА 47/270 от 09.12.2013 // АНО «НИИ ТСК», Москва 2013.

176 Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработка проекта национального стандарта ГОСТ Р «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для армирования нижних слоев основания. Технические требования» // Контракт № УД 47/292 от 24 сентября 2012 года // АНО «НИИ ТСК», Москва 2012.

177 ГОСТ 9128-2009 Смеси асфальтобетонные дорожные, аэродромные и асфальтобетон. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/49156/>. – Дата доступа: 28.05.2024

178 ГОСТ 427-75 Линейки измерительные металлические. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/5270/>. – Дата доступа: 28.05.2024

179 ГОСТ 166-89 Штангенциркули. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/28590/>. – Дата доступа: 28.05.2024

180 ПНСТ 179-2016 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения предела прочности на растяжение при изгибе и предельной относительной деформации растяжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.npfselena.ru/wp-content/uploads/2019/08/pnst179\\_2016.pdf](https://www.npfselena.ru/wp-content/uploads/2019/08/pnst179_2016.pdf). – Дата доступа: 28.05.2024

181 ПНСТ 181-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения стойкости к колееобразованию прокатыванием нагруженного колеса [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://matest.ru/uploads/russian-standards/PNST181.pdf>. – Дата доступа: 28.05.2024

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акты внедрения результатов диссертационного исследования



Автономная некоммерческая организация

# «Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса»

111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 73А, стр. 16, эт. 1, каб. 9, [www.niitsk.ru](http://www.niitsk.ru)  
E-mail: [niitsk@niitsk.ru](mailto:niitsk@niitsk.ru)

Тел.: (495) 748-86-12

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор



Е.Н. Симчук

**АКТ**

## **внедрения результатов диссертационного исследования Медведева Дмитрия Викторовича на тему « РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ»**

Научные исследования Медведева Дмитрия Викторовича направлены на совершенствование методологии применения геосинтетических материалов в дорожном строительстве. Диссертационная работа Медведева Дмитрия Викторовича выполнена в рамках научных исследований, проведенных по заданию Федерального дорожного агентства Минтранса РФ в период 2011 – 2023 гг.

В период 2011-2023 гг Медведевым Дмитрием Викторовичем были проведены теоретические и экспериментальные исследования геосинтетических материалов, результаты которых были использованы в АНО «НИИ ТСК» при разработке комплекса документов национальной системы стандартизации:

- ГОСТ Р 56338-2015 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для армирования нижних слоев основания дорожной одежды. Технические требования»,

- ГОСТ Р 56419-2015 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для разделения слоев дорожной одежды из минеральных материалов. Технические требования»,

- ГОСТ Р 55029-2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды. Технические требования»,

- ГОСТ Р 59692-2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для борьбы с эрозией на откосах. Общие технические условия»,

- ГОСТ Р 70060-2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические. Методы испытаний на долговечность»,

- ПНСТ 503-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические. Общие технические условия»,
- ГОСТ Р 55030-2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения прочности при растяжении»,
- ГОСТ Р 55031-2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения устойчивости к ультрафиолетовому излучению»,
- ГОСТ Р 55035-2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения устойчивости к агрессивным средам»,
- ГОСТ Р 56335-2015 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения прочности при статическом продавливании»,
- ГОСТ Р 56339-2015 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения ползучести при растяжении и разрыва при ползучести»,
- ГОСТ Р 55032-2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения устойчивости к многократному замораживанию и оттаиванию»,
- ГОСТ Р 55034-2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды. Метод определения теплостойкости»,
- ГОСТ Р 55033-2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения гибкости при отрицательных температурах»,
- ГОСТ Р 59691-2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические. Метод определения водопроницаемости».

Разработка вышеуказанных документов национальной системы стандартизации выполнена в соответствии со следующими государственными контрактами:

- №УД 47/48 от 22 апреля 2011 года по теме "Разработка проекта национального стандарта ГОСТ Р «Геосинтетические материалы для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды. Технические требования»".
- №УД 47/292 от 24 сентября 2012 года по теме "Разработка проекта национального стандарта ГОСТ Р «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для армирования нижних слоев основания. Технические требования»".
- №ФДА 47/270 от 09.12.2013 по теме "Разработка проекта национального стандарта ГОСТ Р «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы



геосинтетические для разделения слоев дорожной одежды из минеральных материалов. Технические требования»".

- №УД 47/368 от 14 октября 2014 года по теме "Исследование устойчивости геосинтетических материалов к микробиологическому воздействию с последующей разработкой предварительного национального стандарта, устанавливающего метод определения устойчивости к микробиологическому разложению при испытании закапыванием в землю".

- №ФДА 47/231 от 10.08.2016 по теме "Разработка комплекса ПНСТ по исследованию геосинтетических материалов, выполняющих функцию борьбы с эрозией откосов и устанавливающего методику определения водопроницаемости геосинтетических материалов".

- №УД 47/49 от 22.04.2011 года по теме "Разработка проекта национального стандарта ГОСТ Р «Классификация, термины и определения геосинтетических материалов, применяемых в дорожном хозяйстве»".

- №УД 47/47 от 22.04.2011 года по теме "Разработка комплекса проектов национальных стандартов ГОСТ Р, устанавливающих методы испытаний геосинтетических материалов в дорожном хозяйстве".

- № 2/1-2020 от 20 апреля 2020 года по теме «Разработка ГОСТ Р «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические. Метод определения водопроницаемости».

- № 28/1-2020 от 30 ноября 2020 года по теме «Исследование вопросов долговечности геосинтетических материалов на автомобильных дорогах общего пользования с разработкой документа по стандартизации».

- № 4/1-2020 от 20 апреля 2020 года по теме «Разработка ГОСТ Р «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для борьбы с эрозией на откосах. Общие технические условия».

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований Медведева Дмитрия Викторовича, которые были использованы в АНО «НИИ ТСК» при разработке комплекса вышеуказанных документов национальной системы стандартизации:

- результаты теоретических исследований по обоснованию применения геосинтетических материалов в дорожном строительстве, учитывающих их функциональные характеристики и механизмы взаимодействия с конструктивными слоями дорожной одежды;

- результаты комплексных экспериментальных исследований геосинтетических материалов в лабораторных и полевых условиях;

- результаты разработки и обоснования применения методик испытаний геосинтетических материалов;

- усовершенствованные методы оценки долговечности геосинтетических материалов при их эксплуатации в дорожной конструкции;

- оптимальные параметры применения геосинтетических материалов в дорожном строительстве, полученные на основе обработки и анализа экспериментальных данных;

- технические требования к геосинтетическим материалам, учитывающие конкретные условия эксплуатации в дорожном строительстве.

Медведев Д. В. активно участвовал в разработке текстов стандартов, обеспечив их научную обоснованность их содержания и соответствие современным требованиям в области стандартизации и дорожного строительства.

Заместитель генерального директора – Руководитель испытательного центра АНО «НИИ ТСК»

  
К.А. Жанов

Д.В. Медведев

03.07.2024



111024, ул. Авиамоторная, д.73А, стр.16, эт.2, каб.4  
e-mail: [inntehcentr@mail.ru](mailto:inntehcentr@mail.ru)

Тел.: (495) 748-86-28

«Утверждаю»

Генеральный директор

Д.И. Оверин



«04» июня 2024 года

г. Москва.

### АКТ

**внедрения результатов диссертационного исследования  
Медведева Дмитрия Викторовича  
на тему « РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ  
ГЕОСИНТЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ДОРОЖНОМ  
СТРОИТЕЛЬСТВЕ»**

Научные исследования Дмитрия Викторовича Медведева направлены на совершенствование методологии применения геосинтетических материалов в дорожном строительстве. Его диссертационная работа выполнена в рамках научных исследований, проводившихся по заданию Федерального дорожного агентства Минтранса РФ в период 2018–2020 гг.

В течение 2018-2020 гг. Дмитрий Викторович Медведев провел теоретические и экспериментальные исследования геосинтетических материалов для их применения в дорожном строительстве, результаты которых были использованы в ООО «ИТЦ» при разработке комплекса документов национальной системы стандартизации:

- ГОСТ Р 55029-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды. Технические требования»;





111024, ул. Авиамоторная, д.73А, стр.16, эт.2, каб.4  
e-mail: [inntehcentr@mail.ru](mailto:inntehcentr@mail.ru)

Тел.: (495) 748-86-28

- ГОСТ Р 58830-2015 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Методика определения устойчивости геосинтетических материалов к микробиологическому воздействию»;

- ПНСТ 395-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Асфальтобетон дорожный. Метод измерения сцепления слоев».

Разработка вышеуказанных документов национальной системы стандартизации выполнена в соответствии с государственными контрактами:

- № ФДА 47/108 от 04 октября 2018 года по теме «Обновление ГОСТ Р 55029-2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды. Технические требования»;

- № ФДА 47/89 от 20 августа 2018 года по теме «Разработка ГОСТ Р «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические. Метод определения устойчивости геосинтетических материалов к микробиологическому разложению в грунте»;

- № ФДА 47/86 от 20 августа 2018 года по теме «Разработка ПНСТ на методику измерения сцепления слоев асфальтобетонных покрытий».

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований Дмитрия Викторовича Медведева, использованные в ООО «ИТЦ» при разработке комплекса документов национальной системы стандартизации, включают:

- результаты теоретических исследований по обоснованию применения геосинтетических материалов в дорожном строительстве;





111024, ул. Авиамоторная, д.73А, стр.16, эт.2, каб.4  
e-mail: [inntehcentr@mail.ru](mailto:inntehcentr@mail.ru)

Тел.: (495) 748-86-28

- результаты разработки и обоснования применения методик испытаний ГМ;

- результаты анализа экспериментальных данных для определения оптимальных параметров применения геосинтетических материалов.

Медведев Д. В. руководил проведением комплексных экспериментальных исследований геосинтетических материалов в лабораторных и полевых условиях.

Медведев Д. В. активно участвовал в разработке текстов стандартов, обеспечив научную обоснованность их содержания и соответствие современным требованиям.

Генеральный директор

  
Д.И. Оверин

Главный инженер

  
Е.А. Збинский

  
Д.В. Медведев  
« 04 » июля 2024 года

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Подтверждение метрологического обеспечения применяемых средств измерения и  
испытательного оборудования

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО  
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
- ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ,  
МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В Г. МОСКВЕ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ - (ФБУ «РОСТЕСТ-МОСКВА»)



## АТТЕСТАТ

№ АТ 0061497

Дата выдачи: «03» августа 2021 г.

Удостоверяется, что Световая испытательная камера ТСК

наименование и обозначение испытываемого оборудования

заводской номер инв №Н123

данный или идентификационный номер

принадлежащее АНО "НИИ ТСК", ИНН 7721277481

наименование организации (организации), подразделения, центра, ИНН

аттестовано в соответствии с РТ-ПМА-2463-448-2015

наименование документа, по условиям которого выполнена аттестация

по результатам периодической аттестации, протокол № 448-54869-2021-инв  
№Н123 от 03.08.2021 признано пригодным для использования при испытаниях  
по методам, описанным в ГОСТ Р 55031.

наименование и обозначение документа(ов) на методику испытаний (при необходимости)

Периодичность аттестации 12 месяцев

Начальник сектора лаборатории № 448

подпись и должность

О.С. Суворова

(подпись, фамилия)





ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО  
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ,  
МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В Г. МОСКВЕ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ (ФБУ «РОСТЕСТ - МОСКВА»)



## АТТЕСТАТ

№ АТ 0061522

Дата выдачи: «03» августа 2021 г.

Удостоверяется, что Световая испытательная камера ТСК

наименование и обозначение испытательного оборудования

заводской номер инв №Н055

заводской или инвентарный номер

принадлежащее АНО "НИИ ТСК", ИНН 7721277481

наименование предприятия (организации), подразделения, цеха, ИНН

аттестовано в соответствии с РТ-ПМА-2463-448-2015

наименование документа, на основании которого выполнена аттестация

по результатам периодической аттестации, протокол № 448-54869-2021-инв №Н055  
от 03.08.2021 признано пригодным для использования при испытаниях  
по методам, описанным в ГОСТ Р 55031.

наименование и обозначение документа(ов), на основании которого (при необходимости)

Периодичность аттестации 12 месяцев

Начальник сектора лаборатории № 448

наименование должности подразделения

О.С. Суворова

(подпись, фамилия)





ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО  
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦИИ,  
МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ В Г. МОСКВЕ И МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ. (ФБУ «РОСТЕСТ - МОСКВА»)



## АТТЕСТАТ

№ АТ - 0061524

Дата выдачи: «03» августа 2021 г.

Удостоверяется, что Ультрафиолетовая камера НИИ ТСК №2

используется и пригодна для использования в качестве измерительного оборудования

заводской номер инв №Н175

заводской или идентификационный номер

принадлежащее АНО "НИИ ТСК", ИНН 7721277481

аккредитованная продукция (продукция), измерительная техника, ИИИ

аттестовано в соответствии с РТ-ПМА-5407-448-2018

аккредитация (сертификация) на соответствие требованиям стандарта

по результатам периодической аттестации, протокол № 448-54869-2021-инв №Н175  
от 03.08.2021 признано пригодным для использования при испытаниях  
по методам, описанным в ГОСТ Р 55031.

использование и пригодность оборудования (измерительной техники) для аттестации

Периодичность аттестации 12 месяцев

Начальник сектора лаборатории № 448

О.С. Суворова

подпись, фамилия





## Протокол периодической аттестации испытательного оборудования № 16

1. Наименование и адрес организации АНО «НИИ ТСК»  
111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, дом 73а строение 16

### 2. Состав комиссии

Представитель организации Зарифов Р.Р. главный метролог  
ф.и.о. подразделение должность

Представитель организации Медведев Д.В. первый зам. генерального директора  
ф.и.о. подразделение должность

Представитель организации \_\_\_\_\_  
ф.и.о. подразделение должность

### Сведения об испытательном оборудовании

3. Наименование, завод изготовитель, №, год Климатическая камера с контроллером управления  
GT-7005-A7M, «Gerotech» № GT-2009-01494 2010 г.в.

4. Нормированные параметры испытательного оборудования  
Диапазон рабочей температуры, °C: -70 ... 150  
Неравномерность температурного поля в полезном объеме камеры, °C: 2

5. Условия проведения периодической аттестации нормальные

6. Используемые документы МС 300.08-96, паспорт

7. Сведения о применяемых при аттестации СИ  
Термометр ТЦМ-1530, СК № МА 0218127 до 04.2022  
Секундомер СОПр, СИ № МА 0129602 до 03.2022

8. Результаты аттестации

8.1. Результаты внешнего осмотра в норме

8.2. Результаты измерений:

1) Ткамеры = -60°C Термометра = -60,8°C; Ткамеры = -40°C Термометра = -40,33°C ;

2) Ткамеры = -18°C Термометра = -18,22°C; Ткамеры = -30°C Термометра = -30,21°C ;

3) Ткамеры = -20°C Термометра = -20,28°C; Ткамеры = -10°C Термометра = -10,35°C ;

4) Ткамеры = 20°C Термометра = 20,31°C; Ткамеры = 150°C Термометра = 149,81°C ;

9. Выводы комиссии оборудование признано пригодным к эксплуатации

10. Периодичность аттестации 1 год

Председатель комиссии \_\_\_\_\_ Медведев Д.В.

Члены комиссии \_\_\_\_\_ Зарифов Р.Р.

Члены комиссии \_\_\_\_\_



12 января 2022 г.

## Протокол периодической аттестации испытательного оборудования № 77

1. Наименование и адрес организации ООО «ВТИ»  
111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 73А, стр. 16

2. Состав комиссии  
Представитель организации Симчук А.Н. зам. генерального директора

Представитель организации Курганов Е.А. метролог  
ф.и.о. подразделение должность

Представитель организации \_\_\_\_\_  
ф.и.о. подразделение должность

Сведения об испытательном оборудовании

3. Наименование, завод изготовитель, №, год Аппарат циклического нагружения АЦН 20  
№ 1 инв. № ИО-15 2011 г.

4. Нормированные параметры испытательного оборудования.  
Диапазон нагрузки на образец, кПа: 20...500  
Количество циклов нагружения образца: 1...500

5. Условия проведения периодической аттестации нормальные

6. Используемые документы АНФ 2.782.013

7. Сведения о применяемых при аттестации СИ  
Система силовых измерительных, СК № МА 0260951 до 04.2022

8. Результаты аттестации

8.1. Результаты внешнего осмотра в норме

8.2. Результаты измерений:

1) Диапазон нагрузки на образец, кПа: 20...500

2) Количество циклов нагружения образца: 1...500

3) \_\_\_\_\_

9. Выводы комиссии оборудование признано пригодным к эксплуатации

10. Периодичность аттестации 1 год

Председатель комиссии \_\_\_\_\_ Симчук А.Н.

Члены комиссии \_\_\_\_\_ Курганов Е.А.

Члены комиссии \_\_\_\_\_



12 января 2022 г.

## Протокол периодической аттестации испытательного оборудования № 114

1. Наименование и адрес организации АНО «НИИ ТСК»  
111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, дом 73и строение 16

2. Состав комиссии  
Представитель организации Зарифов Р.Р. главный метролог  
ф.и.о. подписанием должность

Представитель организации Медведев Д.В. первый зам. генерального директора  
ф.и.о. подписанием должность

Представитель организации \_\_\_\_\_  
ф.и.о. подписанием должность

### Сведения об испытательном оборудовании

3. Наименование, завод изготовитель, №, год Установка для определения прочности при динамическом приложении 2012 год шв. № Н054

4. Нормированные параметры испытательного оборудования.  
— Высота падения груза, мм : 500±5  
— Масса измерительного конуса, г : 600±5  
— Масса испытательного конуса, г : 1000±5

5. Условия проведения первичной аттестации нормальные

6. Используемые документы МА018-2013

7. Сведения о применяемых при аттестации СИ  
— Весы лабораторные GP4102, СИ № МА 014365 до 03.2022  
— Рулетка РЗУЗД, СК № МА 0165855 до 03.2022

8. Результаты аттестации

8.1. Результаты внешнего осмотра в норме

8.2. Результаты измерений:

1) Высота падения груза, мм : 500

2) Масса измерительного конуса, г : 600

3) Масса испытательного конуса, г : 1000

9. Выводы комиссии оборудование признано пригодным к эксплуатации

10. Периодичность аттестации 1 год

Председатель комиссии \_\_\_\_\_

Члены комиссии \_\_\_\_\_

Члены комиссии \_\_\_\_\_



12 января 2022 г.



## Протокол периодической аттестации испытательного оборудования № 117

1. Наименование и адрес организации АНО «НИИ ТСК»  
111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, дом 73а строение 16

2. Состав комиссии

Представитель организации Зарифов Р.Р. главный метролог  
ф.и.о. подразделение: длительность:

Представитель организации Медведев Д.В. первый зам. генерального директора  
ф.и.о. подразделение: длительность:

Представитель организации \_\_\_\_\_  
ф.и.о. подразделение: длительность:

Сведения об испытательном оборудовании

3. Наименование, завод-изготовитель, №, год Шкаф сульфидный ALFA  
№ 131010/42 2015 год

4. Нормированные параметры испытательного оборудования  
Погрешность поддержания температуры не более, °С : 5,0  
Диапазон задания и поддержания температуры, °С : T<sub>зад</sub> от 0 до ... 200

5. Условия проведения периодической аттестации нормальные

6. Используемые документы МС:300.08-96

7. Сведения о применяемых при аттестации СИ  
Термометр ТЦМ-1520, СК № МА 0218127 до 04.2022  
Секундомер СШар, СП № МА 0129602 до 03.2022

8. Результаты аттестации

8.1. Результаты внешнего осмотра в норме

8.2. Результаты измерений:

1) Температура шкафа, °С : 105 Температура термометра, °С : 106,72

2) Температура шкафа, °С : 160 Температура термометра, °С : 161,91

3) \_\_\_\_\_

9. Выводы комиссии оборудование признаю пригодным к эксплуатации

10. Периодичность аттестации 1 год

Председатель комиссии \_\_\_\_\_ Медведев Д.В.  
Члены комиссии \_\_\_\_\_ Зарифов Р.Р.  
Члены комиссии \_\_\_\_\_

12 января 2022 г.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
"ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ"

ООО "ИТЦ"

111024, г. Москва, ул. Авиамоторная д. 73и строение 16

Реестр № 001232 действителен до 06.2025

**СЕРТИФИКАТ О КАЛИБРОВКЕ № 334**

Наименование, тип, заводской номер	Машина
разрывная РМ-20 цев. № И042	2010 г.

Владелец ООО "ИТЦ"

Место проведения калибровки  
лаборатория заказчика

Основные метрологические характеристики:

1 Диапазон нагружения, Н : 0 ... 100000

2 Цена деления, Н : 1

3 Погрешность измерения, % : не более 1

4 Скорость перемещения триверсы, мм/мин : 5 ... 100

Условия проведения калибровки

Относительная влажность, % : 69; Температура окружающей среды, °C : 22

На основании результатов калибровки (протокол № 334 от 12.01.2022)

Калибровка проведена по методике ЛИФ 2.782.012

Рекомендуемая дата следующей калибровки 01.2022г.

Информация о примененных СК:

Динамометр ДОР-3-100И, СК № МА 0260948 до 04.2022

Калибровщик  Е.А. Курагина

Зам. ген. директор  А.Н. Симух

И Т Ц  
2 К 2  
Г М Ю

12.01.2022 года



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
"ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ"**

**ООО "ИТЦ"**

111724, г. Москва, ул. Авиационная д. 73а отроение 16  
Регистр № 001232 действительно до 06.2025

**СЕРТИФИКАТО КАЛИБРОВКЕ № 335**

Наименование, тип, заводской номер	Машина
статическая СМ-20 № 1	2012 г.

Владелец	ООО "ИТЦ"
----------	-----------

Место проведения калибровки	лаборатория заказчика
-----------------------------	-----------------------

Основные метрологические характеристики:

1 Диапазон нагружения, кН: 0,16 ... 15
2 Диапазон измерения, мм: 0 ... 30
3 Цена деления, мм: 0,1

Условия проведения калибровки	нормальные
-------------------------------	------------

Относительная влажность, %: 69; Температура окружающей среды, °С: 22
На основании результатов калибровки (протокол № 335 от 12.01.2022)

Калибровка проведена по методике	АИФ 2.782.012
----------------------------------	---------------

Рекомендуемая дата следующей калибровки	01.2022г.
---	-----------

Информация о примененных СК:
Динамометр ДОР-3-100Н, СК № МА 0260948 до 04.2022

Штихенциркуль "SHAN", СП № МА 0173717 до 09.2022
--

Калибровщик	Е.А. Курганов
-------------	---------------

Зам. ген. директора	А.Н. Симчук
---------------------	-------------



13.01.2022 года

