

РОСЖЕЛДОР  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Ростовский государственный университет путей сообщения»  
(ФГБОУ ВО РГУПС)

*На правах рукописи*

**Ермолов Яков Михайлович**

**МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ БАЛЛАСТНОЙ ПРИЗМЫ  
ПОЛИМЕРНЫМИ ВЯЖУЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ**

Специальность 05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание  
и проектирование железных дорог

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Явна Виктор Анатольевич

Ростов-на-Дону  
2020

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	6
1 МОДИФИКАЦИЯ БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ .....	18
1.1 Методы модификации свойств балластного слоя .....	18
1.2 Модификация свойств балластного слоя полимерными вяжущими материалами .....	20
1.3 Организация переходных участков .....	21
2 НАЗНАЧЕНИЕ И СПЕЦИФИКАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ .....	24
2.1 Прибор ИСС-1 .....	24
2.2 Прибор ИСС-2 .....	26
2.3 Тарировка приборов ИСС-1 и ИСС-2 .....	27
2.4 Георадар серии «ОКО-М» .....	30
2.5 Прибор ПДУ-МГ4 «Удар» .....	31
2.6 Прибор «Дельта-03» .....	33
2.7 Комплект сит для щебня и формы для геокомпозита .....	35
2.8 Испытательная климатическая камера .....	36
2.9 Верхнеприводная мешалка модели RZR 2020 фирмы Heidolph ...	36
2.10 Сушильный шкаф лабораторный .....	37
2.11 Испытательная машина по ГОСТ 28840-90 .....	38
2.12 Прибор одноосного растяжения ГТ 2.6.1 .....	38
3 УСИЛЕНИЕ ПЛЕЧА БАЛЛАСТНОЙ ПРИЗМЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ДВУХКОМПОНЕНТНЫМИ ПОЛИМЕРНЫМИ ВЯЖУЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ .....	40
3.1 Используемые материалы .....	40
3.1.1 Используемый полимер .....	41

3.1.2	Балластный материал .....	42
3.1.3	Зависимость толщины геокомпозита от расхода вяжущего материала .....	44
3.2	Методы исследований геокомпозита и обсуждение полученных результатов .....	49
3.2.1	Применение метода георадиолокации для определения толщины геокомпозита .....	49
3.2.2	Контроль механических характеристик геокомпозита .....	55
3.2.3	Измерение сопротивлений сдвигу плеча балластной призмы .....	57
3.2.4	Измерение смещения шпалы под действием сдвигающей боковой силы .....	61
3.2.5	Зависимость смещение шпалы от величины сдвигающей боковой силы .....	62
3.2.6	Проверка ремонтпригодности укрепленного балластного слоя ..	65
3.3	Выводы .....	66
4	ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЯЖУЩЕГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ .....	68
4.1	Используемое оборудование .....	69
4.2	Опытная проверка технического решения по устройству переходного участка железнодорожного пути на основе полимерного вяжущего материала .....	70
4.3	Контроль сплошности и глубины омоноличивания балластного материала методом георадиолокации .....	74
4.4	Изучение механических свойств омоноличенного балластного материала .....	79
4.5	Оценка динамического воздействия подвижного состава на железнодорожный путь .....	80
4.6	Выводы .....	82

5	ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНА .....	83
5.1	Изготовление экспериментальных образцов геокомпозита с использованием модифицированного полиуретанового вяжущего материала для конструкции верхнего строения железнодорожного пути .....	83
5.1.1	Назначение и спецификация оборудования для изготовления экспериментальных образцов .....	85
5.1.2	Технологический процесс и схема изготовления экспериментальных образцов .....	85
5.2	Аппаратура для исследовательских испытаний экспериментальных образцов геокомпозита с использованием модифицированного полиуретанового вяжущего материала для конструкции балластного слоя железнодорожного пути .....	92
5.3	Результаты исследовательских испытаний .....	95
5.3.1	Прочность при изгибе .....	95
5.3.2	Снижение прочности при изгибе после воздействий внешних факторов .....	97
5.3.3	Максимальная сила при разрыве (адгезионная прочность) .....	101
5.4	Выводы .....	104
6	КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕЧА БАЛЛАСТНОЙ ПРИЗМЫ, ЗАКРЕПЛЕННОЙ ПОЛИМЕРНЫМ ВЯЖУЩИМ МАТЕРИАЛОМ .....	106
6.1	Описание компьютерной модели и ее верификация .....	106
6.2	Исследование влияния длины модели геокомпозита на расчетную величину смещения .....	112
6.3	Исследование влияния модуля деформации геокомпозита на расчетную величину смещения .....	114
6.4	Выводы .....	119

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....	149
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	162
ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....	165

## ВВЕДЕНИЕ

Прочностные и диссипативные свойства балластного материала, а также состояние балластного слоя существенно влияют на ровность и стабильность рельсовой колеи, обеспечивают устойчивость верхнего строения железнодорожного пути в горизонтальном и вертикальном направлениях под воздействием динамических поездных нагрузок, определяют срок жизненного цикла элементов верхнего строения (рельсов, промежуточных рельсовых скреплений, шпал и пр.) и участвуют в формировании оптимальной упругости подшпального основания.

Увеличение скоростей движения подвижного состава предъявляет повышенные требования к железнодорожному балласту по износостойкости, прочностным и одновременно упругим характеристикам. Для обеспечения требуемых показателей балластного слоя применяют различные технические решения, одним из которых является закрепление балластного материала полимерными связующими.

Основное преимущество указанной технологии заключается в повышении прочности балластного слоя без снижения дренирующих свойств балластного материала. Как показывает зарубежный опыт эксплуатации железных дорог, полимерное закрепление балластного слоя целесообразно по следующим причинам:

- 1) уменьшается разрушение частиц балласта;
- 2) снижается возможность проникновения загрязнителей и засорителей как с внешней стороны (поверхностная инфильтрация материалов и веществ, рассыпаемых в том числе от подвижного состава), так и с внутренней (подбалластная инфильтрация от грунта земляного полотна);
- 3) заполняются пустоты, способствуя улучшению контакта между частицами балласта и, как следствие, улучшая механические свойства балластного слоя;
- 4) стабилизируется состояние балластного слоя под нагрузкой.

Кроме того, полимерное закрепление позволяет оптимизировать жесткость железнодорожного пути, что имеет большое значение в решении проблемы организации переходных участков на подходах к искусственным сооружениям. Применение данной технологии позволяет равномернее распределить механические нагрузки на земляное полотно и тем самым противодействовать образованию деформаций. Этот механизм, а также прямое формирование укрепленного основания земляного полотна за счет применения наномодифицированных полимеров позволяют решать задачу создания безусадочного земляного полотна.

Несмотря на бесспорные достоинства полиуретановых полимеров, включающие высокую прочность и твердость в сочетании с эластичностью, высокое сопротивление истиранию и адгезию, они также имеют ряд недостатков. К основным недостаткам применительно к проблеме стабилизации балластного слоя железнодорожного пути следует отнести накопление остаточных деформаций при воздействии подвижного состава, а также выраженную зависимость прочностных характеристик от изменения температурного режима. Поэтому разработка наноуполнителей, в частности модифицированных феллосиликатов, повышающих термостойкость и прочность этих полимеров при сохранении (или незначительном ухудшении) эластичности, является актуальной прикладной научной задачей в области развития современного рельсового транспорта.

### **Обоснование выбора научной специальности**

Цель данной диссертационной работы заключается в разработке технологии и методов закрепления плеча балластной призмы в кривых малого радиуса и организации участков переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям методом омоноличивания балластного слоя двухкомпонентным вяжущим на основе полиуретана (далее по тексту – методом омоноличивания).

Достижение поставленной цели реализуется **решением следующих научных задач:**

1. Разработка технологии полимерного закрепления плеча балластной призмы в кривых малого радиуса для повышения поперечной устойчивости рельсошпальной решетки и балластного основания на подходах к искусственным сооружениям на действующих участках железных дорог.

2. Создание технологий определения свойств омоноличенного балласта и изучение физико-механических параметров конструкции балластной призмы с закрепленным плечом.

3. Создание компьютерной модели и выполнение компьютерного моделирования свойств балластной призмы с закрепленным плечом для обоснования параметров конструкции в кривых малого радиуса.

4. Разработка технологических решений при проектировании и строительстве участков переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям омоноличиванием балластного слоя.

5. Разработка метода улучшения свойств двухкомпонентных вяжущих материалов на основе полиуретана, применяемых для закрепления плеча балластной призмы в кривых малого радиуса и омоноличивания балласта на подходах к искусственным сооружениям.

Исследования, выполненные в диссертационной работе, относятся к проблеме проектирования, изготовления, устройства, а также совершенствования железнодорожного пути, приведенной в формуле специальности 05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог.

Ниже приводится соответствие решенных в диссертационной работе научных задач областям исследований, относящимся к этой специальности. Области исследования специальности 05.22.06 приняты в соответствии с информацией, опубликованной на официальном сайте ВАК Минобрнауки РФ.

Разработка технологии полимерного закрепления плеча балластной призмы в кривых малого радиуса для повышения поперечной устойчивости рельсошпальной решетки и балластного основания на подходах к искусственным сооружениям на действующих участках железных дорог соответствует области

исследований «Конструкции верхнего и нижнего строения железнодорожного пути. Основные параметры, направления развития, проектирование, изготовление. Технология производства и организация работ».

Создание георадиолокационной технологии определения толщины сформированного геокомпозита и разработка методов модификации упругих свойств верхнего строения железнодорожного пути на переходных участках соответствуют области исследований «Технология производства и организации работ. Мониторинг состояния пути. Аппаратура и системы контроля».

Разработка методов модификации упругих свойств верхнего строения железнодорожного пути на переходных участках соответствует области исследований «Технология производства и организации работ. Мониторинг состояния пути. Аппаратура и системы контроля».

Разработка методов улучшения свойств двухкомпонентных вяжущих материалов на основе полиуретана соответствует области исследований «Исследования в области обеспечения безопасности движения поездов. Эксплуатационная надежность железнодорожного пути».

Создание компьютерных моделей и компьютерное моделирование свойств элементов балластной призмы, укрепленных современным полимерным вяжущим материалом, соответствуют области исследований «Методы исследования, испытаний и моделирования железнодорожного пути и процессов его взаимодействия с подвижным составом».

### **Актуальность темы исследования**

Проблема поперечной устойчивости железнодорожного пути и модификация упругих свойств переходных участков железнодорожного пути являются актуальными научными задачами, решение которых достигается разработками ученых разных стран.

Среди отечественных исследователей над проблемами повышения устойчивости железнодорожного пути, совершенствования методов измерения параметров устойчивости и модификации упругих свойств железнодорожного пути

на переходных участках работали Г.М. Шахунянц, А.Ю. Абдурашитов, Г.Л. Аккерман, Е.С. Ашпиз, Л.С. Блажко, В.В. Виноградов, Э.М. Добров, А.А. Дорошкевич, П.И. Дыдышко, А.В. Замуховский, А.Л. Исаков, В.Д. Казарновский, А.Я. Коган, А.Ф. Колос, Г.Г. Коншин, М.Я. Крицкий, А.Л. Ланис, С.Я. Луцкий, В.И. Новакович, В.О. Певзнер, И.В. Прокудин, Ю.С. Ромен, А.В. Савин, Г.М. Стоянович, Т.В. Суворова, О.А. Суслов, В.П. Сычев, Ю.К. Фроловский, В.А. Явна.

В числе зарубежных исследователей, работающих над перечисленными проблемами в последние годы, можно отметить таких, как М. Эсмаейли, Б. Индратна, Л. Ле Пен, П.К. Вудворд, А. Кин, Дж. Кеннеди.

В трудах этих ученых:

- разработаны критерии определения показателей надежности и уровня риска элементов железнодорожного пути [1–5];

- при нагрузочных испытаниях разработаны подходы к обоснованию нормативных значений упругих деформаций подрельсового и подшпального оснований для различных условий эксплуатации пути [6];

- проведен анализ причин осадки длительно эксплуатируемых насыпей на многолетнемерзлых грунтах [7];

- выполнены исследования по оценке влияния геометрии пути по параметру «ширина рельсовой колеи» и влияния параметров неподрессоренных частей подвижного состава на боковые силы [8];

- рассмотрены вопросы устойчивости при приложении повышенных нагрузок от подвижного состава [9–22];

- разработаны новые конструктивные решения для железнодорожного пути [23–37];

- разработаны методы моделирования и расчетов устойчивости пути, включая бесстыковой, при воздействии подвижного состава [38–47];

- исследованы вопросы организации и эксплуатации переходных участков на подходе к искусственным сооружениям (ИССО) [48–53];

– рассмотрены подходы к модификации свойств конструкционных слоев железных дорог и применению новых материалов [54–58];

– разработаны геофизические и аппаратные методы диагностики железнодорожного пути [59–64].

Ежегодно по проблеме поперечной устойчивости железнодорожного пути, только согласно данным библиографической и реферативной базы данных «Скопус», публикуется примерно 20 научных работ, количество которых определено, по ключевым словам, «lateral», «stability» и «railway». Количество публикаций, посвященных этому вопросу, практически не снижается (рисунок 1), что свидетельствует о постоянном научном интересе к указанной теме исследований.

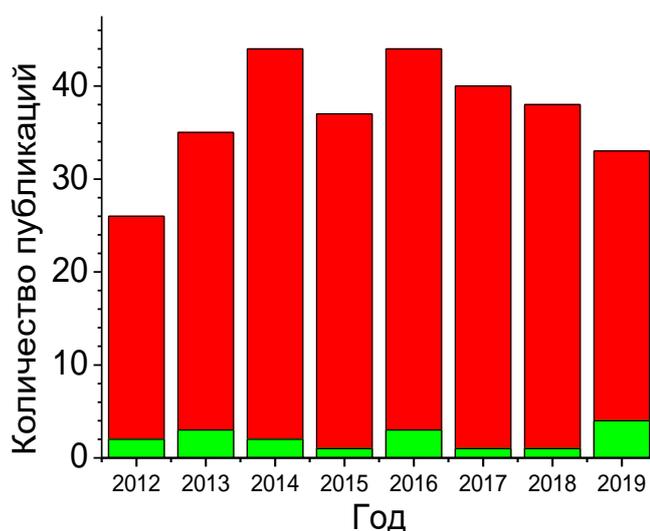


Рисунок 1 – Количество публикаций (по данным сайта «Скопус»), посвященных теме исследования

На рисунке 1 зеленым цветом выделены работы, где задачи поперечной стабилизации пути решаются применением полимерных вяжущих материалов, количество которых определено, по ключевым словам, «stability railway polyurethane».

В соответствии с нормами, указанными в [116], на сети железных дорог омоноличивание балластного слоя композиционными материалами можно применять при решении трех следующих задач.

1. Повышение скорости движения пассажирских поездов приводит к повышению скорости воздушного потока, воздействующего на щебень балластной призмы. В результате этого щебень верхних слоев балластной призмы может уноситься воздушным потоком и, взаимодействуя с подвижным составом, разрушать его узлы. Для противодействия этому явлению допускается использовать укрепление балластной призмы связующими полимерными материалами на участках железнодорожного пути со скоростным и высокоскоростным движением. При этом работы по закреплению балластного материала необходимо проводить по всей ширине балластной призмы.

2. Непогашенное ускорение на криволинейных участках приводит к возникновению дополнительных динамических нагрузок на верхнее строение пути. Для увеличения сопротивления сдвигу в поперечном направлении и повышения общей устойчивости верхнего строения пути на криволинейных участках радиусом менее 350 м допускается укрепление плеча и частично откосной зоны балластной призмы со стороны наружной рельсовой нити.

3. Глубокая вырезка балласта (на глубину более 0,45 м) по одному из путей на двухпутном перегоне должна сопровождаться удержанием балласта в междупутном пространстве для обеспечения безопасного пропуска поездов по второму пути. Одно из современных решений этой задачи связано с омоноличиванием балластной призмы в междупутье и организацией геокомпозитного слоя по поверхности вырезки, не допускающего обрушения балластной призмы в зону проведения работ.

В данной работе выполнены экспериментальные и теоретические исследования, позволяющие решить задачи, приведенные ниже.

1. Для проектирования размеров геокомпозитной балки, устраиваемой со стороны наружной рельсовой нити и обеспечивающей необходимое повышение сопротивления поперечному сдвигу, выполнено измерение величины статического

поперечного сопротивления сдвигу балластного слоя при применении вяжущего материала с известными характеристиками.

2. Разработана георадиолокационная технология определения толщины сформированного геокомпозита.

3. Изучены возможности организации участков переменной жесткости на границе балластного пути и искусственных сооружений за счет изменения толщины геокомпозита, формируемого при применении вяжущего материала с известными характеристиками.

4. Разработаны новые вяжущие материалы для формирования геокомпозита с улучшенными механическими характеристиками.

5. Изучены возможности стабилизации верхнего строения пути при применении новых материалов методом математического моделирования.

### **Выбор объектов исследования**

В качестве объектов исследования эффективности технологии увеличения поперечной устойчивости рельсошпальной решетки в кривых малого радиуса методом полимерного закрепления плеча балластной призмы выбраны 9 участков на Северо-Кавказской железной дороге (общей протяженностью 177,7 м) и 11 участков на Забайкальской железной дороге (общей протяженностью 3850,0 м).

В качестве объекта исследования возможности модификации упругих свойств железнодорожного пути методом полимерного закрепления балласта при организации участков переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям выбран предмостовой участок железнодорожного пути на 1950-м км ПК7 перегона Лоо – Дагомыс Северо-Кавказской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», протяженностью 36 м.

В лабораторных условиях исследованы возможности улучшения механических свойств геокомпозита, применяемого при решении первых двух задач, методом модификации свойств использованного вяжущего материала при добавлении в полиуретан функциональных добавок на основе монтмориллонита.

Результаты лабораторных исследований механических свойств геокомпозита позволили исследовать методами компьютерного моделирования свойства элементов балластной призмы, укрепленных современным полимерным вяжущим материалом.

### **Научная и практическая ценность результатов исследования**

В международной практике полимерные вяжущие материалы применяются, как правило, для решения проблем поперечной устойчивости рельсошпальной решетки на искусственных сооружениях и станциях. Значительно реже закрепление балласта вяжущими материалами проводится для организации участков переменной жесткости либо повышения поперечной устойчивости рельсошпальной решетки действующего железнодорожного пути.

Настоящее исследование посвящено разработке технологии и научному сопровождению работ по повышению поперечной устойчивости рельсошпальной решетки в кривых малого радиуса и организации участков переменной жесткости на действующих участках железных дорог.

При решении первой научной задачи изучено влияние колебаний температуры окружающей среды на прочностные свойства формируемого геокомпозита, что позволило обосновать возможность проведения работ при кратковременных отрицательных температурах воздуха на действующих участках железных дорог.

Исследования, направленные на повышение поперечной устойчивости рельсошпальной решетки в кривых малого радиуса методом закрепления плеча балластной призмы, позволили обосновать оптимальные размерные параметры геокомпозита и расход вяжущего материала экспериментальными (вторая научная задача) и теоретическими (третья научная задача) методами.

Создание компьютерной модели балластной призмы с закрепленным плечом и выполнение соответствующих расчетов позволили определить зависимость силы сопротивления от поперечного сдвига шпалы и обосновать расход вяжущего

материала в зависимости от требуемых свойств конструкции теоретическими методами.

Исследования свойств омоноличенных участков пути на подходе к искусственным сооружениям позволили связать упругие свойства конструкции балластной призмы с толщиной закрепленного балласта и расходом вяжущего материала. Эти результаты могут обосновывать выбор длины переходного участка по заданному при проектировании допустимому линейному изменению упругости подшпального основания.

Показана ремонтпригодность балластной призмы машинами тяжелого типа после ее омоноличивания двухкомпонентными вяжущими на основе полиуретана.

**Научная новизна выполненных исследований** заключается в следующем.

Впервые:

- измерены и рассчитаны величины сил сопротивления поперечному сдвигу шпалы, возникающих в конструкции балластной призмы с плечом, закрепленным на всю толщину балластного слоя;

- разработаны георадиолокационный метод определения положения малоконтрастной нижней границы сформированного геокомпозита и технология тарирования георадиолокационной аппаратуры на определение исполненного расхода полимерного вяжущего материала и достигнутого модуля упругости геокомпозита;

- экспериментально определены модули упругости балластной призмы в зависимости от глубины закрепления щебня связующим материалом;

- для улучшения свойств полимерных вяжущих материалов на основе полиуретана, применяемых для закрепления плеча балластной призмы, использованы функциональные наноматериалы на основе органомодифицированного монтмориллонита, которые позволяют увеличить прочность экспериментальных образцов при изгибе на 33 % и адгезионную прочность на 22%, а также способствуют повышению устойчивости к внешним воздействиям.

## **Достоверность полученных результатов**

Достоверность результатов лабораторных и натурных измерений базируется на использовании регулярно поверяемого оборудования лаборатории «Испытания и мониторинг в гражданском и транспортном строительстве», входящей в состав объединенного научно-исследовательского и испытательного центра научно-исследовательской части ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (аттестат № RA.RU.213C69 от 29.01.2016).

Достоверность выводов о повышении поперечной устойчивости рельсошпальной решетки при полимерном закреплении плеча балластной призмы в кривых малого радиуса определяется результатами натурных измерений.

Достоверность выводов о модификации упругих свойств балластной призмы при полимерном закреплении на переходных участках подтверждается геофизическими и штамповыми измерениями.

Достоверность выводов об эффективности методов улучшения свойств двухкомпонентных вяжущих материалов на основе полиуретана, применяемых для решения первой и третьей задач, подтверждается результатами прямых лабораторных испытаний.

Достоверность теоретических результатов, полученных методами конечных элементов для компьютерных моделей балластной призмы и ее элементов, определяется применением апробированной лицензированной компьютерной программы COMSOL Multiphysics, версии 4.2a, и сходимостью результатов расчета с результатами экспериментальных измерений.

## **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Конструкция балластной призмы с плечом, закрепленным на всю толщину балласта двухкомпонентным связующим на основе полиуретана, при поперечном сдвиге рельсошпальной решетки на 20 мм повышает силу сопротивления сдвигу до 40 кН.

2. Способ определения толщины омоноличенного балластного слоя на протяженных участках железнодорожного пути, основанный на

георадиолокационном измерении положения контрастной границы подбалластного основания.

3. Модуль упругости балластной призмы, омоноличенной на всю толщину щебеночного балласта, возрастает до 4 раз. Достигаемая величина модуля упругости зависит от свойств балластного и вяжущего материалов и должна учитываться при проектировании и строительстве участков переменной жесткости с использованием технологии омоноличивания.

4. Добавки на основе монтмориллонита, модифицированного дидецилдиметиламмония хлоридом, в полиуретановые двухкомпонентные вяжущие в количестве 5 % по массе обеспечивают увеличение прочности и адгезионной способности геокомпозита более чем на 20 %.

5. Закрепленное плечо балластной призмы в расчетной модели длиной 24 м проявляет упругие свойства, прогибаясь до 5 мм при приложении в центральном сечении поперечной горизонтальной силы, действующей со стороны шпалы. Значение указанного прогиба соответствует приложению силы, равной 15 кН, и ее дальнейший рост приводит к проявлению пластических свойств закрепленного плеча балластной призмы.

**Апробация результатов работы** проведена автором на всероссийских и международных конференциях, семинарах, выставках: «Construction and Maintenance of Railway Infrastructure in Complex Environment» (Пекин, Китай, 2014); Международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» (Москва, 2015); 11-й научно-практической конференции и выставке «Инженерная геофизика 2015» (Геленджик, 2015); Международной научно-практической конференции «Транспорт-2015» (Ростов-на-Дону, 2015); 12-й научно-практической конференции и выставке «Инженерная геофизика 2016» (Анапа, 2016); Международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» (Москва, 2016); 13-й научно-практической конференции и выставке «Инженерная геофизика 2017» (Кисловодск, 2017).

# 1 МОДИФИКАЦИЯ БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

## 1.1 Методы модификации свойств балластного слоя

Балластный слой преимущественно из щебня гранитных пород кубовидной формы реализует устойчивость верхнего строения железнодорожного пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях при динамическом воздействии поездов и изменениях температурного режима. Прочностные и диссипативные свойства балластного материала, а также состояние балластного слоя существенно влияют на ровность и стабильность рельсовой колеи.

Увеличение скоростей движения подвижного состава предъявляет повышенные требования к прочностным характеристикам щебня и упругим характеристикам балластной призмы. Для обеспечения требуемых показателей применяют различные технические решения, одним из которых является полимерное закрепление. Исследования, опубликованные в [65], выполнены при изучении параметров железнодорожного пути, усиленного геосинтетическими материалами. В работе [66] изучено улучшение свойств высокоскоростных балластных дорог при применении битумного подбалластного слоя, а в работе [67] выполнен ряд экспериментов по влиянию климатических факторов на свойства оснований из битумных эмульсий.

В последние годы все более активно развиваются и совершенствуются методы повышения поперечной устойчивости железнодорожного пути [68]. Это связано с расширением полигона укладки бесстыкового пути, а также с увеличением скорости, осевых нагрузок и погонной массы поездов, что приводит к проявлению дополнительных сжимающих напряжений в плетях бесстыкового пути. Изменение очертаний балластной призмы (ширина плеча, толщина балласта) является эффективным, но не достаточным способом увеличения бокового сопротивления [69–70]. По результатам исследований, описанных в [69],

установлено, что устойчивость ненагруженной шпалы к ее смещению в поперечном направлении может составлять от 15 до 50 %.

Кроме того, вид балластного материала (щебень гранитных пород и из песчаников, известняк, шлак и пр.), а также его форма оказывают значительное влияние на поперечную устойчивость рельсошпальной решетки. В публикации [70] установлено, что значения бокового сопротивления шпалы на балласте из стального шлакового материала на 27 % больше, чем у рельсошпальной решетки с балластом из известняка.

Увеличения сцепления шпал и балластного материала возможно достичь за счет применения шпал нестандартной формы. В [71] для решения такой задачи рассматриваются результаты работы шпалы с измененным профилем основания. Увеличение эпюры укладки шпал для повышения поперечной устойчивости рельсошпальной решетки повлияло на разработку и внедрение шпал Y-образной формы постели [72] и шпал с дополнительными горизонтальными и вертикальными фрикционными элементами [73]. В результате исследований установлено, что применение шпал Y-образной формы обеспечивает увеличение сопротивления боковому смещению около 2,5 раза. Применение дополнительных горизонтальных и вертикальных фрикционных элементов уменьшает боковые смещения рельсошпальной решетки на 53 %.

Сопротивление сдвигу балластной призмы в продольном и поперечном направлениях частично повышается укладкой в уровне основной площадки плоских и объемных георешеток. Работа [74] посвящена исследованию влияния формы георешеток на усилие сдвига балласта. В работе установлено, что балластный слой, армированный георешеткой GG3, имеет усилие сдвига в 1,4–1,8 раза выше по сравнению с неармированным балластом.

Альтернативным техническим решением, повышающим стабильность верхнего строения пути, является увеличение связи балластного слоя с земляным полотном, что достигается применением металлических нагелей в конструкции «nailed sleeper» [75]. Указанное техническое решение позволяет увеличить

поперечное сопротивление сдвигу до 200 % по сравнению с обычными шпалами В70.

## **1.2 Модификация свойств балластного слоя полимерными вяжущими материалами**

Полимерные вяжущие материалы находят все более широкое применение в качестве метода усиления железнодорожного пути. Так, например, эти материалы применяются в качестве покрытий основной площадки, а также укладываются в основание земляного полотна и используются для изготовления деталей верхнего строения пути [76–80].

Результаты исследований по применению органических и неорганических вяжущих материалов для закрепления балластного слоя опубликованы в работах [81–82]. Полимерные вяжущие материалы при закреплении балластной призмы снижают истираемость и разрушение балластного материала и повышают ее прочностные свойства [83]. Одно из преимуществ технологии полимерного закрепления заключается в повышении прочности балластной призмы без ухудшения ее дренирующих свойств [84].

В настоящее время вяжущие материалы на основе полимеров повсеместно используются и в транспортном строительстве [85, 86, 87]. Технологиями закрепления балластной призмы с применением полимеров предусматривается нанесение механизированным способом или вручную вяжущих материалов, которые, проникая в балластный слой, образуют прочную и достаточно упругую композитную балку [84, 88–89].

Наиболее распространенными вяжущими для повышения прочности балласта являются полимеры на основе полиуретановых систем [84, 88–89].

Согласно упомянутому ранее нормативному документу «Общие технические условия применения технологии омоноличивания балластной призмы вяжущими материалами» [125], композиционные материалы с 2013 года на сети железных дорог России применяются для:

- закрепления плеча и частично откосной зоны балластной призмы в кривых малого радиуса для увеличения сопротивления сдвигу рельсошпальной решетки бесстыкового пути в поперечном направлении;
- исключения подъема щебня воздушным потоком при движении скоростных и высокоскоростных поездов;
- в качестве опалубочного слоя при глубокой вырезке балласта на глубину более 0,45 м.

### **1.3 Организация переходных участков**

В соответствии с требованиями нормативной документации [90, 91] искусственные сооружения (мосты, тоннели, трубы и др.) на весь период эксплуатации должны удовлетворять требованиям безопасного и бесперебойного пропуска поездов с установленной скоростью, а также требованиям охраны труда и охраны окружающей среды. Отказы в работе искусственных сооружений первого уровня ответственности приводят к тяжелым экономическим, социальным и экологическим последствиям [91].

Вместе с тем отказы пути как на искусственных сооружениях (ИССО), так и на подходах к ним могут существенно влиять на безопасность движения поездов [92]. Такое состояние вопроса связано с различной жесткостью пути на подходе к ИССО и непосредственно на них. Модуль упругости пути в случае безбалластной конструкции может быть в 15–20 раз выше, чем у конструкции балластного типа [92]. В результате в зоне примыкания к ИССО происходит интенсивное накопление остаточных деформаций грунтов рабочей зоны земляного полотна, износ балласта и рельсошпальной решетки, нарушение геометрических параметров рельсовой колеи, дефекты рельсов и пр. Увеличение скорости движения на таких участках приведет к росту динамического воздействия на путь и его разрушению.

Решение данной проблемы состоит в устройстве либо переустройстве переходных участков пути с переменной жесткостью [93–94].

Укладка участков железнодорожного пути переменной жесткости при сопряжении с безбалластными конструкциями пути регламентирована СП 119.13330.2012 «Железные дороги колеи 1520 мм. Актуализированная редакция СНиП 32-01-95» [95]. Для типовых конструкций безбалластного верхнего строения пути существуют технические решения сопряжения таких участков с верхним строением пути с ездой на балласте [92, 96]. В случае сопряжения традиционного пути с безбалластной конструкцией *LVT* конструкция неравножесткого переходного участка должна быть выполнена с учетом специфики работы конструкции *LVT* [97]. На серьезность проблемы укладки переходных участков с переменной жесткостью указывают исследования ученых многих странах [98].

Необходимость укладки участков с переменной жесткостью на подходах к искусственным сооружениям регламентирована СП 238.1326000.2015 [99].

Выполненный обзор литературы позволил в качестве основных задач исследования сформулировать разработку технологии и методов закрепления плеча балластной призмы в кривых малого радиуса, и организации участков переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям методом омоноличивания балластного слоя двухкомпонентным вяжущими на основе полиуретана.

Достижение поставленной цели связано с решением основных задач исследования:

1. Разработка технологии полимерного закрепления плеча балластной призмы в кривых малого радиуса для повышения поперечной устойчивости рельсошпальной решетки и балластного основания на подходах к искусственным сооружениям на действующих участках железных дорог.

2. Создание технологий определения свойств омоноличенного балласта и изучение физико-механических параметров конструкции балластной призмы с закрепленным плечом.

3. Создание компьютерной модели и выполнение компьютерного моделирования свойств балластной призмы с закрепленным плечом для обоснования параметров конструкции в кривых малого радиуса.

4. Разработка технологических решений при проектировании и строительстве участков переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям омоноличиванием балластного слоя.

5. Разработка метода улучшения свойств двухкомпонентных вяжущих материалов на основе полиуретана, применяемых для закрепления плеча балластной призмы в кривых малого радиуса и омоноличивания балласта на подходах к искусственным сооружениям.

## 2 НАЗНАЧЕНИЕ И СПЕЦИФИКАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

При решении научных задач «Разработка методов полимерного закрепления плеча балластной призмы в кривых малого радиуса для повышения поперечной устойчивости рельсошпальной решетки» и «Разработка методов модификации упругих свойств верхнего строения железнодорожного пути на переходных участках» использовалось оборудование, рассмотренное в пунктах 2.1–2.6.

Решение задачи «Разработка методов улучшения свойств двухкомпонентных вяжущих материалов на основе полиуретана, применяемых для решения первой и второй задач» выполнено с применением оборудования, рассмотренного в пунктах 2.7–2.12.

### 2.1 Прибор ИСС-1

Прибор ИСС-1 предназначен для измерения усилия сдвига плеча балластной призмы (рисунок 2.1). Он состоит из металлической пластины, имитирующей торец шпалы, гидроцилиндра, манометра, индикатора часового типа и патрона, имеющего фрезеровочный паз. В ходе измерений металлическая пластина жестко соединена с корпусом гидроцилиндра.

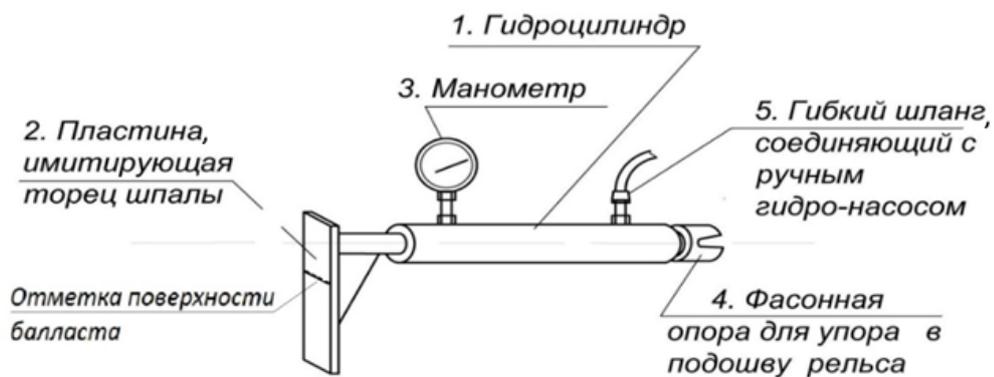


Рисунок 2.1 – Общий вид прибора ИСС-1

На неподвижной части гидроцилиндра устанавливается индекса́тор часового типа для регистрации перемещения в горизонтальной плоскости. Подвижный шток гидроцилиндра (через специальный патрон) опирается на рельс как неподвижную опору. Специальный патрон имеет фрезерованный паз, обхватывающий подошву рельса. Фрезерованный паз выполнен с учетом подуклонки рельса. Он ограничивает перемещение (наклон) прибора в вертикальной плоскости и обеспечивает направление усилия сдвига параллельно плоскости подошвы шпал (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Измерения усилия сдвига плеча балластной призмы с помощью прибора ИСС-1

Измерения усилия на незакрепленном плече балластной призмы проводятся в точках до и после участка, закрепленного двухкомпонентным вяжущим материалом.

Для соблюдения равных условий нагружения по всем точкам измерения нагрузка на пластину производится в два этапа:

– на первом этапе нагрузка плавно повышается до 50 bar (с целью выбрать все «зазоры» между щебнем и упорной пластиной), и это положение фиксируется как «ноль» на шкале перемещения штока гидроцилиндра;

– на втором этапе давление плавно увеличивается и фиксируется при сдвиге пластины на 15 мм от зафиксированного «нулевого» положения.

Измерения усилия сопротивления с использованием пластины проводятся в трех точках по каждому из восьми участков укрепленного плеча, отличающемуся условием закрепления.

## 2.2 Прибор ИСС-2

Прибор ИСС-2 используется для измерения усилия при сдвиге шпалы и определения вклада в его величину плеча балластной призмы (рисунок 2.3).

Прибор состоит из направляющей рамы, жестко фиксируемой за подошву рельса двумя винтами, подвижной каретки, закрепляемой на шпале с помощью закладного болта и гидравлического оборудования, применяемого при определении усилия сдвига плеча балластной призмы.

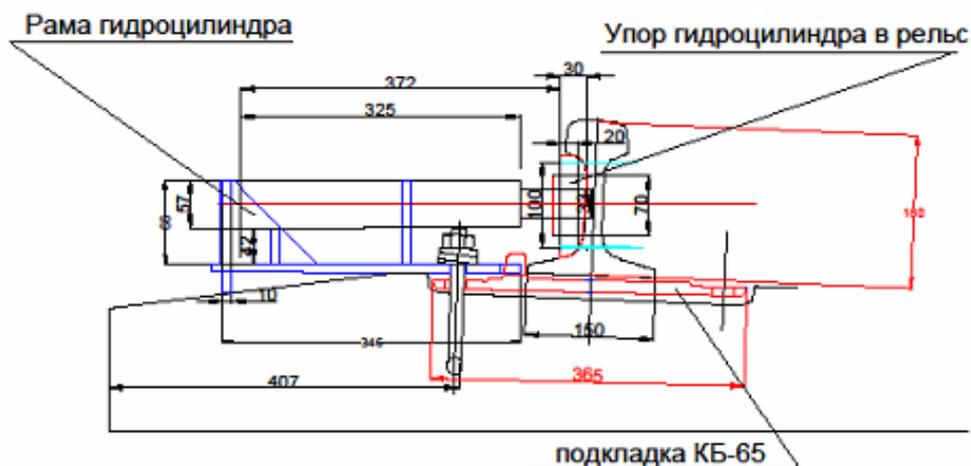


Рисунок 2.3 – Общий вид прибора ИСС-2

Размещение и закрепление прибора ИСС-2 на шпале при измерении приведено на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Размещение прибора ИСС-2 при измерении сопротивления сдвигу шпалы

Перед применением прибора ИСС-2 железобетонная шпала освобождается от креплений. Направляющая рама жестко закрепляется за подошву рельса. Каретка соединяется со шпалой закладным болтом и имеет возможность скользить по направляющей раме между двумя направляющими пластинами.

Направляющая рама с двумя направляющими пластинами жестко закреплена за подошву рельса (с учетом подуклонки), обеспечивает направление усилия сдвига параллельно плоскости подошвы шпал.

### **2.3 Тарировка приборов ИСС-1 и ИСС-2**

Основой приборов ИСС-1 и ИСС-2 является гидравлический домкрат (гидроцилиндр с усилием до 100 кН), соединенный с ручным гидравлическим насосом, оснащенный манометром (до 600 bar). Измерениям предшествует построение градуировочной кривой для гидравлического домкрата (зависимость силы от давления для используемого манометра) с помощью динамометра

эталонного переносного 3-го разряда в металлическом каркасе рамного типа (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Общий вид устройства для тарировки домкрата

Тарировка производится по ГОСТу 8.287-78. Динамометр оснащен индикатором типа ИЧ-10, изменение допускается не более 0,5 деления. Динамометр устанавливают на опорную поверхность силового устройства, учитывая меры безопасности. Показатели индикатора поворотом его подвижного обода выставляют на «0». Затем динамометр нагружают и разгружают с остановками в точках, соответствующих 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 и 100 % предельного значения силы, измеряемой динамометром. Допускается градуировка в дополнительных точках кроме указанных. Снятие показаний по шкале поверяемого динамометра производят при установившемся положении указателя не ранее чем через 10 с после приложения или снятия нагрузки.

Результаты тарировки приведены в таблице 2.1, а также на графике зависимости силы от давления (рисунок 2.6), где вертикальными отрезками отмечены 5 %-е погрешности.

Таблица 2.1 – Результаты тарировки

№ п/п	Величина давления, $P$ (bar)	Величина силы, $F$ (кН)
1	0,0	0,00
2	12,5	2,36
3	25,0	3,61
4	37,2	5,08
5	50,0	6,44
6	57,0	7,00
7	75,0	9,95
8	80,0	10,7
9	85,0	11,5
10	110	15,0
11	130	17,8
12	135	18,8
13	155	21,9
14	160	22,2
15	180	25,2

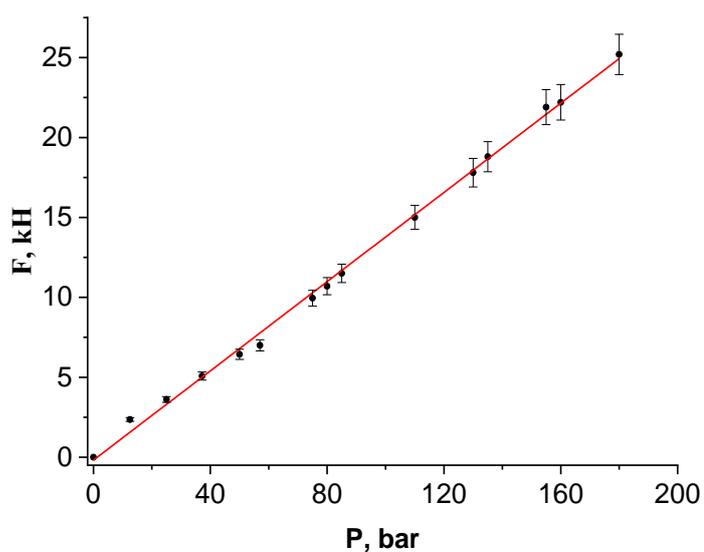


Рисунок 2.6 – График зависимости силы от давления  
(красным цветом изображена линейная аппроксимация эксперимента)

## 2.4 Георадар серии «ОКО-М»

Для определения глубины проникновения вязущего материала вещества на склеенном участке железнодорожного пути был использован георадар серии «ОКО-М» фирмы «Логис», обладающий высокой помехозащищенностью, необходимой для использования в условиях развитой железнодорожной инфраструктуры, и широким набором антенных блоков, что позволяет варьировать глубинность и разрешающую способность обследования в зависимости от решаемой инженерно-геофизической задачи.

Некоторые характеристики георадара «ОКО-М» приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Технические характеристики георадара «ОКО-М»

Центральная частота антенного блока, МГц	Глубина зондирования, м	Разрешающая способность, м	Масса комплекта (АБ), кг
25–100	30	2,0–0,5	6,0
150	12	0,35	22,0
250	8	0,25	14,0
400	5	0,15	8,0
500	4	0,12	3,0
700	3	0,1	2,0
900	2	0,07	2,7
1200	1	0,05	2,4

Георадиолокационный метод неразрушающего контроля при подповерхностном зондировании базируется на облучении исследуемой среды электромагнитными импульсами и позволяет по характеру их отражения оценивать состояние и глубину проникновения вязущего материала в обследуемую балластную среду железнодорожного полотна (рисунок 2.7).

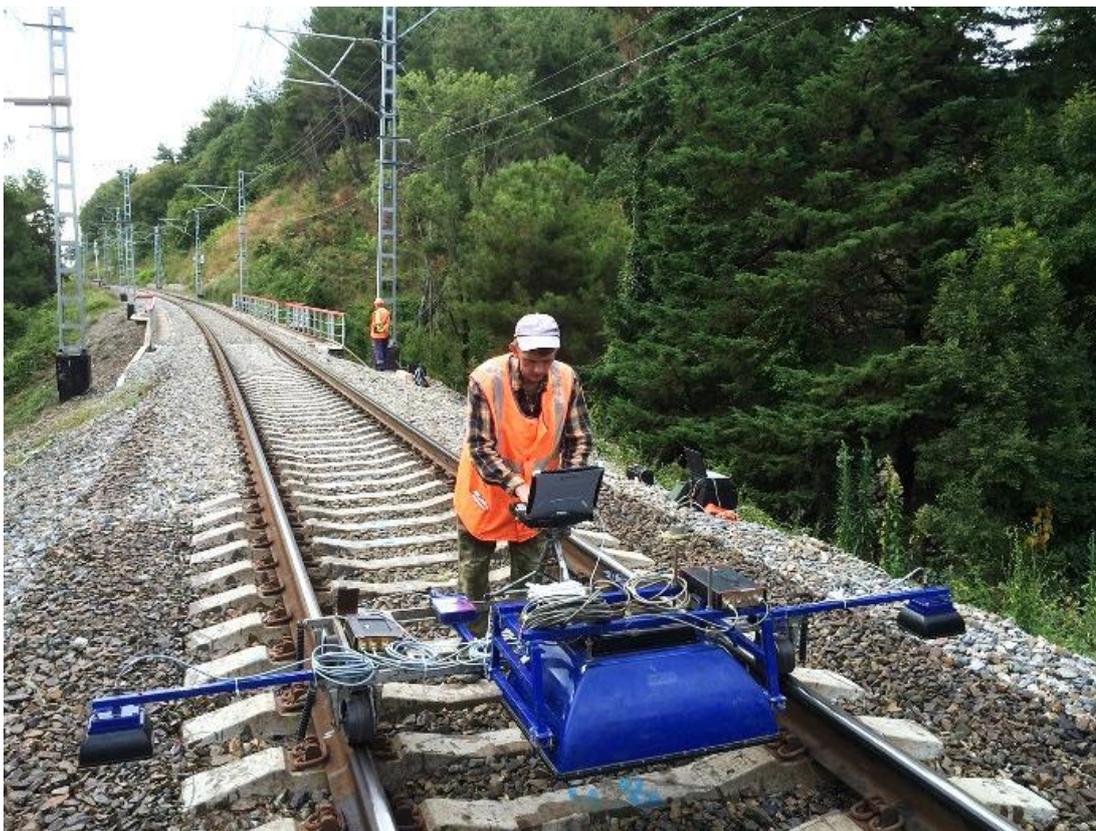


Рисунок 2.7 – Георадар «ОКО-М»

## 2.5 Прибор ПДУ-МГ4 «Удар»

Прибор ПДУ-МГ4 предназначен для косвенного измерения модуля упругости на основе прямых измерений амплитуды перемещения штампа и ударной силы, действующей на круглый жесткий штамп. Прибор служит для контроля качества уплотнения грунтов (рисунок 2.8) и оснований при строительстве дорог, мостов, опор и железнодорожного полотна.

Прибор состоит из нагрузочного устройства, снабженного подвижным грузом; плиты динамического нагружения, представляющей собой круглый жесткий штамп, на котором установлены тензорезисторный датчик силы и акселерометр; вторичного измерительного преобразователя, на передней панели которого размещены жидкокристаллический дисплей и клавиатура (рисунок 2.9).

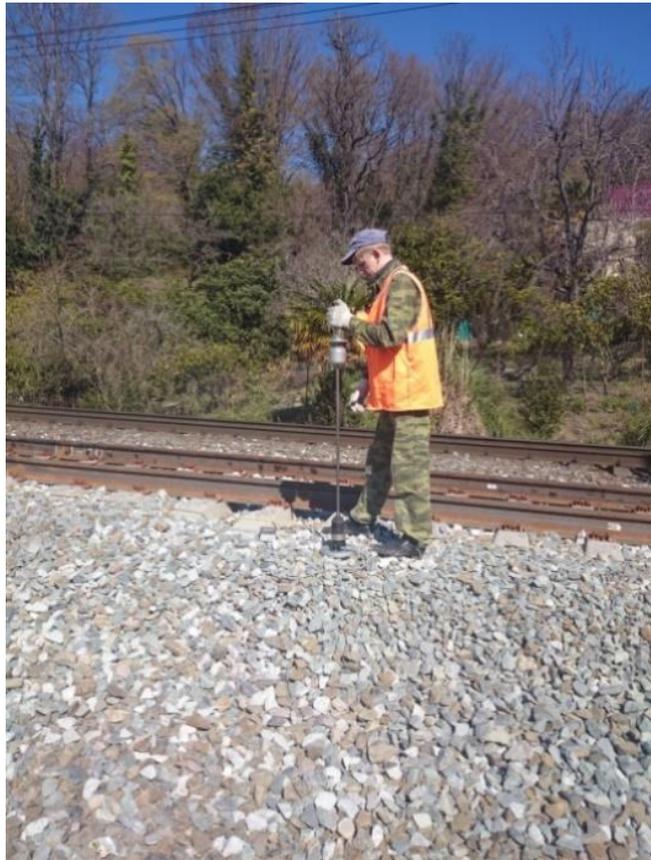


Рисунок 2.8 – Контроль качества уплотнения грунтов с помощью прибора ПДУ-МГ4



Рисунок 2.9 – Прибор ПДУ-МГ4 «Удар»

Принцип действия рассматриваемого устройства основывается на изменении аналогового сигнала на выходе тензометрического датчика, величина которого пропорциональна силе, возникающей при деформации его упругих элементов. Для измерения величины ускорения приобретаемым штампом во время движения используется установленный на него акселерометр. Для определения величины перемещения штампа аналоговый сигнал на выходе акселерометра подвергается интегрированию. Для возможности дальнейшей обработки и отображения результатов измерений электрические сигналы тензометрического датчика и цифрового интегратора поступают на вход аналого-цифрового преобразователя.

Измерение модуля упругости ( $E$ ) выполняется на основе прямых измерений амплитуды перемещения штампа ( $L$ ) и действующей на него ударной силы ( $F$ ) (формула (2.1)):

$$E = \frac{F}{4Ld} (1 - \mu^2), \quad (2.1)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона, принимаемый для дорожных конструкций равным 0,35;  $d$  – диаметр нагружаемого штампа.

Поскольку конструкция прибора предусматривает приложение динамических нагрузок к его узлам, точность определения перемещения штампа ( $L$ ) и ударной силы ( $F$ ) регулярно проверяется в соответствии с действующими методиками и правилами в центрах метрологии, стандартизации и сертификации средств измерения.

## 2.6 Прибор «Дельта-03»

Для регистрации акустических низкочастотных колебаний прибор укомплектован трехкомпонентным низкочастотным сейсмометром «LE – 3 DliteMkII». Внешний вид сейсмометра и регистратора представлен на рисунке 2.10, а основные технические характеристики приборов сведены в таблицу 2.3.



Рисунок 2.10 – Комплект вибросейсмического оборудования

Таблица 2.3 – Основные технические характеристики приборов  
«LE – 3 DliteMkII» и «Дельта-03»

Оборудование			
Сейсмометр «LE – 3 DliteMkII»		Регистратор сейсмических сигналов «Дельта-03»	
Наименование характеристики	Значение	Наименование характеристики	Значение
1	2	3	4
Диапазон измерения виброскорости по оси X, Y, Z, мм/с	от 0,1 до 12,5	Количество каналов	4
Диапазон рабочих частот, Гц	от 1 до 100	Мгновенный динамический диапазон	120 дБ
Номинальный коэффициент преобразования на базовой частоте 10 Гц, мВ/(мм/с)	400	Диапазон регистрируемых частот	0,05–7,5 Гц 0,05–15 Гц 0,05–30 Гц 0,05–60 Гц 0,05–120 Гц 0,05–240 Гц

1	2	3	4
Пределы допускаемой основной приведенной погрешности измерения виброскорости в рабочем диапазоне частот и температур для осей X, Y, Z, %	$\pm 1,5$	Коэффициент нелинейных искажений	0,005 %
Условия эксплуатации: диапазон рабочих температур, °С	от -45 до +65	Величина подавления встроенных аттенюаторов	-20;0;20;40

## 2.7 Комплект сит для щебня и формы для геокомпозита

Для изготовления экспериментальных образцов геокомпозита с улучшенными прочностными свойствами использован комплект сит для щебня ГОСТ 33029-2014 с квадратной ячейкой (0,063; 1,4; 2,0; 2,8; 4,0; 5,6; 8,0; 11,2; 16,0; 22,4; 31,5; 45; 63; 90; 126; 180 мм; поддон; крышка).

Формы для получения экспериментальных образцов обеспечивают получение изделий в форме блоков с размерами 100×100×400 мм в пределах отклонений, допускаемых рабочими чертежами. Они изготовлены разборными и представлены на рисунке 2.11.



Рисунок 2.11 – Формы для получения экспериментальных образцов

## 2.8 Испытательная климатическая камера

Испытательная климатическая камера HD KWGDS62IF фирмы Hyde Science and Technology Limited, представленная на рисунке 2.12, позволяет поддерживать стабильные условия окружающей среды с возможностью задать и поддерживать требуемую влажность от 10 до 98 % и температуру в диапазоне от  $-70$  до  $+100$  °С.



Рисунок 2.12 – Технологический участок с установленной испытательной климатической камерой модели HD KWGDS62IF фирмы Hyde Science and Technology Limited. Научно-исследовательский и испытательный центр «Криотрансэнерго» (НИИЦ КТЭ ФГБОУ ВО РГУПС)

## 2.9 Верхнеприводная мешалка модели RZR 2020 фирмы Heidolph

Верхнеприводная мешалка предназначена для перемешивания и гомогенизации. Двухскоростной привод с высоким крутящим моментом (до 520 Н·см) обеспечивает однородную гомогенизацию вязких смесей (рисунок 2.13).



Рисунок 2.13 – Верхнеприводная мешалка аналоговая RZR 2020  
фирмы «Heidolph»

### 2.10 Сушильный шкаф лабораторный

Сушильный шкаф лабораторный предназначен для сушки оборудования, инструментов и образцов, а также для проведения различных лабораторных исследований, испытаний, требующих поддержания стабильной температуры в диапазоне от +50 до +250 °С (рисунок 2.14).



Рисунок 2.14 – Сушильный шкаф лабораторный

## 2.11 Испытательная машина по ГОСТ 28840-90

Для измерения прочностных свойств экспериментальных образцов геокомпозита, изготовленных с использованием комплекта сит для щебня и форм (п. 2.7), используется испытательная машина (рисунок 2.15).

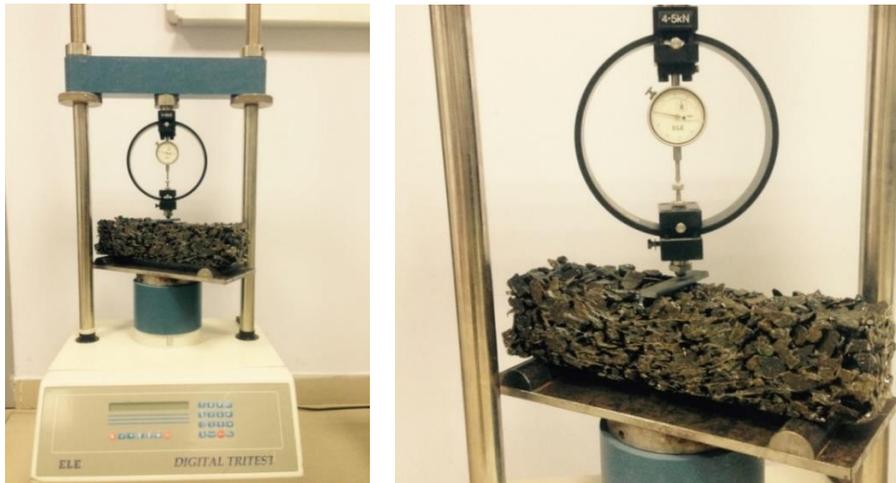


Рисунок 2.15 – Общий вид испытательной машины для определения прочности при изгибе

Во время установки для исключения точечного контакта щебенки образца с роликами испытательной машины использовались металлические пластинки (см. рисунок 2.15).

При приложении усилия тарированное кольцо деформируется. Величина деформации измеряется при помощи стрелочного прибора, показания которого переводятся в величину силы с использованием тонировочных графиков или таблиц, уточняемых в процессе регулярных поверок.

## 2.12 Прибор одноосного растяжения ГТ 2.6.1

Прибор одноосного растяжения ГТ 2.6.1 содержится в составе испытательной установки ГТ 0.6.1 регулярно поверяемого измерительно-

вычислительного комплекса «АСИС-1». Общий вид прибора приведен на рисунке 2.16.

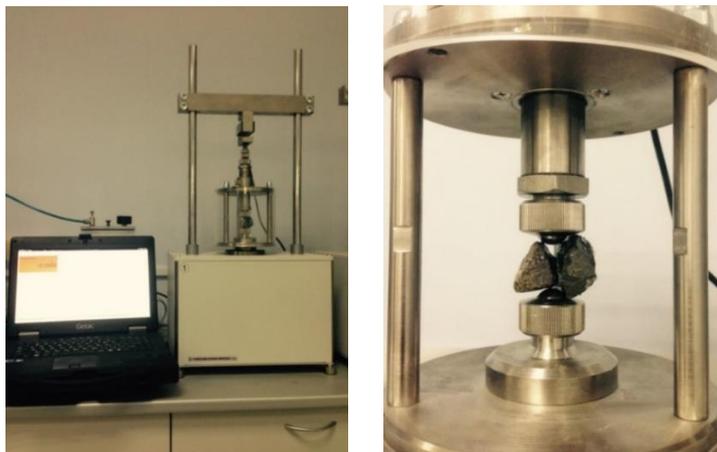


Рисунок 2.16 – Общий вид испытательной машины для определения адгезионной прочности

В процессе измерений металлические сферы прибора, удерживающие образец, сближаются и прикладывают разрывающую силу к склеенной поверхности образца. Момент разрушения геокомпозита и соответствующая сила фиксируются измерительной системой.

### **3 УСИЛЕНИЕ ПЛЕЧА БАЛЛАСТНОЙ ПРИЗМЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ДВУХКОМПОНЕНТНЫМИ ПОЛИМЕРНЫМИ ВЯЖУЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ**

Данная глава посвящена решению первой и второй задач исследования: «Разработка технологии полимерного закрепления плеча балластной призмы в кривых малого радиуса для повышения поперечной устойчивости рельсошпальной решетки» и «Создание георадиолокационной технологии определения толщины сформированного геокомпозита».

В ней рассмотрена возможность увеличения сопротивления рельсошпальной решетки поперечному сдвигу при укреплении плеча балластной призмы действующих участков железных дорог [100, 101]. Важной особенностью используемой технологии укрепления является сохранение дренирующих свойств балластного слоя.

Поскольку эти исследования актуальны для действующих участков железных дорог, соответствующие работы проводились в технологические перерывы в движении поездов. Кроме этого, в главе исследована возможность контроля толщины образующегося геокомпозита методом георадиолокации.

#### **3.1 Используемые материалы**

Толщина геокомпозита, образующегося при укреплении балластной призмы железнодорожного пути, зависит от ряда факторов, таких как вязкость и расход полимера, фракционный состав балластного материала, степень заполнения пор продуктами износа. Кроме этого, необходимо отметить, что вязкость вяжущих материалов, как правило, зависит от температуры и возрастает при ее уменьшении.

Ниже рассмотрены некоторые особенности использованных в данном исследовании материалов.

### ***3.1.1 Используемый полимер***

На основании проведенного анализа видов полимерных материалов, имеющих на сегодняшний день на российском рынке продаж, была выбрана двухкомпонентная полиуретановая система РТ-КС-001, которую в дальнейшем будем называть вяжущим материалом. Эта система распространяется на рынке компанией «РТ-Полипласт» и формируется из сырья компании Eraflex.

РТ-КС-001 чувствителен к влаге, и до начала работ компоненты хранились в герметичных закрытых контейнерах. Вязкость полиольного и изоционатного компонентов составляла при температуре +20 °С 2700–3000 мПа·с и 180–220 мПа·с соответственно. Использованное соотношение указанных компонентов в рабочей смеси выбрано равным 100:65.

Полный цикл затвердевания полиуретанового вяжущего материала занимает до 20 часов при температуре окружающего воздуха не ниже +10 °С. После полимеризации плотность вяжущего материала составила 1,11 г/см<sup>3</sup>, твердость по Шору 15–47D, прочность на растяжение – 20 Н/мм<sup>2</sup>.

Дополнительные лабораторные испытания показали, что прерывание затвердевания (полимеризации) при понижении температуры окружающей среды до отрицательных значений может несколько ухудшить прочностные характеристики формируемого геокомпозита. На рисунке 3.1 наглядно изображены результаты сравнения твердости вяжущего материала при прерывании процесса полимеризации различными по продолжительности и моменту наступления интервалами времени с температурой окружающей среды –20 °С. Видно, что понижение температуры не препятствует продолжению полимеризации при ее дальнейшем повышении до 15–25 °С, но может уменьшить твердость композита по окончании процесса на величину до 20 %.

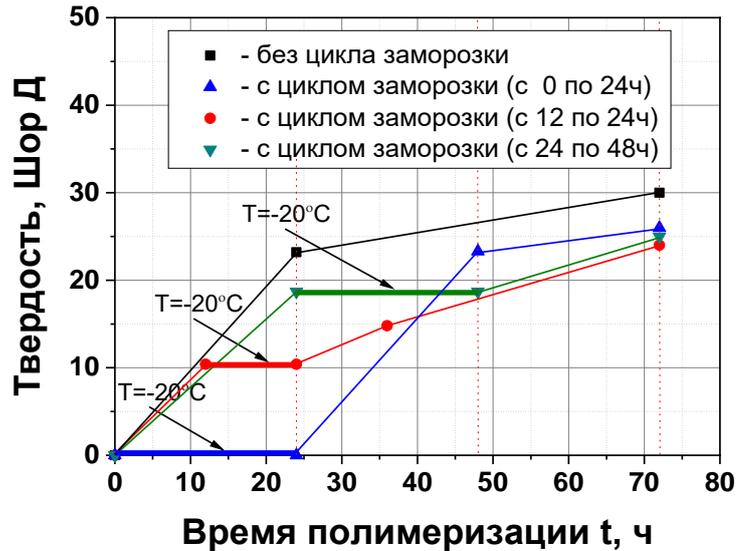


Рисунок 3.1 – Зависимость твердости полимера от времени и температуры окружающей среды

Дополнительные лабораторные испытания показали, что среднее значение силы отрыва щебеночного материала, склеенного на площади в  $100 \text{ мм}^2$ , составляет 83 Н. Кроме этого, оказалось, что 25 циклов термической обработки, при которой геокомпозит охлаждался до температуры  $-60 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 2 часов с последующим нагревом его до  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , приводили к снижению прочностных характеристик до 30 %. Вместе с этим аналогичная обработка геокомпозита с нагревом до  $+50 \text{ }^\circ\text{C}$  приводила к росту прочностных характеристик до 5 %.

### 3.1.2 Балластный материал

Работы выполнены на 1951-м км ПК10 действующего перегона Лоо – Дагомыс Северо-Кавказской железной дороги.

Используемый в данной работе вяжущий материал – полиуретан – представлен до полимеризации двумя компонентами, которые называются полиол и изоцианат. Применение этих компонентов для омоноличивания балластного материала в полевых условиях сопряжено с рядом трудностей, основной из которых является возможность протекания химических реакций с водой, что

понижает прочностные и физические свойства полиуретана. Известно, что полимеризация с образованием полиуретана понижает негативное влияние воды и сводит его на нет по окончании процесса. Вместе с этим известно, что в начале работ по формированию геокомпозита необходимо использовать сухой балласт. Обеспечение этого требования связано с решением двух технических задач по содержанию верхнего строения пути. Первая задача связана с тем, что балластный материал должен быть достаточно чистым, поскольку накопление влаги в балластном слое связано с аккумуляцией воды загрязнителями и засорителями. Количественные требования по заполнению пор балластной призмы продуктами износа и загрязнителями на сети российских железных дорог регламентируются нормативным документом ОАО «РЖД» [102] и должны быть реализованы до начала выполнения работ. Кроме этого, на переувлажненных участках железных дорог даже чистый балластный материал может иметь повышенную влажность. В связи с этим на участке выполнения работ должны функционировать эффективные системы водоотведения.

На участке, установленном для проведения работ данного исследования – 1951-м км ПК 10, – перед их началом было выполнено определение засоренности и загрязненности балластного материала в соответствии с технологией, установленной нормативным документом [103]. Результаты измерений сопоставлены с требованиями документа [102] в таблице 3.1. Сравнение приведенных данных позволяет заключить, что балластный материал конкретного участка соответствует требованиям [103] и не требует проведения специальных работ по очистке. Дополнительные исследования показали, что в период выполнения работ по формированию геокомпозита влажность имеющихся загрязнителей и засорителей находилась в пределах, не допускающих выделение воды в жидком состоянии. Это свидетельствует об эффективной работе водоотводных сооружений и высокой скорости дренирования воды в балластном материале.

Таблица 3.1 – Определение загрязненности балластного слоя на участках  
«омоноличивания»

Участок	Масса частиц (кг) размером более 25 мм	Масса частиц (кг) размером менее 25 мм	Общая масса пробы, кг	Засоренность, %
1951-й км ПК10	44,6	5,4	50	11
Допустимые предельные показатели засоренности	50	0	50	30

### ***3.1.3 Зависимость толщины геокомпозита от расхода вяжущего материала***

Нанесение вяжущего материала осуществлялось вручную с использованием пневматического оборудования «Рупена плазма», особенностью которого является возможность задавать и контролировать температуру в баках и шлангах для полиола и изоционата, а также контролировать соотношение компонентов в рабочей смеси.

Работы по укреплению балластного слоя железнодорожного пути проводились в сухой период времени, при температуре компонентов вяжущего материала и окружающего воздуха 20 °С и относительной влажности воздуха, не превышающей 50 %.

Выделенный для эксперимента участок пути выводился из эксплуатации на 10 часов. За это время геокомпозит набирал 70 % твердости. Открытие движения не препятствовало дальнейшему набору прочности плеча балластной призмы, что контролировалось измерениями модуля упругости балластного материала и сравнением результатов с аналогичными данными, полученными в лабораторных условиях.

Непосредственно перед выполнением работ по формированию геокомпозита участок железнодорожного полотна был разбит на семь фрагментов (рисунок 3.2).

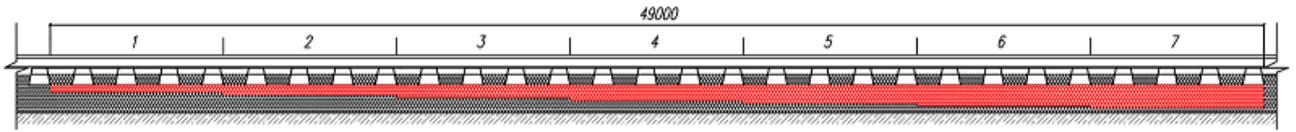


Рисунок 3.2 – Разбивка участка пути длиной 49 м на фрагменты с разной глубиной проникновения вяжущего материала

Пропитка балласта осуществлялась полосой шириной 0,45–0,50 м за торцами шпал распылением ручным оборудованием заранее приготовленного полимера (рисунок 3.3).

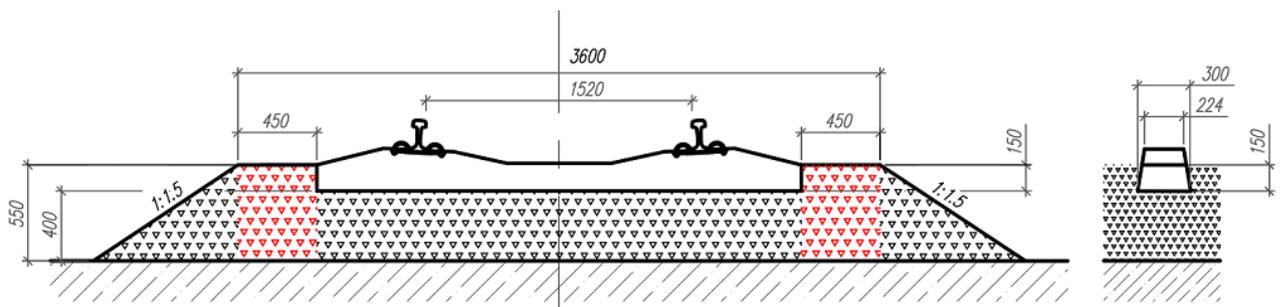


Рисунок 3.3 – Поперечный разрез пути. Размеры приведены в мм.

Красным цветом обозначены фрагменты балластной призмы, подвергнутые укреплению вяжущим материалом

Расход вяжущего материала на один метр длины фрагментов участка приведен в таблице 3.2 в кг/пог. м. При определении количества полимера, необходимого для закрепления единицы площади, данные таблицы 3.2 необходимо увеличить в два раза.

Таблица 3.2 – Изменение глубины проникновения вяжущего материала  
в зависимости от его расхода

№ фрагмента	Расход вяжущего материала на погонный метр, кг/пог. м	Глубина проникновения вяжущего материала, мм
1	3,0	105
2	3,5	140
3	4,1	175
4	5,0	235
5	5,7	279
6	6,0	297
7	6,5	330

После формирования геокомпозита были определены глубины проникновения вяжущего материала в зависимости от его расхода. Для этого неукрепленный балластный материал раскапывался в центре выделенных фрагментов, что позволяло избегать граничных эффектов между ними (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Определение толщины геокомпозита шурфлением  
балластной призмы

Полученные результаты приведены на рисунке 3.5 и в таблице 3.2. При выполнении работ не применялись дополнительные мероприятия по обеспечению равномерности проникновения вяжущего материала до нижней границы балластного слоя, поскольку технология рассчитана на использование в условиях эксплуатируемой железной дороги. Погрешности измерений глубины проникновения вяжущего материала можно считать равными среднему значению фракционного состава щебня в балластной призме – 40 мм.

Исследование распределения плотности полимера с глубиной выполнено в лабораторных условиях. Предположено, что плотность вяжущего материала пропорциональна прочностным характеристикам геокомпозита. Для изготовления лабораторных образцов геокомпозита в три ящика квадратного сечения 100×100 мм и высотой 400 мм помещался балластный материал, который затем пропитывался сверху вяжущим материалом, масса которого определялась по данным из таблицы 3.2. Например, значение массы 0,175 кг соответствует расходу на фрагменте № 7.

В данном исследовании в качестве прочностной характеристики выбрана сила, разрушающая лабораторный образец геокомпозита после полной полимеризации вяжущего материала. При измерениях сила прикладывалась к образцу геокомпозита в направлении, перпендикулярном его высоте, через металлическую недеформируемую пластинку размером 20×100 мм и высотой 10 мм. Значения величины силы ( $f$ ) (формула (3.1)), отнесенные к значению силы ( $f_7$ ), в зависимости от уменьшения глубины проникновения вяжущего материала ( $h$ ) приведены на рисунке 3.5. На этом же рисунке приведена их аппроксимация полиномом третьей степени, описывающая эксперимент с точностью в 10 %:

$$f / f_7 = 0,982 + 0,000445 \cdot h + 2,39422^{-6} \cdot h^2 - 2,2477^{-8} \cdot h^3. \quad (3.1)$$

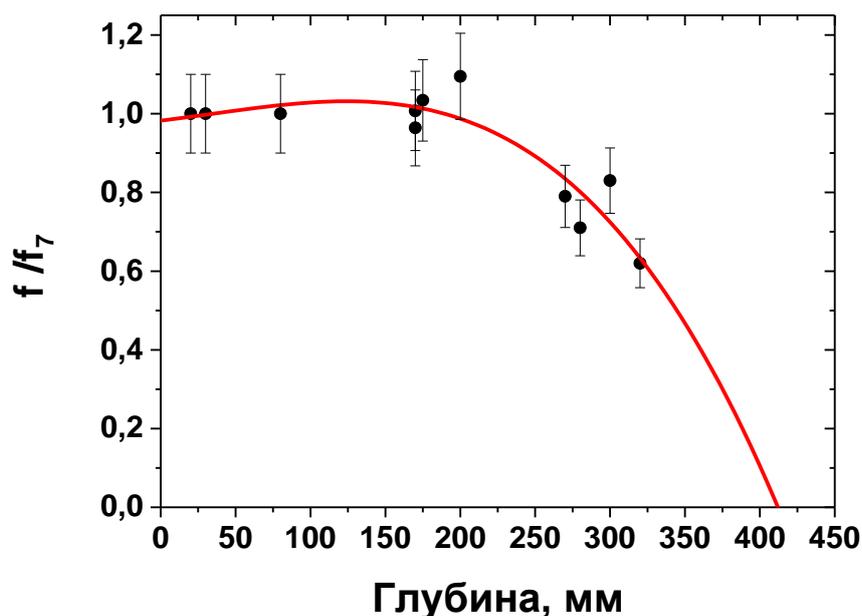


Рисунок 3.5 – Отношения сил, разрушающих лабораторный образец геокомпозита на глубине  $h$ . Вертикальными отрезками отмечены погрешности величиной 10 %

Использование полученного полинома позволяет определить максимальную глубину проникновения полимера при  $f / f_7 = 0$  значением 412 мм, что согласуется со значением 330 мм, приведенным в таблице 3.2, с приемлемой погрешностью в 20 %, близкой к сумме погрешности математической процедуры и погрешности определения глубины проникновения вяжущего материала в полевых и лабораторных условиях. Вместе с этим увеличение глубины проникновения вяжущего материала до 412 мм может объясняться меньшей засоренностью балластного материала, использованного в лабораторных измерениях, и, как следствие, уменьшением «эффективной» вязкости вяжущего материала.

## **3.2 Методы исследований геокомпозита и обсуждение полученных результатов**

### ***3.2.1 Применение метода георадиолокации для определения толщины геокомпозита***

Обследование состояния балластной призмы и земляного полотна на протяженных участках железных дорог в практике текущего содержания обычно выполняется методом георадиолокации [104, 105]. Эта технология в данном исследовании доработана для решения задачи контроля толщины проникновения вяжущего материала в балластный материал. Проблема прямого применения метода георадиолокации заключается в том, что нижняя граница образуемого геокомпозита и щебеночного материала имеет низкую контрастность. Это объясняется несколькими причинами. Применяемая технология формирования геокомпозита должна оставлять поры незаполненными, чтобы влиять на дренирующие свойства балластной призмы. Это подразумевает распределение вяжущего по поверхности щебня тонким слоем, кроме этого, диэлектрическая проницаемость вяжущего материала невелика и не вносит существенный вклад в диэлектрическую проницаемость геокомпозита. Необходимо отметить также то, что при образовании геокомпозита, из-за локальных неоднородностей балластного материала, его нижняя граница не имеет четких очертаний.

В данном исследовании проблема оконтуривания геокомпозита решена не прямым поиском положения его нижней границы, а методом определения более контрастной границы балластной призмы и подбалластного основания [106, 107].

Полевые георадиолокационные измерения в данной работе проведены с использованием подвижного экипажа в составе ручной тележки и георадара серии «ОКО», размещенного на ней. Для подавления помех в верхней полуплоскости пространства георадар был оснащен рупорной антенной [108] с центральной частотой импульса электромагнитного излучения, равной 1700 МГц. Привязка

радарограмм к объекту исследования осуществлялась установкой меток, которые разделяли участки с разным расходом вяжущего материала.

При обработке радарограмм, если не учитывается расстояние между передающей и приемной антеннами, толщина конструкционного балластного слоя ( $l$ ) определяется выражением:

$$l = \Delta t \cdot v = \Delta t \left( \frac{c}{n} \right), \quad (3.2)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;  $v$  – скорость света в балласте;  $\Delta t$  – время распространения электромагнитного излучения от верхней до нижней границы балластной призмы, которое в два раза меньше времени, определяемого при регистрации радарограммы;  $n$  – показатель преломления среды.

Обычно в практике георадиолокации используется диэлектрическая проницаемость среды ( $\epsilon$ ), связанная с показателем преломления следующим соотношением:

$$n = \sqrt{\epsilon}. \quad (3.3)$$

Измерение значения этих электрофизических величин в практике георадиолокации обычно проводится сопоставлением с результатами прямых измерений. С этой целью результаты расчета по формуле (3.2) сопоставляются с линейными размерами конструкции, определяемыми на железнодорожном пути методом шурфления.

В данной работе определение электрофизических характеристик балластного материала (формулы 3.2 и 3.3), необходимых для тарировки георадара, выполнено путем подгонки  $l$  (формула (3.2)) к значению, полученному шурфлением балластной призмы на участке выполнения измерений. Для уменьшения погрешности измерений эти исследования повторялись несколько раз в точках вдоль траектории георадиолокационных измерений.

В случае, когда обследуемая конструкция толщиной  $l$  представлена совокупностью отдельных конструктивных слоев (например, геокомпозита ( $h$ ) и щебеночного материала ( $l - h$ )), формула (3.4) может быть переписана в виде:

$$\Delta t_g = h \left( \frac{n_g}{c} \right) + (l - h) \left( \frac{n}{c} \right), \quad (3.4)$$

где  $n_g$  – показатель преломления геокомпозита.

Применение описанной технологии формирования геокомпозита оставляет поры балластного слоя не заполненными полимером. В этом случае можно считать, что удельный объем полимера в геокомпозите  $V_p$  мал,  $\frac{V_p}{V} < 1$ , и показатель преломления  $n_g$  можно представить в следующем виде:

$$n_g = \sqrt{\varepsilon \left( 1 + \frac{V_p \varepsilon_p}{V \varepsilon} \right)} = n(1 + \delta), \quad (3.5)$$

В этом случае формула (3.6) может быть переписана в виде:

$$\Delta t_g = \Delta t + h \left( \frac{\delta}{c} \right), \quad (3.6)$$

из которого следует, что имеет место линейная зависимость времени от толщины геокомпозита  $h$ . Верификация полученного соотношения (3.6) выполнялась после обработки исходных радарограмм и включала стандартные процедуры: фильтрацию помех от рельсошпальной решетки, подавление механических колебаний подвеса георадара.

Результаты приведены на рисунке 3.6, А и В. При построении этих рисунков нулевое значение временной шкалы совпадает с положением верхней границы балластного слоя, а координата ( $x$ ) точки в балластной призме при этом определяется соотношением:

$$\Delta t = x \left( \frac{n}{c} \right). \quad (3.7)$$

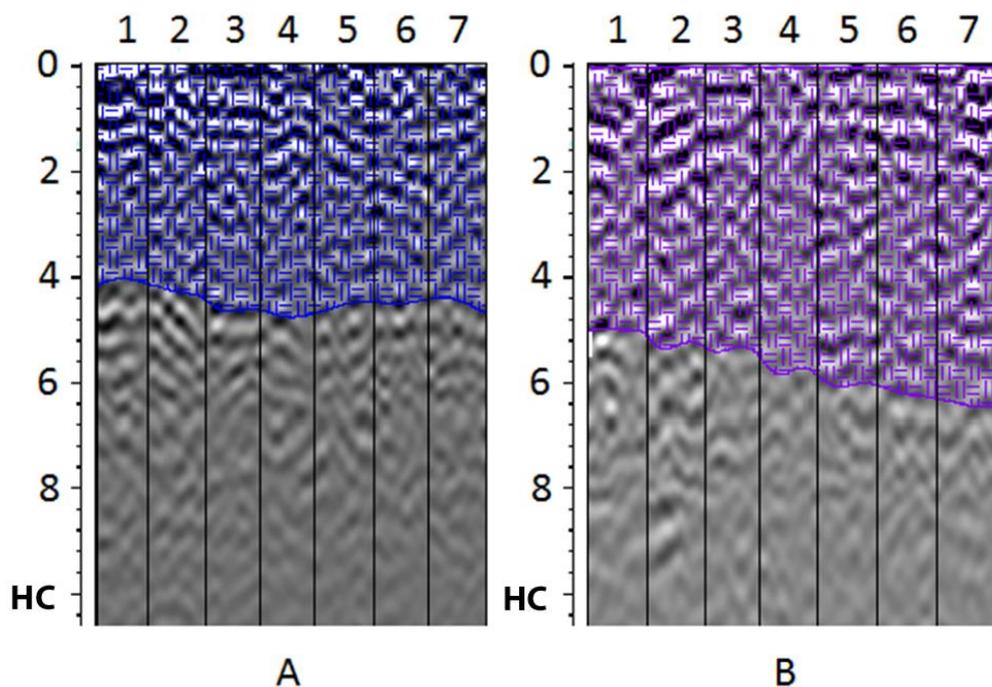


Рисунок 3.6 – Результаты обработки георадиолокационных данных до и после (В) формирования геокомпозита. Балластный слой изображен штриховкой синего (А) и фиолетового цветов (В).

Таблица 3.2 отражает расход вяжущего материала на участках, отмеченных на рисунках сплошными линиями черного цвета. При формировании геокомпозита его электрофизические свойства зависят от расхода вяжущего материала. Например, значение показателя преломления растет с ростом расхода связующего, и, соответственно, средняя скорость распространения электромагнитного излучения уменьшается. На радарограммах это отражается в смещении георадиолокационных признаков объектов во временной шкале. Действительно, время распространения сигнала до объекта в балластной призме с показателем преломления  $n$  в отсутствие геокомпозита определяется формулой (3.6). Формирование геокомпозита толщиной  $h$  приводит к росту времени, который пропорционален толщине геокомпозита (формула (3.7)). Если в качестве объекта исследования рассматривать положение границы балластной призмы и подбалластного основания, то расход связующего материала будет приводить к увеличению толщины балластного слоя во временной шкале. Это можно наблюдать на рисунке 3.6.

На рисунке 3.7 приведены результаты определения толщины балластного слоя во временной шкале при разном расходе вяжущего материала. Выполненная аппроксимация полученных значений позволяет заключить, что зависимость видимой толщины балластного слоя от расхода связующего имеет линейный характер, а формула (3.6) справедлива с точностью 5 %.

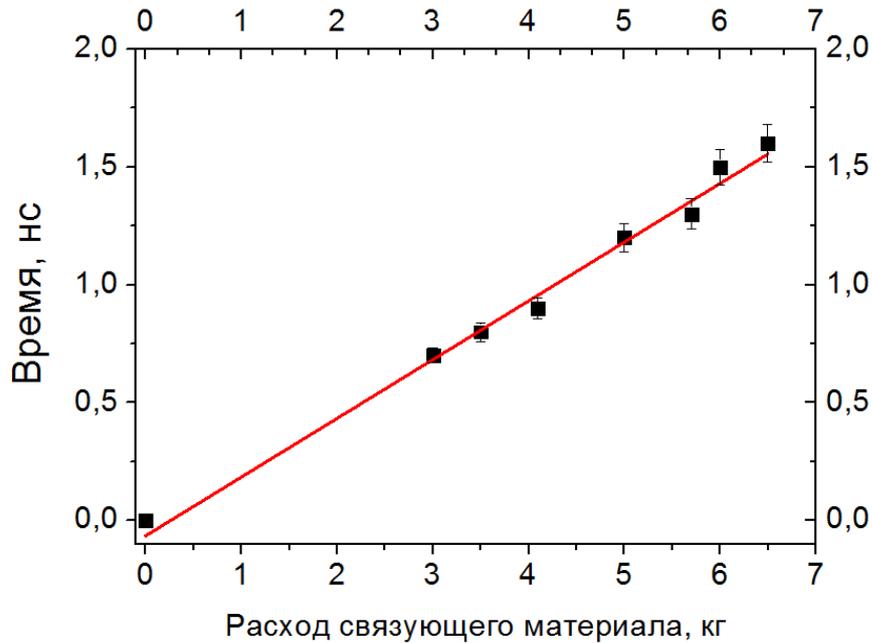


Рисунок 3.7 – Символом (■) обозначены результаты  $\Delta t_g - \Delta t$ , полученные при обработке радарограмм и отражающие изменение положения границы балластного слоя и подбалластного основания во временной шкале при изменении расхода связующего материала. Вертикальными отрезками показаны погрешности величиной 5 %. Сплошная красная линия отражает положение аппроксимирующей экспериментальные значения линейной зависимости

Полученные результаты позволяют подтвердить возможность применения метода георадиолокации для контроля расхода связующего материала через измерение кажущейся толщины геокомпозита во временной шкале. Поскольку при использовании технологических приемов формирования геокомпозита расход вяжущего определяет прочностные свойства конструкции, применение

тарифированных методов георадиолокации создает возможность оценки прочностных свойств балластного слоя на значительных по протяженности участках железнодорожного пути.

Кроме этого, исследования связи расхода связующего материала и толщины формируемого геокомпозита (см. таблицу 3.2), а также развитие средств и методов контроля технологического процесса формирования геокомпозита обеспечивают получение требуемых проектом прочностных характеристик ответственных мест пути (например, кривых малого радиуса). Это, в свою очередь, позволяет при проектировании учитывать требуемые прочностные свойства балластной призмы, что должно приводить к определению оптимальной толщины геокомпозита и экономии связующего материала.

Решение задачи определения глубины проникновения вяжущего материала в балласт может основываться на использовании формулы (3.8):

$$\Delta t_g - \Delta t = h \left( \frac{n_g}{c} \right) - h \left( \frac{n}{c} \right) = h \frac{n_g - n}{c}, \quad (3.8)$$

полученной при совместном использовании формул (3.2) и (3.4).

Толщина геокомпозита ( $h$ ) может быть выполнена по формуле (3.8). Для ее использования необходимо предварительно в лабораторных условиях исследовать электрофизические свойства геокомпозита. С этой целью геокомпозит в лабораторных условиях должен формироваться на балластном материале, близком по свойствам к балластному материалу в пути на участке производства работ. Это позволит определить георадиолокационным экспериментом в лабораторных условиях требуемый формулой (3.8) показатель преломления  $n_g$ .

Если в процессе осуществления технологического процесса по контролю формирования толщины геокомпозита требуемая толщина оказывается не достигнута, необходимо увеличить расход вяжущего материала. Величина дополнительного расхода должна определяться по заранее определенным для используемого балластного материала зависимостям, как это было сделано для участка экспериментальных работ (см. таблицу 3.2).

### ***3.2.2 Контроль механических характеристик геокомпозита***

Из литературных источников известно, что формирование геокомпозита в балластном слое позволяет изменять жесткость железнодорожного пути [86]. Очевидно, что степень изменения жесткости будет зависеть от свойств балластного материала и применяемого связующего. В данном разделе диссертационной работы решена задача исследования зависимости модуля упругости балластной призмы от расхода вяжущего материала, известного под торговым названием РТ-КС-001.

Для выполнения измерений в полевых условиях использован измеритель модуля упругости грунтов и оснований дорог ПДУ-МГ4, возможности которого приведены во второй главе настоящей диссертации. Применение метода измерения, реализованного в этом устройстве для решения задачи данного исследования и аналогичных задач в транспортном строительстве, регламентируется национальными и международными стандартами (например, International Standard ASTM E2835-11).

Результаты выполненных измерений приведены для незакрепленного участка пути на рисунке 3.8, А и для участка после формирования геокомпозита – на рисунке 3.8, Б. Среднее значение модуля упругости в первом случае составило 77 МН/м<sup>2</sup>. Измерения на этом участке после формирования геокомпозита, выполненного с применением вяжущего материала РТ-КС-001, зарегистрировали существенное повышение модуля упругости конструкции (см. рисунок 3.8, Б). Очевидно, применение полимерного связующего позволило прочно скрепить между собой частицы щебня, в результате чего образовался геокомпозит в виде упругой системы. Упругие свойства геокомпозита, как видно на рисунке 3.8, Б, увеличиваются с ростом расхода связующего. Модуль упругости конструкции в случае, когда область формирования геокомпозита захватывает балластный слой на всю глубину, достигает значения 320 МПа. Эта величина примерно в 4 раза больше модуля упругости незакрепленного балластного материала на участке исследования (77 МПа).

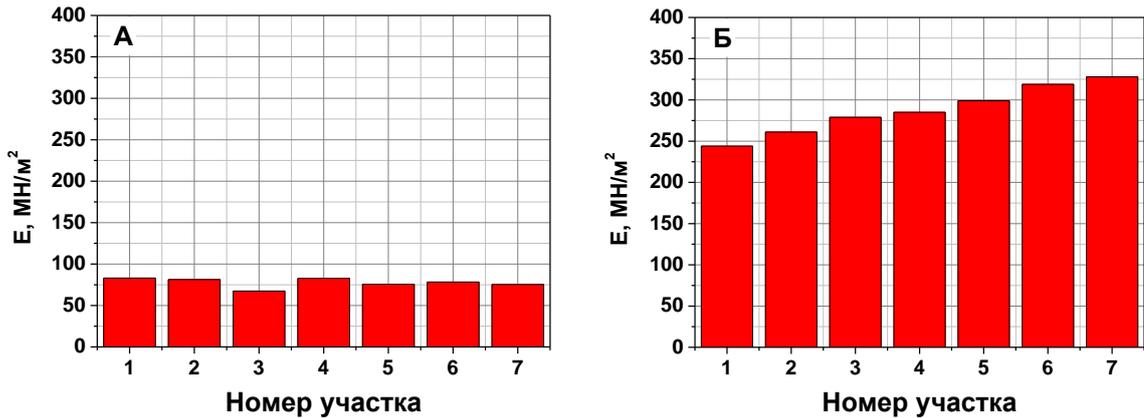


Рисунок 3.8 – Модуль упругости балласта до (А) и после (Б) упрочнения вяжущим материалом (см. таблицу 3.2)

Регистрируемое изменение упругих свойств балласта при закреплении его вяжущим материалом может использоваться для организации участков пути с переменной жесткостью с целью сопряжения упругих свойств участков пути, уложенных на земляное основание, и искусственных сооружений, которые могут существенно отличаться [93, 109]. В настоящее время использование вяжущих материалов рекомендуется для организации участков с переменной жесткостью наравне с рядом других типовых и индивидуальных технических решений [98]. При выполнении работ упругие свойства локальных точек такого участка обычно определяются штамповыми испытаниями. Для контроля упругих свойств на всем участке можно использовать метод георадиолокации, тарированный результатами штамповых испытаний. Для иллюстрации этого преобразуем результаты, приведенные на рисунке 3.6, к виду:

$$\Delta E = E_B - E_A, \quad (3.9)$$

где индексы  $B$  и  $A$  отмечают модуль упругости балласта до и после обработки вяжущим материалом.

На рисунке 3.9 величины  $\Delta E$  и их линейная аппроксимация сопоставлены с данными рисунка 3.7. Наблюдается качественное согласие в поведении

приведенных зависимостей. Их коэффициент корреляции, рассчитанный по Пирсону, составил 0,94, что определяет точность возможной тарировки.

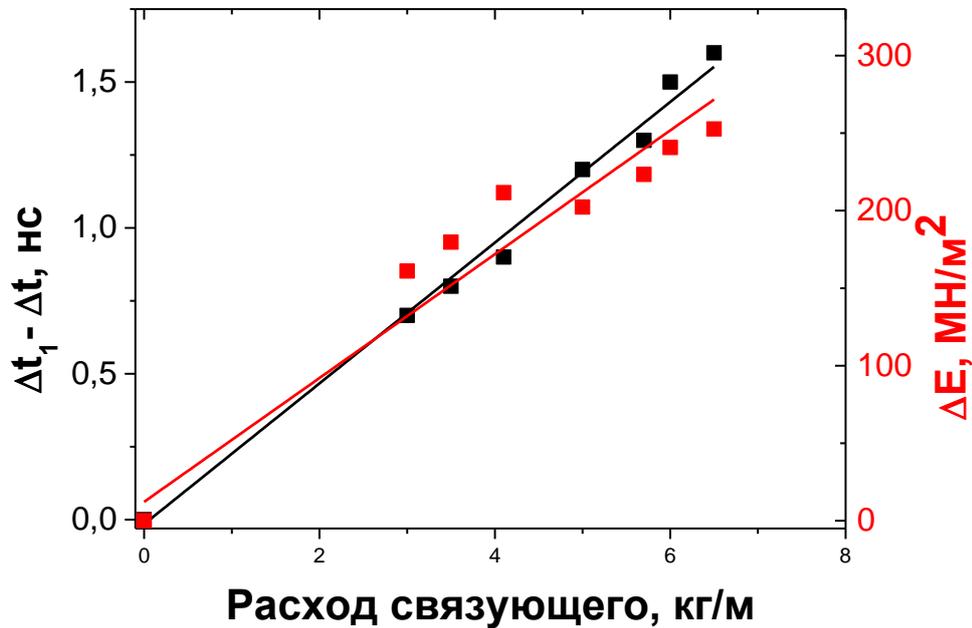


Рисунок 3.9 – Определенное по радарограммам изменение положения нижней границы балластного слоя (черные символы) и модуля упругости (красные символы) в зависимости от расхода вяжущего материала

Сплошными линиями приведены результаты линейной аппроксимации соответствующих величин.

### 3.2.3 Измерение сопротивлений сдвигу плеча балластной призмы

Использование бесстыкового железнодорожного пути требует решения задачи дополнительной стабилизации железнодорожного пути в горизонтальной плотности. Для этой цели разрабатываются новые инженерные решения конструкции верхнего строения, среди которых необходимо выделить безбалластные. К наиболее известным и проверенным безбалластным конструкциям можно отнести конструкции с точечным креплением рельсов:

RHEDA, Bogl, Zublin, LVT, Shinkansen, и со сплошным опиранием рельсов: Embedded Rail Construction (ERC), Tubular Modular Track (T-TRACK).

Вместе с этим балластный путь представляет собой наиболее распространенную конструкцию. Для ее дополнительной стабилизации необходимо увеличивать боковое сопротивление перемещению шпал под действием поездной нагрузки. Возможным решением этой задачи является укрепление плеча балластной призмы, которое обеспечивает, по разным оценкам, от 10 % [110] до 30 % [88] бокового сопротивления сдвигу рельсошпальной решетки в ненагруженном статическом состоянии.

В данной работе для решения указанной задачи использовано укрепление плеча балластной призмы полимерным вяжущим материалом. Через 10 суток после проведения работ по укреплению, когда пропитанный вяжущим материалом балластный слой набрал полную твердость, были выполнены измерения сопротивлений сдвигу плеча балластной призмы прибором ИСС-1 (см. главу 2). Измерения проводились во время технологического перерыва в движении поездов.

На сети железных дорог ОАО «РЖД» на километр пути обычно укладывается 1840 шпал на прямолинейных участках и 2000 шпал в кривых малого радиуса. На участке выполнения работ использованы шпалы типа ШС-2у, изготовленные по ГОСТ 10629-78. Размеры торца этих шпал приведены на рисунке 3.2, а минимальное расстояние между краями шпал составляет не более 200 мм. В связи с этим размеры фрагмента пластины, взаимодействующего с балластом, выбраны равными 200 мм по горизонтали и 196,5 мм по высоте. Площадь этого участка пластины  $39\,300\text{ мм}^2$  совпадает с площадью торца шпалы, взаимодействующей с плечом балластной призмы. Гидроцилиндр прибора фиксируется на рельсе с помощью специального желоба и неподвижен все время измерения вместе с рельсошпальной решеткой. При увеличении давления в гидроцилиндре его поршень воздействует на пластину с силой, определяемой по известным величинам давления и площади поршня (таблица 3.3). Для того чтобы избежать деформации подвижной части прибора при увеличении давления, пластина и поршень выполнены массивными (толщиной 10 мм и диаметром 45 мм) и сварены

сплошным швом. При измерениях давление повышалось плавно до момента прекращения упругой деформации, когда оно переставало расти. Время измерений составляло 40–50 с, сдвиг пластины варьировал от 8 до 18 мм.

Таблица 3.3 – Результаты измерений сопротивлений сдвигу плеча балластной призмы

№ участка	Расход вяжущего материала, кг/пог. м	Сила сопротивления сдвигу, кН
0	0	1,79
1	3,0	16,74
2	3,5	24,12
3	4,1	26,01
4	5,0	29,76
5	5,7	29,04
6	6,0	29,25
7	6,5	28,58

В данной работе значения сопротивлений сдвигу получены усреднением трех независимых измерений и приведены в таблице 3.3 для использованных расходов вяжущего материала. Относительная погрешность измерений составила 10 %. Представленные в указанной таблице значения использованы для построения графика зависимости сопротивления сдвигу плеча балластной призмы от расхода вяжущего материала, приведенного на рисунке 3.10. Полученные экспериментальные значения аппроксимированы полиномом третьей степени (сплошная кривая).

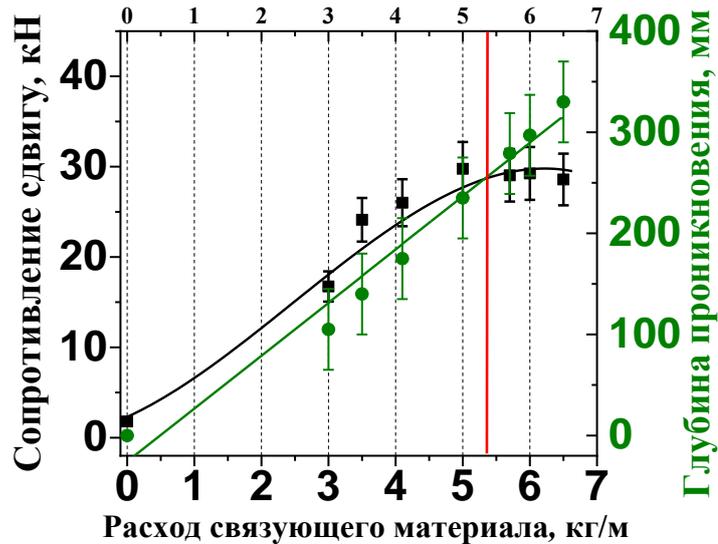


Рисунок 3.10 – Графики зависимостей сопротивления сдвигу плеча балластной призмы (черные квадраты) и глубины проникновения вяжущего материала (зеленые окружности) от его расхода. Коридоры указывают погрешности величиной 10 %

Погрешность определения значений первой зависимости составляет 10 %, второй – принята равной среднему значению линейного размера фракции балластного материала – 40 мм.

На рисунке 3.10 также приведена зависимость глубины проникновения в балластный слой вяжущего материала в зависимости от расхода (см. таблицу 3.2). Погрешности измерений приняты равными среднему значению фракционного состава щебня в балластной призме – 40 мм. Анализ данных рисунка 3.10 показывает, что сопротивление сдвигу плеча балластной призмы растет при увеличении расхода вяжущего материала. Насыщение, регистрируемое с точностью до величины погрешности эксперимента, наступает при расходе свыше 5,5–5,7 кг/пог. м. – несколько раньше, чем достигается укрепление всего балластного слоя (см. таблицу 3.2). При этом боковое сопротивление торца шпалы возрастает в 15 раз по сравнению со случаем неукрепленного плеча балластной призмы. Кроме этого, изменение бокового сопротивления коррелирует с изменением толщины формирующегося при полимеризации вяжущего материала

геокомпозита. Коэффициент корреляции по Пирсону на данном участке графиков достигает значения 0,90.

### ***3.2.4 Измерение смещения шпалы под действием сдвигающей боковой силы***

Технологии измерения боковой устойчивости шпал и фрагментов рельсошпальной решетки изложены в работах [69, 111].

Для выяснения влияния закрепления плеча балластной призмы вяжущим материалом на общее сопротивление сдвигу железобетонная шпала освобождалась от креплений с рельсами. Измерения выполнялись прибором ИСС-2 (см. главу 2).

Измерения силы выполнялось при сдвиге шпалы до 22–25 мм. Результаты измерений приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Величины сдвига шпалы при приложении силы

№	Особенности плеча балластной призмы	Величина сдвига, мм	Величина силы, кН
a	Балласт укреплен (толщина геокомпозита составила 0,35 м)	23	40,2
b	Балласт не укреплен	22	15,0
c	Балласт не укреплен, и отсутствует плечо балластной призмы	22	13,5

Разность сил, приведенных в строках «b» и «c», позволяет определить вклад торца в силу сопротивления поперечному перемещению ненагруженной шпалы значением 1,5 кН, или 10 % от общего сопротивления балласта, при не закрепленном вяжущим материалом плече балластной призмы. Значение 1,5 кН коррелирует с приведенным в таблице 3.3 значением 1,79, полученным с использованием прибора ИСС-1.

Сравнение сил, приведенных в строках «a» и «b», позволяет отметить, что формирование геокомпозита с использованием полимерного вяжущего РТ-КС-001 приводит к росту силы сопротивления сдвигу шпалы призмы в 2,7 раза.

Разность сил, приведенных в этих строках, позволяет оценить вклад в силу сопротивления продольному перемещению со стороны балки геокомпозита толщиной 33 мм значением 25,2 кН, или 63 % от общей силы сопротивления при поперечном перемещении 22–23 мм.

### ***3.2.5 Зависимость смещения шпалы от величины сдвигающей боковой силы***

Изучение взаимодействия подвижного состава и верхнего строения пути является научной проблемой, решение которой направлено на повышение безопасности движения поездов. Важным обстоятельством в этом вопросе является обеспечение боковой устойчивости железнодорожного пути при изменении температуры рельсов и под действием поездной нагрузки. Изучение механизмов устойчивости железнодорожного пути производится не только экспериментальными методами, но и методами математического и компьютерного моделирования [88, 112, 113]. Для решения этой задачи используются возможности сенсорных систем [114].

В настоящее время сложилось мнение о том, что боковая устойчивость железнодорожного пути зависит от типа и состояния балласта, формы шпал и расстояния между ними, типа рельсов и типа их крепления, допустимых боковых воздействий под влиянием движущихся поездов [115, 116, 117]. В связи с этим одной из задач изучения боковой устойчивости пути является исследование взаимодействия шпалы с балластом, которое можно представить в виде отдельных вкладов базы, кроватки и плеча.

На рисунке 3.11 приведены результаты измерения поперечных сил, возникающих при сдвиге шпал, взятые из работ: [117] (\* – шлаковый балласт металлургического производства, + – минеральный балласт); [118] (○); [111] (■); [119] (⊠); [69] (■) – и полученные в данной работе (□). К сожалению, не во всех работах данные испытаний приводятся в виде, позволяющем выполнить определение вклада отдельных элементов конструкции плеча балластной призмы.

Поэтому отдельный вклад плеча в общее поперечное сопротивление конструкции взят только из работы [69] и приведен на рисунке 3.11 в виде перевернутого треугольника (▼). Важным обстоятельством явилось то, что приведенная в этой работе конструкция балластной призмы имеет геометрические размеры, близкие к размерам призмы, рассмотренной в настоящем исследовании. Результаты последнего также приведены на рисунке 3.11 символом (▽). Из рисунка 3.11 видно, что вклад плеча балластной призмы в общее сопротивление конструкции поперечному сдвигу не превышает 10.

На рисунке 3.11 также представлены силы сопротивления поперечному сдвигу со стороны геокompозита. Для их измерения использован специально сконструированный прибор ИСС-1, особенности конструкции которого рассмотрены в главе 2. Результаты измерений изображены символами (▼). Интерес представляет определение силы сопротивления конструкции балластной призмы с монолитным плечом при критических смещениях шпал в поперечном направлении. Ее величина при смещении шпалы на 20 мм показана на рисунке 3.11 символом (■).

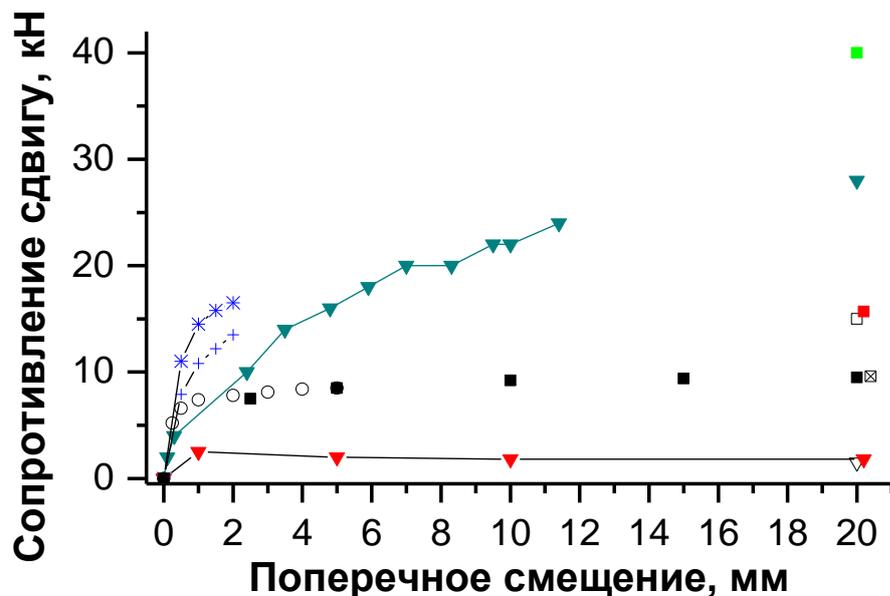


Рисунок 3.11 – Сила сопротивления балластной призмы боковому перемещению шпалы

Анализ опыта строительства балластных призм в разных странах позволяет отметить их конструкционное многообразие. При этом, как видно на рисунке 3.11, разброс конструктивных особенностей при поперечных смещениях, превышающих 2 мм, приводит к увеличению силы сопротивления в диапазоне 8–17 кН, то есть более чем в два раза.

В работе [69] приводится мнение Европейского исследовательского института железных дорог (ERRI) о том, что на ненагруженном пути шпальные ящики и балласт в основании шпалы вносят приблизительно по 1/3 каждый в поперечное сопротивление шпалы. В этом случае балластное плечо с типичными размерами должно обеспечивать около 1/3 поперечного сопротивления. В настоящем исследовании балластное плечо из щебеночного материала с типичными размерами вносит вклад менее 10 % в величину общего сопротивления балласта. Ситуация меняется при омоноличивании плеча полимерными связующими. На рисунке 3.11 видно, что при сдвигах, превышающих 30–40 мм, вклад геокомпозитной балки начинает определять общую силу сопротивления боковому смещению шпалы. Очевидно, что с ростом бокового перемещения шпалы сила сопротивления геокомпозитной балки будет нарастать до момента ее разрушения, наступающего при достижении критических углов изгиба.

Наблюдаемый на рисунке 3.11 рост сопротивления поперечному сдвигу шпалы со стороны балластной призмы с омоноличенным плечом связан с механическими свойствами сформированной балки геокомпозита. Сила сопротивления зависит от размеров сечения геокомпозитной балки и ее длины.

На рисунке 3.12 приведены силы сопротивления геокомпозита глубиной 33 см (▼), 17 см (▼) и силы, возникающие в незакрепленном плече ([69] – ▼). В последнем случае при движении балластного материала плеча под действием движущейся шпалы, начиная с некоторых перемещений, сила сопротивления плеча уменьшается из-за осыпания балласта.

Данные, приведенные на рисунке 3.12, позволяют связать расход вяжущего материала и толщину образующегося геокомпозита исходя из необходимой силы сопротивления. Однако для уменьшения возможных продольных перемещений

желательно формировать геокомпозит максимальной возможной толщины, о чем свидетельствует начальная область (первые 1–2 мм) зависимостей на рисунке 3.11.

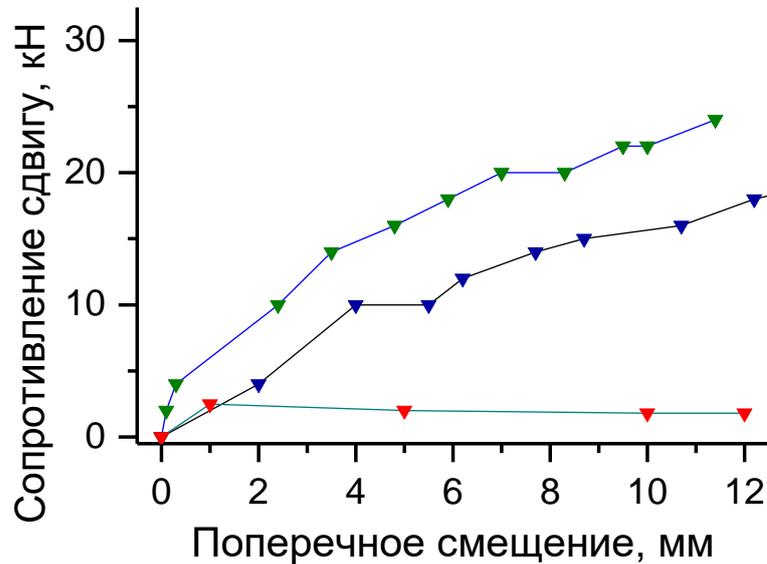


Рисунок 3.12 – Зависимость силы сопротивления плеча балластной призмы от бокового сдвига шпалы

При применении вяжущих материалов сила сопротивления сформированной геокомпозитной балки будет зависеть не только от геометрических размеров, но и от прочностных и адгезионных свойств и текучести композита, загрязненности балластного материала, механических нагрузок на путь в процессе образования геокомпозита.

Очевидно, что прочностные свойства геокомпозитной балки, полученные в лабораторных условиях в работе [88] и близкие к 400 кН, являются возможной верхней границей сил сопротивления боковому смещению при выполнении работ в полевых условиях.

### ***3.2.6 Проверка ремонтпригодности укрепленного балластного слоя***

Использование полимерных вяжущих материалов для закрепления балластного слоя требует изучения вопроса ремонтпригодности конструкции

верхнего строения пути. Для оценки возможности выполнения ремонтно-путевых работ и определения фракционного состава частиц геокомпозита, разрушенного рабочими органами путевых машин, произведена очистка участка железнодорожного пути щебнеочистительной машиной ЩОМ-1200, а также выправка и подбивка пути машиной ВПР-02 (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Закрепленный балластный слой после работы машин тяжелого типа

На рисунке видно, что проведение закрепления балласта с последующей очисткой балластного материала и проведением выправочно-подбивочных работ не препятствует разрушению балластного слоя машинами тяжелого типа.

### **3.3 Выводы**

В работе изложены результаты определения свойств балластной призмы, укрепленной двухкомпонентным вяжущим материалом на основе полиуретана РТ-КС-001.

1. Проведенные исследования показали, что изменение расхода вяжущего материала до образования геокомпозита на всю глубину балластной призмы позволяет увеличивать модуль упругости в 4 раза - от значения 77 МПа до значения 320 МПа.

2. В пределах от 77 МПа до 320 МПа применение полимерного вяжущего материала позволит создавать участки железнодорожного пути на балластном основании заданной жесткости, соответствующей требованиям подвижного состава и особенностям конструкции железнодорожного пути.

3. Закрепление плеча балластной призмы вяжущим материалом РТ-КС-001 позволяет повысить общее статическое сопротивление ненагруженной шпалы при приложении боковой нагрузки в 2,7 раза. При этом использование вяжущего материала на основе полиуретана не препятствует проведению ремонтно-путевых работ с применением выправочно-подбивочно-рихтовочных и щебнеочистительных машин.

4. Разработанный метод георадиолокации позволяет контролировать толщину формируемого геокомпозита при омоноличивании балластного слоя протяженных участков железных дорог, верифицируя результаты обработки георадиолокационных данных прямыми измерениями в отдельных точках железнодорожного пути.

#### **4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЯЖУЩЕГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ**

Глава посвящена решению третьей задачи исследования: «Разработка технологии организации участков переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям омоноличиванием балластного слоя».

Эксплуатационные характеристики конструктивных элементов пути находящихся на подходах к мостам, путепроводам, тоннелям и т.п., при длительном использовании в современных условиях зависят от свойств конструкции переходных участков, призванных согласовать механические свойства пути на подходе и на искусственных сооружениях (мостах, тоннелях и др.). Известно [92, 93], что есть значительные различия в жесткости рельсового пути на балластном основании и на искусственных сооружениях, в этой связи существует большая необходимость в организации переходных участков. Это влечет возникновение динамических нагрузок на железнодорожный путь и искусственное сооружение со стороны подвижного состава, величина которых связана со свойствами переходного участка, а также скоростью и нагруженностью подвижного состава. Отсутствие переходных участков или несоответствие их свойств объектам инфраструктуры и условиям организации перевозочного процесса приводит к повышенному накоплению расстройств пути в зоне его примыкания к искусственному сооружению.

Мировой опыт по организации участков переменной жесткости и методы решения этой проблемы рассмотрены в работе [98]. Организация переходных участков для безбалластного пути на сети железных дорог ОАО «РЖД» регламентирована нормативными документами [99, 95]. В мировой и национальной практике строительства конструкций переходных участков существует ряд технических решений, опыт организации и эксплуатации которых выявил их сложность и дороговизну. В практике эксплуатации железных дорог,

когда широкое практическое применение находят полимерные вяжущие материалы [76, 77, 81–83, 86, 87], проблема организации переходных участков может решаться методом управления жесткостью пути омоноличиванием балластного материала или комплексным методом, включающим омоноличивание балластного материала и использование типовых конструкций. Известны технологии омоноличивания балластного материала без заметного ухудшения его дренирующих свойств [84].

В данной главе представлены результаты исследования возможности применения вяжущего материала для организации переходных участков железнодорожного пути переменной жесткости [120, 121, 122]. Вместе с этим показано, что контроль расхода вяжущего материала, сплошности и глубины омоноличивания на протяженных участках железнодорожного пути можно выполнять неразрушающими геофизическими и вибродинамическими методами измерений. В настоящей главе изучается изменение волновой картины радарограмм, вибродинамических и деформационных характеристик балластного слоя железнодорожного пути в процессе организации переходного участка переменной жесткости с помощью вяжущего материала.

#### **4.1 Используемое оборудование**

Все работы по организации переходного участка переменной жесткости с помощью вяжущего материала сопровождались соответствующими измерениями для контроля параметров балластной призмы железнодорожного пути.

Для контроля сплошности и глубины омоноличивания выполнялись георадиолокационные измерения с использованием ручной тележки, оснащенной георадаром серии «ОКО», состоящим из антенн рупорного типа АБ-400 МГц и АБ-1700 МГц (принцип его работы и методика измерений описаны в главе 2). Данный геофизический метод, как инструмент получения объективной информации о состоянии инженерных объектов, в настоящее время широко применяется в сфере железнодорожного транспорта при выполнении инженерно-изыскательских работ,

диагностике объектов инженерной инфраструктуры [123], контроле качества строительных и ремонтных работ [124].

Поскольку метод омоноличивания балластного материала позволяет регулировать жесткость рельсовой конструкции пути [86], для контроля плавности изменения механических характеристик участка пути необходимо выполнять оценку модуля упругости с использованием прибора ПДУ-МГ4, принцип работы которого и методика измерений описаны в главе 2.

Для оценки влияния на конструкцию пути с омоноличенным балластным материалом, оказываемого динамической составляющей движущегося подвижного состава, выполнены записи сейсмических колебаний в диапазоне частот от 1 до 80 Гц. Для регистрации колебаний использован трехкомпонентный низкочастотный сейсмометр «LE – 3 DliteMkII» и блок-регистрации «Дельта-03».

#### **4.2 Опытная проверка технического решения по устройству переходного участка железнодорожного пути на основе полимерного вяжущего материала**

Для проверки эффективности рассматриваемой технологии устройства участков, имеющих переменную жесткость, были проведены натурные эксперименты на участке пути, расположенном на 1950-м км ПК7 перегона Лоо – Дагомыс СКЖД. На данном участке расположен железобетонный мост, состоящий из трех пролетов, общей длиной 44 м.

Экспериментальный однопутный участок пути имеет бесстыковую конструкцию пути на щебеночном балласте, рельсы Р65, шпалы железобетонные с эпюрой 2000 шт/км. Верхнее строение пути расположено на насыпи высотой до 10 м (в районе моста), переходящей в нулевое место (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Общий вид объекта исследования

С учетом требований, предъявляемых к состоянию балластной призмы [102], глубина проникновения вяжущего материала при омоноличивании щебеночного балласта в значительной степени зависит от фракции щебня и засоренности балластного материала. Для оценки этих параметров на экспериментальном участке выполнено определение загрязненности балласта в соответствии с методикой, изложенной в [103]. Результаты рассева проб балластного материала представлены в рисунке 4.2.

На графике (см. рисунок 4.2) за нулевую координату принято расположение шкафной стенки моста со стороны Сочи. Увеличение координаты соответствует направлению роста километра, т.е. движению на юг.

В результате анализа данных было установлено, что на выбранном участке пути загрязненность балластного материала находится в пределах нормативных значений. Предварительная очистка перед обработкой вяжущим материалом не требуется [102].

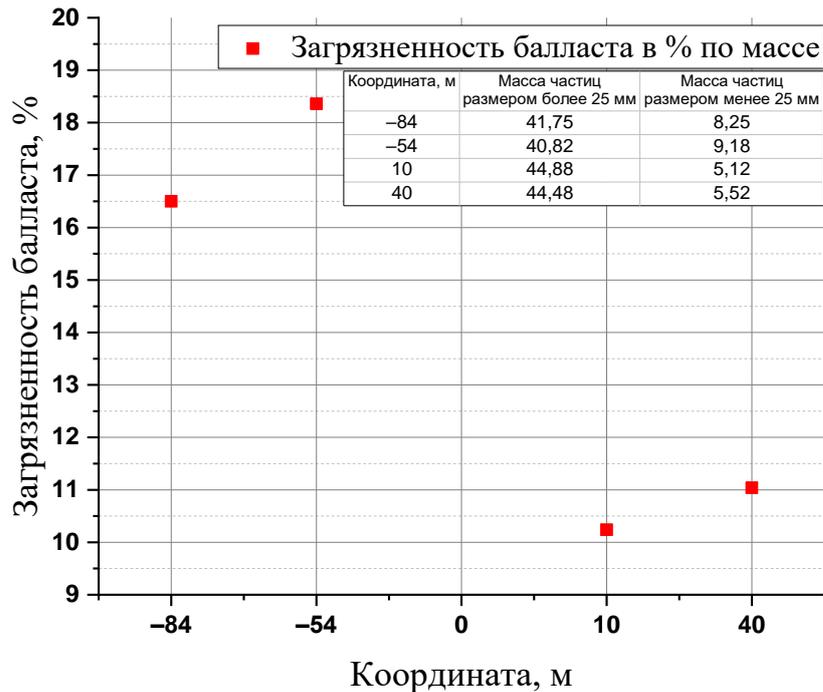


Рисунок 4.2 – Параметры загрязненности балластного материала на экспериментальном участке

Омоноличивание балластного слоя для устройства участка железнодорожного пути переменной жесткости было выполнено в соответствии со схемой, изображенной на рисунке 4.3. Заливка вяжущим проводилась с учетом накопленного опыта [126, 127] на всю ширину балластной призмы.

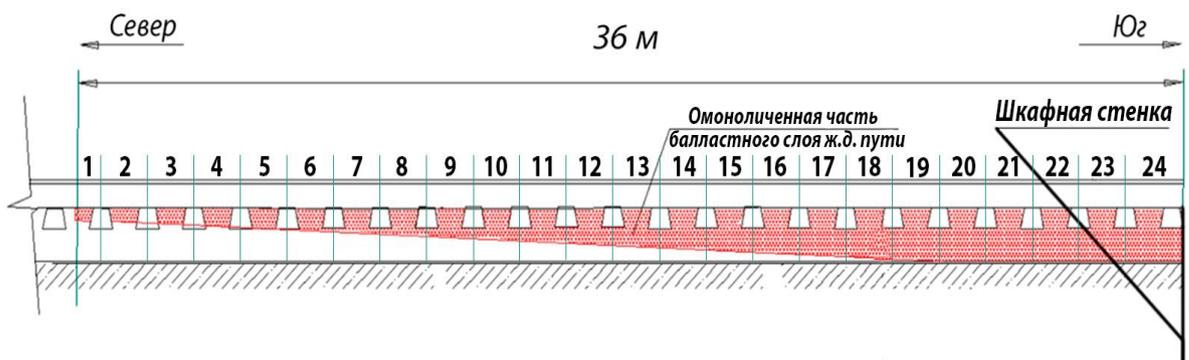


Рисунок 4.3 – Схема участка железнодорожного пути переменной жесткости с использованием вяжущего материала

На основе анализа различных видов полимерных вяжущих материалов в исследовании была принята двухкомпонентная полиуретановая система РТ-КС-

001. Работы по омоноличиванию экспериментального участка выполнены в соответствии с инструкцией по применению двухкомпонентной полиуретановой системы ДПС-РТ-КС-001, в период отсутствия осадков, при средней температуре воздуха 20 °С и относительной влажности воздуха не более 50 %. Такое сочетание природно-климатических факторов обеспечивает постоянство химического состава вяжущего материала, а также необходимую вязкость [110].

В соответствии с распоряжением ОАО «РЖД» от 12 декабря 2013 г. № 2754р об утверждении и введении в действие «Инструкции по применению конструктивно-технологических решений переходных участков на подходах к искусственным сооружениям для участков скоростного совмещенного движения» длина переходного участка определяется для каждого конкретного места, но должна быть не менее 25 м. В данной работе формирование геокомпозита выполнено с изменением расхода через два шпальных ящика. В формировании геокомпозита было задействовано 24 шпальных ящика, так что длина переходного

участка составила:  $s = \frac{1000}{1840} \cdot 2 \cdot 24 = 36$  (м). Определим расход вяжущего материала

из условий, что в непосредственной близости от ИССО геокомпозит имеет максимальную толщину 0,30 м и на переходном участке его толщина меняется линейно и выходит на 24-й участок толщиной 0,10 м, не меняя свойства балласта под шпалой. Определим расход геокомпозита по участкам работы при таких условиях.

Из таблицы 3.2 следует, что для создания геокомпозита толщиной 0,3 м шириной 0,45 м и откосной частью требуется расход вяжущего материала, равный 6 кг/пог. м, или 29,6 кг/м<sup>3</sup>.

Из рисунка 3.8 и таблицы 3.2 следует, что при модуле упругости ИССО 300 МПа необходимо обеспечить проникновение вяжущего материала в балласт на глубину примерно 0,3 м. При этом общий объем закрепляемого балласта в двух шпальных ящиках с учетом откосов и за вычетом объема шпал на однопутном участке пути составляет 1,21 м<sup>3</sup>, или 1,1 м<sup>3</sup> на погонный метр. Для закрепления этого объема необходимо 33 кг вяжущего материала.

Для закрепления 24-го участка требуется вяжущего материала 7,7 кг.

Выбранный участок железнодорожного пути перед началом работ по омоноличиванию балластного слоя был разделен на фрагменты, каждый из которых был залит с различным расходом (таблица 4.1) вяжущего материала на погонный метр пути (пог. м п.). Балластный материал в рамках железнодорожного моста не был подвержен омоноличиванию.

Таблица 4.1 – Расход вяжущего материала для каждого фрагмента северного подхода к мосту

№ фрагмента	Расход вяжущего материала, кг/пог. м п.	№ фрагмента	Расход вяжущего материала, кг/пог. м п.
1	7,7	13	20,9
2	8,8	14	22,0
3	9,9	15	23,1
4	11,0	16	24,2
5	12,1	17	25,3
6	13,2	18	26,4
7	14,3	19	27,5
8	15,4	20	28,6
9	16,5	21	29,7
10	17,6	22	30,8
11	18,7	23	31,9
12	19,8	24	33,0

#### **4.3 Контроль сплошности и глубины омоноличивания балластного материала методом георадиолокации**

Для контроля сплошности и глубины омоноличивания выполнялись георадиолокационные измерения с использованием ручной тележки, оснащенной

георадаром серии «ОКО», состоящим из антенн рупорного типа АБ-400 МГц и АБ-1700 МГц (рисунок 4.4).

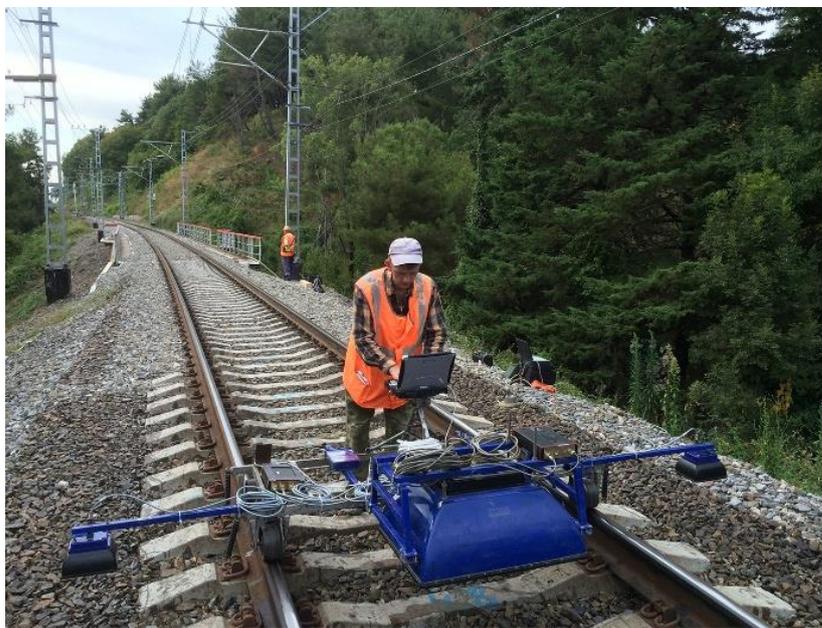


Рисунок 4.4 – Георадиолокационное обследование

По результатам контроля были получены радарограммы, на которых с помощью меток отмечались границы фрагментов с одинаковым расходом вяжущего материала. Для качественной обработки радарограмм была выполнена тарировка данных георадиолокации: вдоль траектории георадиолокационных измерений произведены заверочные шурфления, по которым определена толщина балластного слоя, необходимая для задания соответствующих параметров тарировки (рисунок 4.5).

Обработка результатов георадиолокационных измерений производилась с использованием специализированного программного обеспечения [128, 129, 130].



Рисунок 4.5 – Определение толщины балластного слоя железнодорожного пути

Выполнялись следующие процедуры:

- оценка информационной устойчивости результатов;
- обработка и маркировка радарограмм;
- привязка радарограмм к существующему железнодорожному пикетажу.

Для контроля сплошности и глубины омоноличивания балластного слоя обработка радарограмм выполнялась в следующей последовательности:

1) «вычитание с окном» (удаляются регулярные помехи, например прямое прохождение сигнала из передающей антенны в приемную);

2) «полосовая фильтрация» помех (используется для повышения соотношения сигнал/шум, а также для подавления неинформационных участков трассы радарограммы, образованных от работы аппаратуры и сигналов, отраженных от поверхностных объектов;

3) использование набора процедур, улучшающих качество «полезного» сигнала, соответствующего границе области омоноличивания.

Результаты интерпретации радарограмм для северной стороны, представлены на рисунке 4.6.

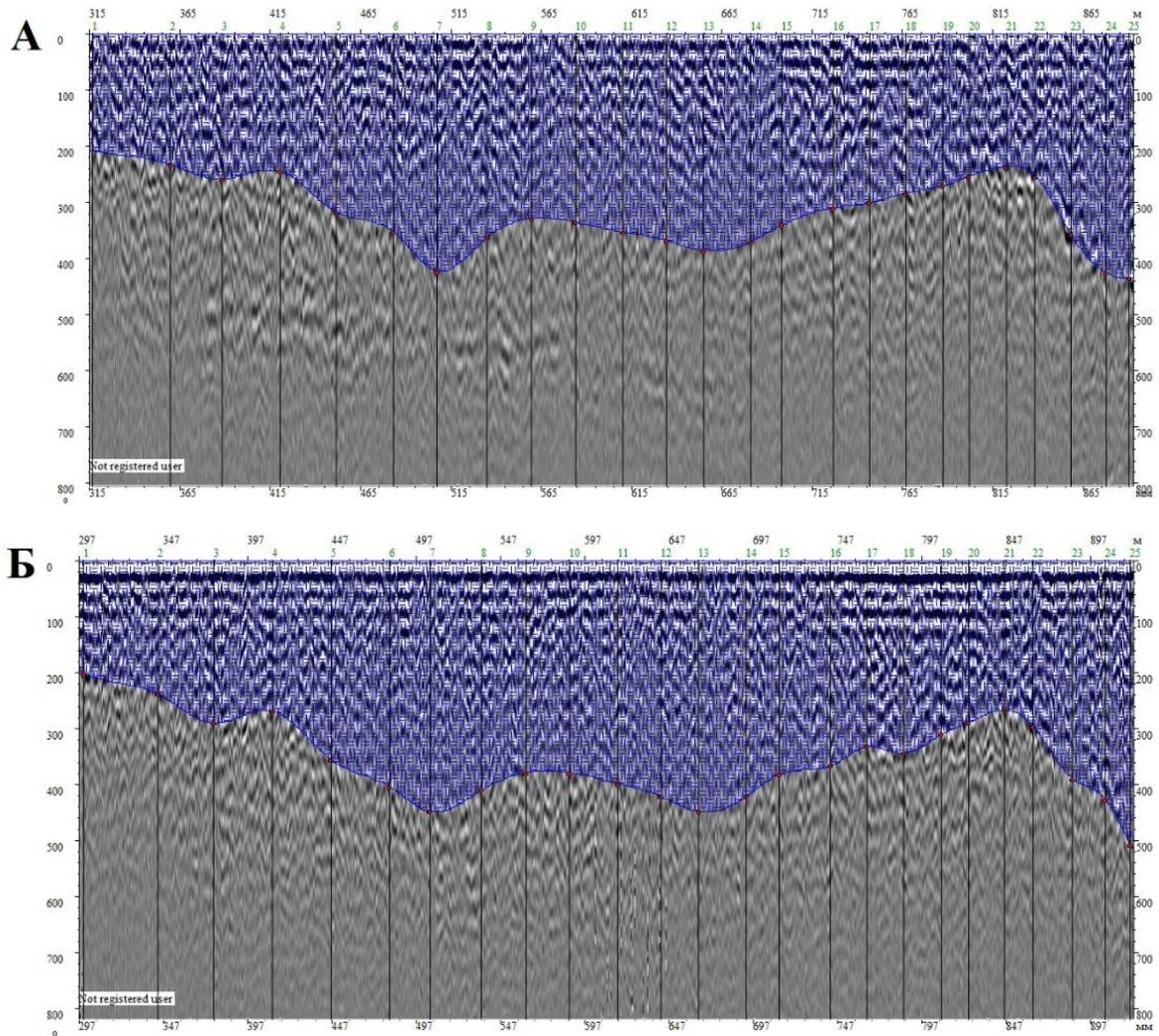


Рисунок 4.6 – Обработанные радарограммы участка пути:

А – до выполнения работ по омоноличиванию;

Б – после выполнения работ по омоноличиванию

Предположим, что глубина проникновения вяжущего материала зависит от его расхода, измеряемого на погонный метр пути (кг/пог. м п.).

Свяжем расход вяжущего материала с положением нижней границы балластного слоя на радарограмме, величина которого определяется средним значением показателя преломления ( $\bar{n}_g$ ) частично омоноличенного балластного слоя.

Будем сопоставлять расход вяжущего материала и относительное изменение показателя преломления балластного слоя, выражение для расчета которого можно

получить из (3.8) усреднением показателя преломления геокомпозита на всю глубину балластного слоя ( $\bar{n}_g$ ):

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{\bar{n}_g - n}{n} = \frac{c}{nl} (\Delta t_g - \Delta t), \quad (4.1)$$

где  $n$  – показатель преломления балластного материала,  $\Delta t_g - \Delta t$  – изменение положения границы раздела балластного слоя и подбалластного основания в процессе омоноличивания.

На рисунке 4.6 представлены результаты сравнения расхода вяжущего материала с относительным изменением показателя преломления балластного слоя толщины  $l$ .

Таким образом, определяя  $\Delta t_g - \Delta t$  по данным георадиолокационных измерений (например, приведенных на рисунке 4.6), можно вычислить относительное изменение показателя преломления по формуле (4.1) и восстановить расход вяжущего материала, используя данные, приведенные на рисунке 4.7.

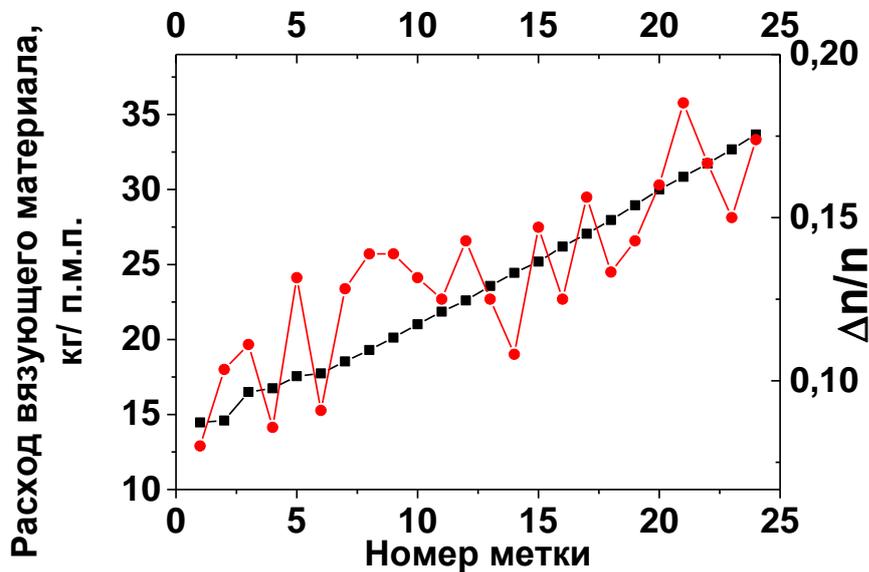


Рисунок 4.7 – Сравнение расхода вяжущего материала и относительного изменения показателя преломления балластного слоя при его частичном омоноличивании

Рисунок 4.7 демонстрирует достаточно приемлемое схождение в значениях объема вяжущего материала при его увеличении и изменение показателя преломления, определенного из радарограмм. Такой результат позволяет использовать метод георадиолокации для контроля глубины проникновения и качества омоноличивания балластной призмы на протяженных участках выполнения работ.

#### 4.4 Изучение механических свойств омоноличенного балластного материала

Исходя из возможности регулирования жесткости железнодорожного пути добавлением в балластную призму полимерного вяжущего [22, 23] на следующем этапе исследований были выполнены измерения степени уплотнения железнодорожного полотна. Определение данного показателя выполнялось посредством применения ПДУ-МГ4.

На рисунке 4.8 представлены значения модуля упругости, полученные в ходе испытания указанного ранее омоноличенного участка пути.

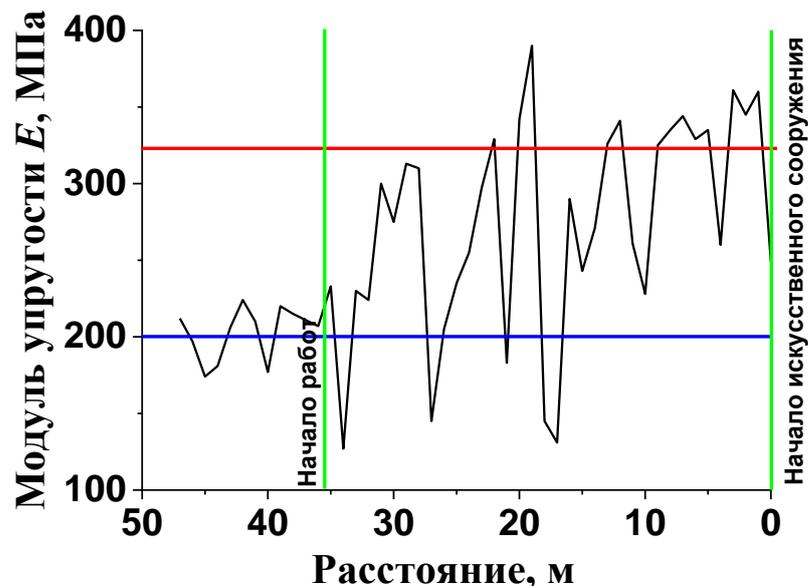


Рисунок 4.8 – Определение модуля упругости балластной призмы.

Горизонтальными линиями отмечены модули упругости, взятые из рисунка 3,8, для толщин геокompозита 0,3 (—) м и 0,0 м (—)

Из результатов выполненной работы следует, что применение вяжущего вещества позволяет повысить модуль упругости омоноличенного балластного слоя. При разработке технологического процесса по устройству участков переменной жесткости и учета расхода вяжущего материала на подходах к искусственным сооружениям следует принимать во внимание исходную жесткость конструкции пути и сооружения.

#### **4.5 Оценка динамического воздействия подвижного состава на железнодорожный путь**

Для решения задачи оценки динамического воздействия подвижного состава на железнодорожный путь был применен вибростатистический метод [131], что позволило зафиксировать амплитудные характеристики колебательного процесса под действием проходящего подвижного состава.

В ходе испытаний регистрации колебаний балластной призмы был задействован комплекс, состоящий из сейсмического низкочастотного датчика, позволяющего регистрировать колебания в трех направлениях, датчика сейсмических колебаний (LE – 3D lite) и блока регистрации (Дельта-03). Данный датчик был размещен на специальной платформе на обочине пути, как показано на рисунке 4.9, А, и на оси пути, на шпале (рисунок 4.9, Б). Запись сигнала осуществлялась в диапазоне частот от 1 до 80 Гц.

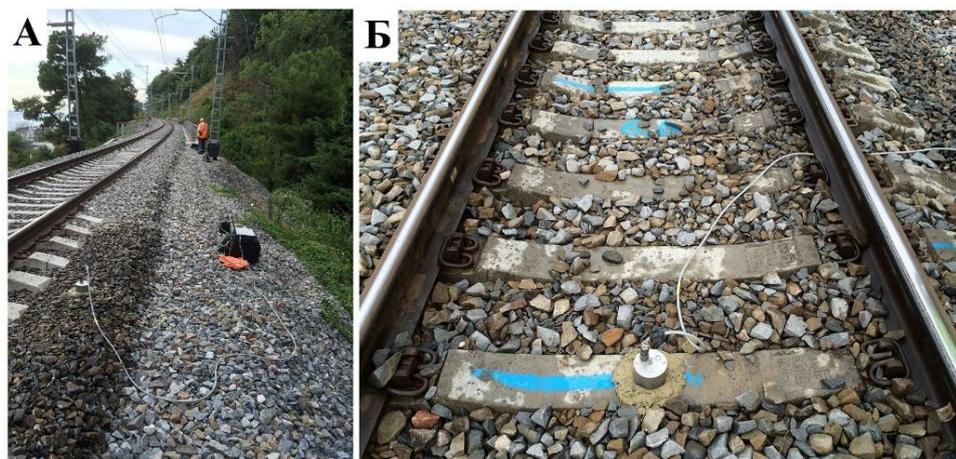


Рисунок 4.9 – Вибростатистические измерения

Полученные показатели виброскорости ( $V(t)$ ) подвергались Фурье-преобразованию:

$$A(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} V(t)e^{-ivt} dt, \quad (4.2)$$

после чего определялась средневзвешенная частота спектра:

$$v_{\text{cp}} = \frac{\int_0^{\infty} A(v)v dv}{\int_0^{\infty} A(v) dv}. \quad (4.3)$$

Полученные результаты расчета средневзвешенной частоты виброскоростей приведены на рисунке 4.10, А, а на рисунке 4.10, Б представлено сравнение результатов расчета средневзвешенной амплитуды виброскоростей. Данные для расчётов получены в ходе регистрации прохождения пассажирского электропоезда «Ласточка».

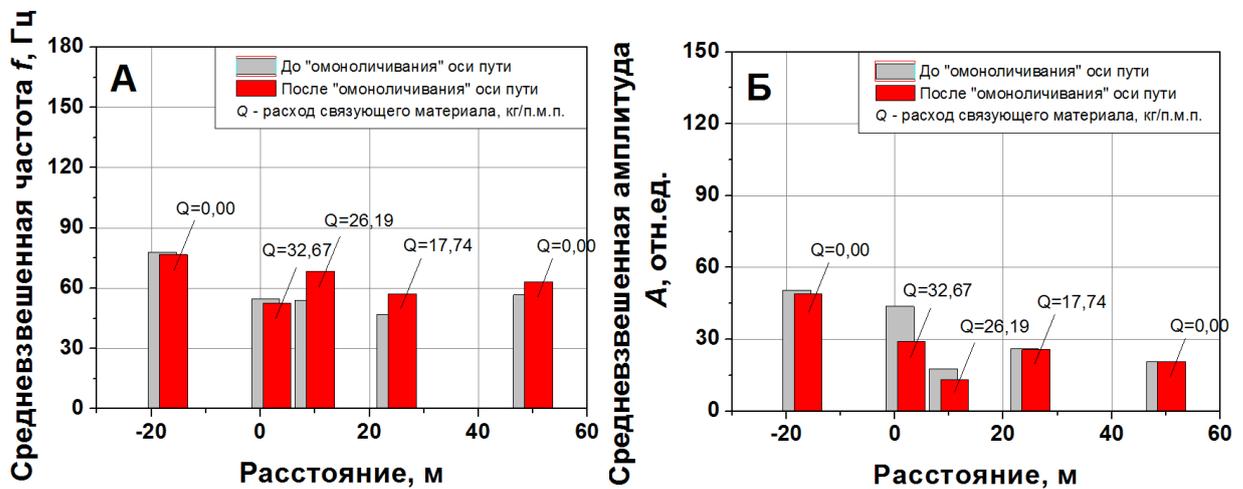


Рисунок 4.10 – Расчет средневзвешенной частоты (А) и амплитуды (Б) виброскоростей (датчик установлен на оси пути, на шпале)

Анализ данных, представленных на рисунках 4.10, А, Б позволяет отметить, что омоноличивание балластной призмы приводит к подавлению низкочастотных колебаний и к снижению средневзвешенной амплитуды виброскоростей.

## 4.6 Выводы

1. Показано, что метод георадиолокации может быть использован для контроля глубины омоноличивания балластной призмы на больших по протяженности участках железнодорожного пути.

2. Применение полимерных вяжущих материалов позволяет повысить модуль упругости балластной призмы, а также приводит к подавлению низкочастотных составляющих спектра колебаний железнодорожного пути при воздействии подвижного состава. При этом наблюдаются уменьшение средневзвешенной амплитуды колебаний и сдвиг средневзвешенной частоты в высокочастотную область. Численные значения указанных изменений зависят от расхода вяжущего материала.

3. Представленная в данной работе технология создания и мониторинга участков железнодорожного пути, закрепленного полимерными вяжущими материалами, может лечь в основу создания конструкции железнодорожного пути с улучшенными физико-механическими и динамическими характеристиками.

4. Исследования, направленные на разработку технологии организации участков пути переменной жесткости на действующих участках железных дорог методом омоноличивания балластной призмы, позволяют обосновать необходимую толщину геокомпозита, расход вяжущего материала и длину переходного участка.

## **5 ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИУРЕТАНА**

### **5.1 Изготовление экспериментальных образцов геокомпозита с использованием модифицированного полиуретанового вяжущего материала для конструкции верхнего строения железнодорожного пути**

Глава посвящена решению задачи «Разработка метода улучшения свойств двухкомпонентных вяжущих материалов на основе полиуретана, применяемых для решения первой и третьей задач». Поиск решения задачи связан с необходимостью создавать геокомпозиты с улучшенными свойствами, поскольку внедрение перспективного подвижного состава приведет к росту статического и динамического воздействия на путь.

В главе приводятся результаты испытаний свойств экспериментальных образцов геокомпозита с улучшенными свойствами.

Анализ имеющейся литературы позволяет связать решение рассматриваемой задачи с модификацией свойств полиуретана добавлением графена [132–133], углеродных нанотрубок [134–135], наноцеллюлозы [136–137], оксида цинка [138], нанокремнезема [139].

Улучшение механических свойств геокомпозита в данной работе было выполнено применением функциональных наноматериалов [140] на основе органомодифицированных наночастиц монтмориллонита с характеристиками, указанными в [141].

В изготовлении экспериментальных образцов была задействована двухкомпонентная система, применявшаяся ранее (главы 3–4) и содержащая полиуретановый компонент и отверждаемое соединение. В качестве наполнителя при изготовлении геокомпозита был использован щебень (ГОСТ 7392-2002, ГОСТ 8267-93, ТУ с изм. № 1, 2, 3, 4) с характеристиками, представленными в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Характеристики сырья – щебня (наполнителя)

Характеристика	Значение
1. Фракционный состав, мм	не ниже 25 не выше 30
2. Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы, % по массе	не более 18
3. Содержание зерен слабых пород, % по массе	не более 5
4. Средняя плотность зерен, г/см <sup>3</sup>	не ниже 2 не выше 3
5. Морозостойкость: – замораживание – оттаивание, число циклов – потеря массы после испытания, %	15 не более 10

Выбор органического соединения для модификации наночастиц монтмориллонита, обеспечивающего лучшую совместимость данного минерального наполнителя с полиуретановой полимерной матрицей, осуществлен в рамках экспериментальных исследований в работе [142]. Характеристики органического модификатора приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Характеристики химических соединений, используемых для получения органомодифицированного монтмориллонита

Наименование соединения	Аббревиатура	Химическая формула	Массовая доля основного в-ва, %	Массовая доля свободных аминов, %, не более	Растворитель
Дидецилдиметиламмония хлорид	DDA.70	$\left[ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{R} - \text{N} - \text{CH}_3 \\   \\ \text{R} \end{array} \right]^+ \text{Cl}^-$ <p>R – алкил C<sub>10</sub></p>	68,0–72,0	0,7	Этиленгликоль Вода

Выбранное органическое соединение обеспечивает усиление взаимодействия между минералом и полимерной матрицей, приводящее к улучшению механических свойств вяжущего материала. В данной работе в полимерную матрицу добавлялось 5 % (по массе) данного наполнителя.

### ***5.1.1 Назначение и спецификация оборудования для изготовления экспериментальных образцов***

Для изготовления экспериментальных образцов использовалось следующее оборудование (см. главу 2):

- комплект сит для щебня и формы для геокомпозита;
- испытательная климатическая камера;
- верхнеприводная мешалка модели RZR 2020 фирмы Heidolph;
- сушильный шкаф лабораторный.

### ***5.1.2 Технологический процесс и схема изготовления экспериментальных образцов***

Изготовление экспериментальных образцов геокомпозита с использованием модифицированного полиуретанового вяжущего материала для конструкции балластного слоя железнодорожного пути выполнено на базе научно-образовательного центра «Диагностика объектов инженерной инфраструктуры» (НОЦ ДООИ) ФГБОУ ВО РГУПС. На рисунках 5.1 и 5.2 представлены технологические схемы подготовки сырья, изготовления экспериментальных образцов и их подготовки к исследовательским испытаниям соответственно.



Рисунок 5.1 – Технологическая схема изготовления экспериментальных образцов

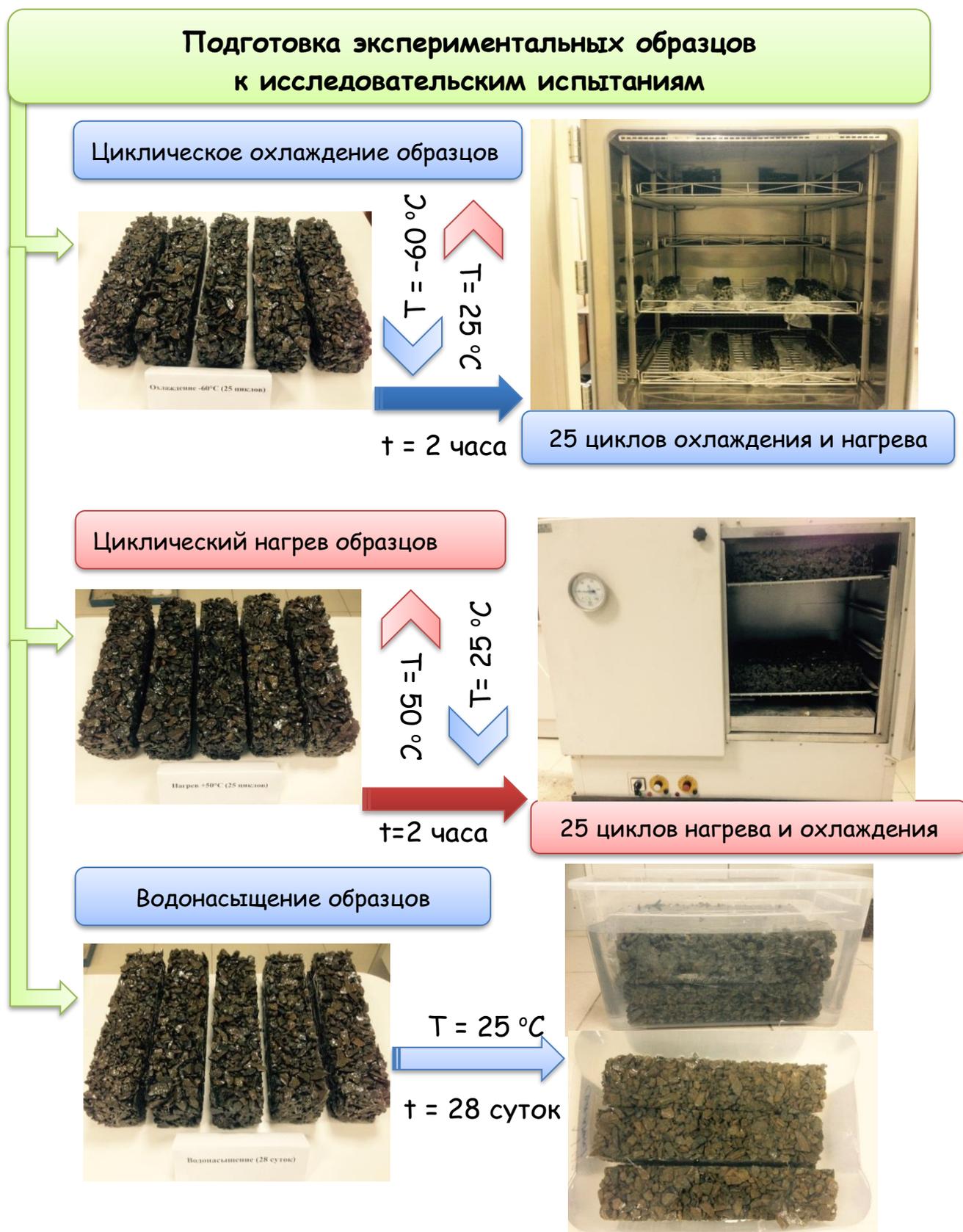


Рисунок 5.2 – Технологическая схема подготовки экспериментальных образцов к исследовательским испытаниям

Технологический процесс изготовления экспериментальных образцов геокомпозита с использованием модифицированного полиуретанового вяжущего материала для конструкции балластного слоя железнодорожного пути включал:

а) подготовку щебня и наполнителя-полимера. Для подготовки щебня были осуществлены очистка и фракционирование с использованием комплекта сит ГОСТ 33029-2014 в соответствии с таблицей 5.1. Компоненты дополнительно подвергались термической обработке в течение 5 часов при температуре 70 °С для удаления излишков влаги;

б) подготовку полимерной композиции. Процесс осуществлялся механическим смешиванием полиуретанового вяжущего материала с подготовленным функциональным наполнителем посредством механической мешалки в течение 2 часов со скоростью 50 с<sup>-1</sup> до получения однородной смеси. Затем полученная однородная масса помещалась в ультразвуковую ванну на 3 минуты для дополнительной гомогенизации;

в) формование экспериментальных образцов, которое осуществлялось смешиванием компонентов полиуретановой системы в пропорции 100:65 с отвердителем и гомогенизированным функциональным наполнителем. Предварительно выполнялась дегазация полученной однородной смеси. Далее смесь выливалась в емкость, в которой находился щебень, для перемешивания. Полученная композиция перемещалась в формы, которые оставались на воздухе в течение 24 часов при нормальных условиях до полного завершения реакции полимеризации. Затем твердый продукт вынимался из формы. Геокомпозит-тело, полученное таким образом, сохраняло форму внутреннего рельефа емкости.

С использованием испытательной климатической камеры серия из пяти экспериментальных образцов с маркировкой ТМ602/1, ТМ602/2, ТМ602/3, ТМ602/4, ТМ602/5, представленных на рисунке 5.3, была подвергнута циклическому воздействию температуры минус 60 °С в течение 2 часов с последующим нагревом до комнатной температуры. Общее количество циклов – 25.



Рисунок 5.3 – Общий вид экспериментальных образцов серии ТМ602

С использованием лабораторного сушильного шкафа серия из пяти экспериментальных образцов с маркировкой ТП502/1, ТП502/2, ТП502/3, ТП502/4, ТП502/5, представленных на рисунке 5.4, была подвергнута циклическому воздействию температуры 50 °С в течение 2 часов с последующим охлаждением до комнатной температуры. Общее количество циклов – 25.



Рисунок 5.4 – Общий вид экспериментальных образцов серии ТП502

Серия из пяти экспериментальных образцов с маркировкой ДВ2824/1, ДВ2824/2, ДВ2824/3, ДВ2824/4, ДВ2824/5, представленных на рисунке 5.5, была выдержана в дистиллированной воде в течение 28 суток.



Рисунок 5.5 – Общий вид экспериментальных образцов серии ДВ2824

Для определения адгезионной прочности была изготовлена серия из пяти экспериментальных образцов с маркировкой АП2404/1, АП2404/2, АП2404/3, АП2404/4, АП2404/5, представленных на рисунке 5.6, полученная путем склеивания двух отдельных предварительно очищенных щебенков фракции 25 мм с использованием подготовленной полимерной композиции.



Рисунок 5.6 – Общий вид экспериментальных образцов серии АП2404

Экспериментальные образцы, не подвергнутые циклическим внешним воздействиям, были промаркированы в виде БВ2204/1, БВ2204/2, БВ2204/3, БВ2204/4, БВ2204/5 и представлены на рисунке 5.7.



Рисунок 5.7 – Общий вид экспериментальных образцов серии БВ2204

Для количественной оценки влияния наполнителя (органомодифицированного монтмориллонита) на механические свойства геокомпозита были изготовлены эталонные образцы на основе базового полимерного материала, которые также были подвергнуты циклическим внешним воздействиям в соответствии с технологической схемой, представленной на рисунке 5.2.

Маркировка эталонных образцов:

– ЭТМ602/1, ЭТМ602/2, ЭТМ602/3, ЭТМ602/4, ЭТМ602/5 – для образцов, подвергнутых циклическому воздействию температуры минус 60 °С в течение 2 часов с последующим нагревом до комнатной температуры. Общее количество циклов – 25;

– ЭТП502/1, ЭТП502/2, ЭТП502/3, ЭТП502/4, ЭТП502/5 – для образцов, подвергнутых циклическому воздействию температуры 50 °С в течение 2 часов с последующим охлаждением до комнатной температуры. Общее количество циклов – 25;

- ЭДВ2824/1, ЭДВ2824/2, ЭДВ2824/3, ЭДВ2824/4, ЭДВ2824/5 – для образцов, выдержанных в дистиллированной воде в течение 28 суток;
- ЭАП2404/1, ЭАП2404/2, ЭАП2404/3, ЭАП2404/4, ЭАП2404/5 – для определения адгезионной прочности;
- ЭБВ2204/1, ЭБВ2204/2, ЭБВ2204/3, ЭБВ2204/4, ЭБВ2204/5 – для образцов, не подвергнутых циклическим внешним воздействиям.

Данный состав экспериментальных образцов обусловлен необходимостью определения их эксплуатационных характеристик и оценки устойчивости к экстремальным температурным воздействиям, присущим южным и северным климатическим зонам нашей страны.

Число изготовленных экспериментальных образцов определено исходя из минимально возможного количества, обеспечивающего статистическую достоверность получаемых результатов.

## **5.2 Аппаратура для исследовательских испытаний экспериментальных образцов геокомпозита с использованием модифицированного полиуретанового вяжущего материала для конструкции балластного слоя железнодорожного пути**

Целью проведенных испытаний является исследование механических свойств, полученных экспериментальных образцов геокомпозита.

Испытания на прочность при изгибе выполнены с использованием испытательной машины по ГОСТ 28840-90.

Исследования на адгезионную прочность выполнены с использованием устройства одноосного растяжения методом разрушения образцов произвольной формы встречными сферическими инденторами по ГОСТ 21153.3-85.

Перечень средств измерений и испытательного оборудования, используемых при проведении исследовательских испытаний, представлен в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Средства измерений и испытательное оборудование,  
используемые при проведении исследовательских испытаний

№ пп	Наименование, тип и марка	Кол- во	ГОСТ, ТУ или обозначение	Основные характеристики
1	2	3	4	5
Средства измерений				
1	Индикатор часового типа ИЧ-10	1	ГОСТ 577-68	Цена деления 0,01 мм. Диапазон измерений от 0 до 25 мм
2	Комплекс измерительно- вычислительный АСИС-1	1	ТУ ГТЯН.411739.0 01ТУ	Диапазон измерений: (0–10) кН. Пределы допускаемой приведенной погрешности $\pm 1$ %.
3	Весы аналитические АВ1200-1	1	ГОСТ 24104-2001	Погрешность измерения $\pm 0,1$ мг. Предел взвешиваний: 1200 г. Класс точности по ГОСТ OIML R 76-1 – 2011: специальный I.
4	Термометр цифровой малогабаритный ТЦМ 9410/М2, в комплекте с датчиком ТТЦ01- 180 Pt100	1	ГОСТ 2823-73	Шкала от $-200$ до $400$ °С. Разрешающая способность (единица последнего разряда): 0,01 °С. Пределы допускаемой основной абсолютной

Продолжение таблицы 5.3

1	2	3	4	5
				погрешности: $\pm(0,05+0,0005  t +0,01)$
Испытательное оборудование				
5	Термокамера KWGDS62IF	1	Техническая документация фирмы- изготовителя	Диапазон автоматического регулирования температуры: от $-70$ до $+100$ °С. Диапазон контроля влажности воздуха: от 10 до 98 %. Объем камеры: 1535 л.
6	Шкаф сушильный SNOL 67/350	1	Техническая документация фирмы- изготовителя	Диапазон автоматического регулирования температуры: $50-350$ °С. Стабильность температуры в установившемся тепловом режиме: $\pm 2$ °С.
7	Лабораторная центрифуга AVANTI J-301	1	Техническая документация фирмы- изготовителя	Максимальная скорость: $100-10\ 000$ об/мин. Максимальное ускорение: $17\ 700 \times g$ . Охлаждение: $-10 \dots +40$ °С

1	2	3	4	5
8	Пресс гидравлический ELE International	1	Техническая документация фирмы-изготовителя	Диапазон измерений нагрузки: от 0 до 5 кН. Пределы допускаемой относительной погрешности измерений нагрузки: 1 %

### 5.3 Результаты исследовательских испытаний

#### 5.3.1 Прочность при изгибе

Изготовленные экспериментальные образцы геокомпозита укладывались на испытательную машину по ГОСТ 28840-90 и испытывались на изгиб до разрушения по трехточечной схеме (рисунок 5.8).

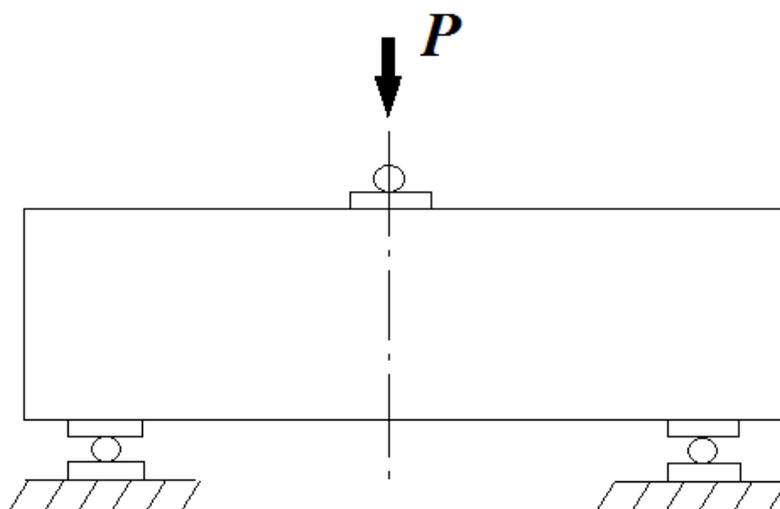


Рисунок 5.8 – Схема определения прочности при изгибе

При испытаниях зафиксирована нагрузка, соответствующая началу разрушения образца.

При обработке результатов испытаний вычислялось значение условной прочности, МПа, при изгибе по формуле (5.1):

$$\sigma_{i\text{усл}} = 4,5 \cdot 10^{-4}P, \quad (5.1)$$

где  $P$  – значение силы при разрушении образца, Н.

Образцы укладывались на испытательную машину таким образом, чтобы их боковая грань, контактирующая со стенкой формы при изготовлении, оказалась внизу. Для исключения точечного контакта щеченок образца с роликами испытательной машины между ними и образцом укладывали пластинки.

При испытаниях фиксировалась нагрузка, соответствующая началу разрушения образца.

Из пяти измеренных значений отбрасывались самое большое и самое маленькое значения. Из оставшихся трех значений определялось среднее.

Результаты испытаний представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Результаты измерения условной прочности при изгибе экспериментальных образцов, не подвергнутых внешнему воздействию

№ измерения (образца)	Измеренное значение силы при разрушении, кН	Условная прочность при изгибе, МПа	Среднее значение условной прочности при изгибе, МПа	Относительная погрешность измерения условной прочности при изгибе, %
1	2	3	4	5
Образцы на основе немодифицированного полиуретанового вяжущего материала				
ЭБВ2204/1	2,35	1,06		

Окончание таблицы 5.4

1	2	3	4	5
ЭБВ2204/2	2,38	1,07	1,10	4,54
ЭБВ2204/3	2,20	0,99		
ЭБВ2204/4	2,67	1,20		
ЭБВ2204/5	2,62	1,18		
Образцы на основе модифицированного полиуретанового вяжущего материала				
БВ2204/1	3,11	1,40	1,46	2,67
БВ2204/2	3,33	1,50		
БВ2204/3	3,24	1,46		
БВ2204/4	3,40	1,53		
БВ2204/5	3,15	1,42		

Из сравнения данных, приведенных в таблице 5.4, можно сделать вывод о том, что использование наполнителя на основе органомодифицированного монтмориллонита в полиуретановых вяжущих материалах обеспечивает ~33 %-е увеличение прочности при изгибе экспериментальных образцов геокомпозита.

### ***5.3.2 Снижение прочности при изгибе после воздействия внешних факторов***

На следующем этапе исследований были проведены измерения условной прочности при изгибе экспериментальных образцов, подвергнутых термовлажностному состариванию. Результаты испытаний представлены в таблицах 5.5–5.7.

Таблица 5.5 – Результаты измерения условной прочности при изгибе экспериментальных образцов, подвергнутых циклическому воздействию температуры 50 °С в течение 2 часов с последующим охлаждением до комнатной температуры (общее количество циклов – 25)

№ измерения (образца)	Измеренное значение силы при разрушении, кН	Условная прочность при изгибе, МПа	Среднее значение условной прочности при изгибе, МПа	Относительная погрешность измерения условной прочности при изгибе, %	Снижение прочности при изгибе после воздействия внешних факторов, МПа
Образцы на основе не модифицированного полиуретанового вяжущего материала					
ЭТП502/1	2,15	0,97	1,08	7,10	0,05
ЭТП502/2	2,13	0,96			
ЭТП502/3	2,67	1,20			
ЭТП502/4	2,71	1,22			
ЭТП502/5	2,40	1,08			
Образцы на основе модифицированного полиуретанового вяжущего материала					
ТП502/1	3,40	1,53	1,43	4,40	0,03
ТП502/2	3,00	1,35			
ТП502/3	3,27	1,47			
ТП502/4	3,02	1,36			
ТП502/5	3,38	1,52			

Таблица 5.6 – Результаты измерения условной прочности при изгибе экспериментальных образцов, подвергнутых циклическому воздействию температуры  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 2 часов с последующим нагревом до комнатной температуры (общее количество циклов – 25)

№ измерения (образца)	Измеренное значение силы при разрушении, кН	Условная прочность при изгибе, МПа	Среднее значение условной прочности при изгибе, МПа	Относительная погрешность измерения условной прочности при изгибе, %	Снижение прочности при изгибе после воздействия внешних факторов, МПа
Образцы на основе немодифицированного полиуретанового вяжущего материала					
ЭТМ602/1	2,18	0,98	1,02	3,30	0,10
ЭТМ602/2	2,38	1,07			
ЭТМ602/3	2,11	0,95			
ЭТМ602/4	2,20	0,99			
ЭТМ602/5	2,44	1,10			
Образцы на основе модифицированного полиуретанового вяжущего материала					
ТМ602/1	2,89	1,30	1,42	3,73	0,04
ТМ602/2	3,02	1,36			
ТМ602/3	3,27	1,47			
ТМ602/4	3,24	1,46			
ТМ602/5	3,38	1,52			

Таблица 5.7 – Результаты измерения условной прочности при изгибе экспериментальных образцов, выдержанных в дистиллированной воде в течение 28 суток

№ измерения (образца)	Измененное значение силы при разрушении, кН	Условная прочность при изгибе, МПа	Среднее значение условной прочности при изгибе, МПа	Относительная погрешность измерения условной прочности при изгибе, %	Снижение прочности при изгибе после воздействия внешних факторов, МПа
Образцы на основе немодифицированного полиуретанового вяжущего материала					
ЭБВ2204/1	2,69	1,21	1,13	5,31	0
ЭБВ2204/2	2,31	1,04			
ЭБВ2204/3	2,22	1,00			
ЭБВ2204/4	2,49	1,12			
ЭБВ2204/5	2,53	1,14			
Образцы на основе модифицированного полиуретанового вяжущего материала					
БВ2204/1	3,02	1,36	1,46	3,42	0
БВ2204/2	3,08	1,39			
БВ2204/3	3,40	1,53			
БВ2204/4	3,22	1,45			
БВ2204/5	3,44	1,55			

Из сравнения данных, приведенных в таблицах 5.5–5.7, можно сделать вывод о том, что использование наполнителя на основе органомодифицированного монтмориллонита в полиуретановых вяжущих материалах способствует повышению стойкости экспериментальных образцов геокомпозита к внешним воздействиям.

В частности, образцы, подвергнутые циклическому воздействию температуры  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 2 часов с последующим нагревом до комнатной температуры, показали снижение прочности при изгибе лишь на 0,04 МПа, в то время как контрольные образцы потеряли в прочности на 0,1 МПа.

Аналогичный результат был получен в случае испытания образцов, подвергнутых термическому воздействию  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Снижение прочности при изгибе после воздействий температуры  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  в случае испытания экспериментальных образцов составило 0,03 МПа, в случае контрольных – 0,05 МПа.

Влияние дистиллированной воды на прочностные свойства сформированного геокомпозита не обнаружено.

### ***5.3.3 Максимальная сила при разрыве (адгезионная прочность)***

Измерение максимальной силы при разрыве (адгезионной прочности) выполнялось с использованием прибора одноосного растяжения ГТ 2.6.1 в составе испытательной установки ГТ 0.6.1 измерительно-вычислительного комплекса «АСИС-1», предназначенного для испытаний горных пород методом разрушения образцов произвольной формы встречными сферическими инденторами по ГОСТ 21153.3-85 (рисунок 5.9). Целью измерения адгезионной прочности являлась оценка влияния наполнителя (органомодифицированного монтмориллонита) на характер контактного взаимодействия полимерного вяжущего материала с балластным материалом, определяющего механические характеристики геокомпозита в целом.

Непосредственно перед обработкой полимерным вяжущим материалом поверхность контактирующих граней щебенки фракции 25 мм очищалась дистиллированной водой и протиралась насухо. После нанесения полимерного вяжущего материала две щебенки укладывались друг на друга и выдерживались в течение 24 ч под собственным весом до завершения полимеризации вяжущего материала. Средняя площадь контактирующих поверхностей используемых щебенки составляла около  $100\text{ мм}^2$ . Далее образец закреплялся в захватах

испытательной машины и подвергался растягивающей нагрузке со скоростью 3 мм/мин (рисунок 5.9).

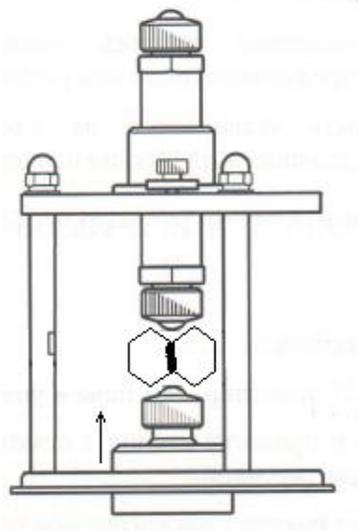


Рисунок 5.9 – Схема испытания по определению адгезионной прочности на приборе ГТ 2.6.1

В процессе испытаний фиксировалась максимальная сила при разрыве образца. За результат испытаний принималась максимальная сила отрыва. Результаты измерений приведены в таблице 5.8 и на рисунках 5.10–5.11.

Таблица 5.8 – Результаты измерения максимальной силы отрыва (адгезионной прочности) экспериментальных образцов

№ измерения (образца)	Измеренное значение максимальной силы отрыва, Н	Среднее значение максимальной силы отрыва, Н	Относительная погрешность измерения максимальной силы отрыва, %
1	2	3	4
Образцы на основе немодифицированного полиуретанового вяжущего материала			
ЭАП2404/1	82,7	83	4

1	2	3	4
ЭАП2404/2	81,9		
ЭАП2404/3	75,6		
ЭАП2404/4	83,3		
ЭАП2404/5	91,4		
Образцы на основе модифицированного полиуретанового вяжущего материала			
АП2404/1	118,5		
АП2404/2	111,6		
АП2404/3	97,1	108	5,
АП2404/4	105,4		
АП2404/5	108,3		

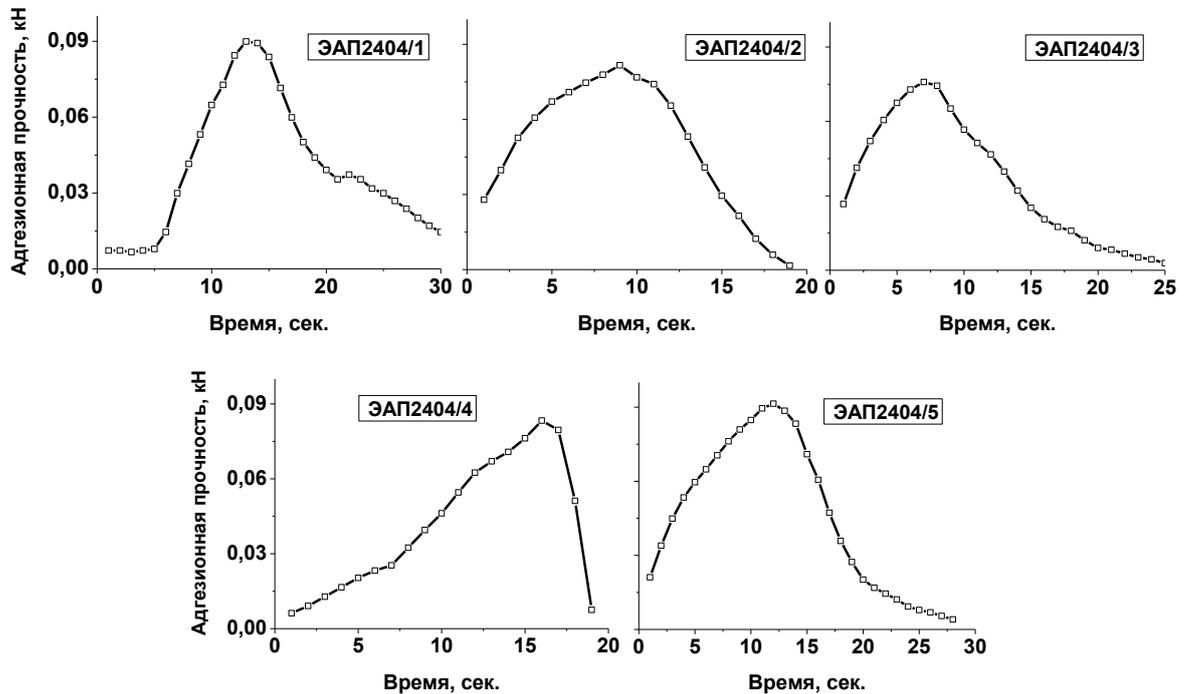


Рисунок 5.10 – Результаты измерения максимальной силы отрыва (адгезионной прочности) контрольных образцов (на основе немодифицированного полиуретанового вяжущего материала)

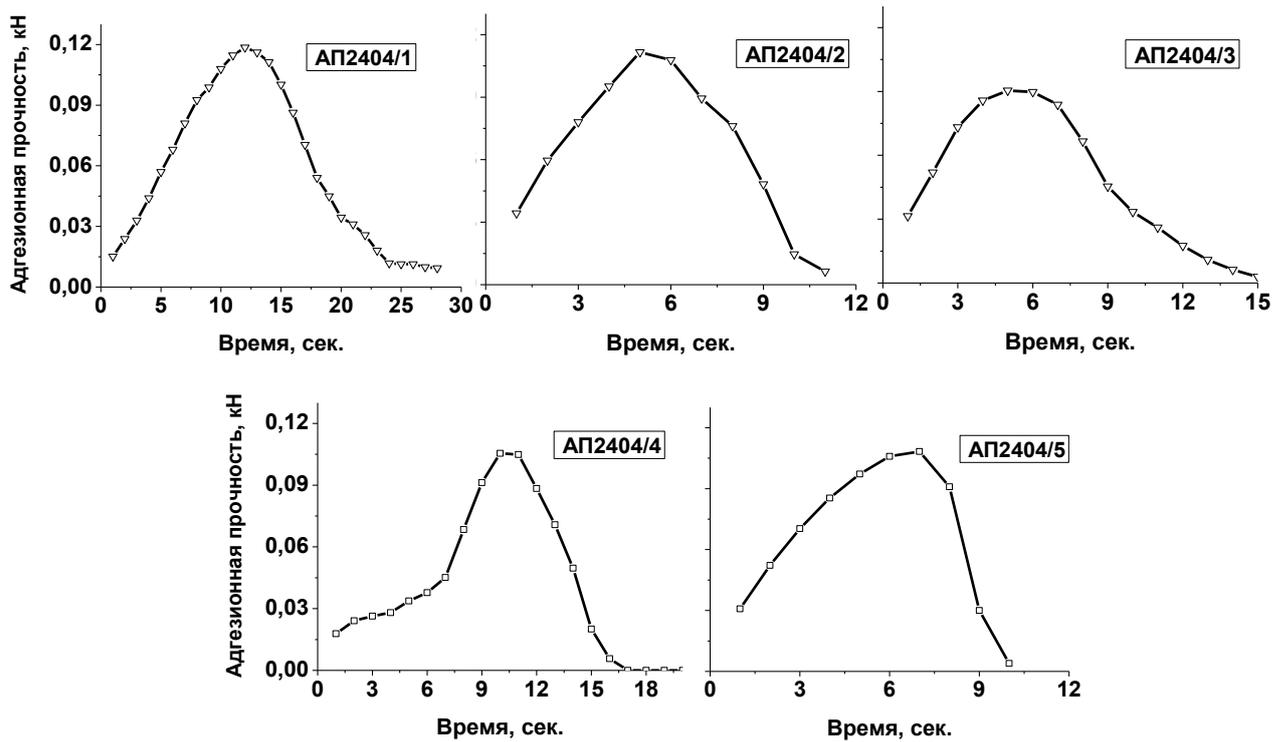


Рисунок 5.11 – Результаты измерения максимальной силы отрыва (адгезионной прочности) экспериментальных образцов (на основе модифицированного полиуретанового вяжущего материала)

Из сравнения данных, приведенных в таблице 5.8 и на рисунках 5.10–5.11, можно сделать вывод о том, что использование наполнителя на основе органомодифицированного монтмориллонита в полиуретановых вяжущих материалах обеспечивает ~22 %-е увеличение адгезионной прочности экспериментальных образцов. Среднее значение максимальной силы отрыва по результатам испытаний составило 108 Н.

## 5.4 Выводы

1. Использование наполнителя на основе органомодифицированного монтмориллонита в полиуретановых вяжущих материалах обеспечивает ~33 %-е увеличение прочности при изгибе экспериментальных образцов геокомпозита.

2. Использование наполнителя на основе органофункционализированного монтмориллонита в полиуретановых вяжущих материалах способствует повышению стойкости экспериментальных образцов геокомпозита к внешним воздействиям. В частности, образцы, подвергнутые циклическому воздействию температуры  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 2 часов с последующим нагревом до комнатной температуры, показали снижение прочности при изгибе лишь на 0,04 МПа, в то время как контрольные образцы потеряли в прочности на 0,1 МПа. Аналогичный результат был получен в случае испытания образцов, подвергнутых термическому воздействию  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Снижение прочности при изгибе после воздействий температуры  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  в случае испытания экспериментальных образцов, составило 0,03 МПа, в случае контрольных – 0,05 МПа. Влияние дистиллированной воды на прочностные свойства сформированного геокомпозита не обнаружено.

3. Использование наполнителя на основе органофункционализированного монтмориллонита в полиуретановых вяжущих материалах обеспечивает ~22 %-е увеличение адгезионной прочности экспериментальных образцов. Среднее значение максимальной силы отрыва по результатам испытаний составило 108 Н.

## **6 КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕЧА БАЛЛАСТНОЙ ПРИЗМЫ, ЗАКРЕПЛЕННОЙ ПОЛИМЕРНЫМ ВЯЖУЩИМ МАТЕРИАЛОМ**

### **6.1 Описание компьютерной модели и ее верификация**

Глава посвящена решению задачи «Создание компьютерных моделей и компьютерное моделирование свойств элементов балластной призмы, укрепленных современным полимерным вяжущим материалом».

Исследования выполнены для изучения свойств плеча балластной призмы, закрепленного двухкомпонентным полимерным вяжущим материалом, и направлены на выяснение особенности сопротивления сформированной балки геокомпозита поперечному воздействию.

Практическая значимость исследований этой главы связана с созданием оптимальных технологий закрепления, реализуемых с учетом индивидуальных особенностей конкретных участков железнодорожного пути и возможных воздействий от подвижного состава.

В настоящее время для изучения объектов и систем инженерной инфраструктуры все чаще используются современные методы математического, компьютерного моделирования и прогнозная аналитика.

Перспективность числового моделирования по сравнению с физическим моделированием и экспериментом связана с более экономными и рациональными затратами трудовых, финансовых и временных ресурсов. Зачастую в целях экономии инженеры выполняют ряд теоретических расчетов на компьютерных моделях и затем переходят к натурным экспериментам.

Развитие железнодорожной отрасли в аспекте постоянного роста скоростей и грузонапряженности также требует развития и применения современных и эффективных методов и средств проектирования, таких как создание адекватных математических моделей, компьютерное моделирование объектов и процессов. Методы математического и компьютерного моделирования в настоящее время широко применяются и развиваются при решении транспортных задач. Особое

внимание в последнее время вызывает решение трехмерных задач. В работе [143] представлены результаты имитационного моделирования безбалластного участка железнодорожного пути, функционирующего в условиях скоростного и тяжеловесного движения поездов.

Применение подхода, использующего компьютерное моделирование при изучении процессов взаимодействия подвижного состава и элементов конструкции пути, является эффективным инструментом оценки внешних воздействий на конструкционные элементы железнодорожного пути. Его эффективность продемонстрирована в работах [144, 145], где исследовано влияние динамической составляющей от подвижных единиц на элементы конструкции железнодорожного пути. В генерации и распространении колебаний в диапазоне до 150 Гц особое место занимают исследования, направленные на выявление влияния дефектов элементов верхнего строения пути, а также контактные задачи «колесо – рельс», которые рассмотрены в работах [146–148]. Способы оценки стабильности железнодорожного пути методом компьютерного моделирования представлены в работах [149–151].

Наряду с перечисленными актуальными задачами железнодорожной отрасли главной по важности проблемой остается безопасность всех видов перевозок. Для ее решения сегодня разрабатывают и применяют различные конструкции верхнего строения пути. Одно из решений связано с укреплением балластного слоя различными полимерными добавками. Так, в работах [85, 86] авторы исследуют изменение свойств балластного материала при добавлении полиуретановых вяжущих материалов и показывают повышение стабильности земляного полотна. В работах [84, 89, 152] исследуются возможности применения полиуретановых вяжущих материалов для повышения устойчивости шпал к поперечному сдвигу.

Изучение свойств новых конструкций верхнего строения пути проводится в лабораторных условиях, на специально созданных полигонах и на действующих участках пути. Соответствующие эксперименты требуют материальных затрат, величина которых может существенным образом минимизироваться в том случае, когда планирование экспериментов будет осуществляться с использованием

результатов математического и компьютерного моделирования свойств исследуемых конструкций.

В настоящем исследовании выполнено компьютерное моделирование свойств плеча балластной призмы, закрепленного полимерным вяжущим материалом, которое заключалось в определении зависимости поперечных смещений плеча балластной призмы под действием приложенной в центре модели силы со стороны шпалы [153].

В результате расчета определены напряженно-деформированные состояния балластной призмы под нагрузкой, а также полные смещения плеча балластной призмы. Для построения модели использован лицензированный программный продукт COMSOL Multiphysics версии 4.2a (лицензия № 17073466).

COMSOL Multiphysics – это интерактивная среда для моделирования и решения широкого класса научных и инженерных задач, которые можно сформулировать в виде системы дифференциальных уравнений [154].

Решение уравнений в COMSOL MultiPhysics осуществляется с помощью метода конечных элементов [155]. Метод базируется на предположении о том, что любую непрерывную конструкцию можно представить в виде дискретной модели [156], свойства которой можно изучать компьютерными методами. Законы изменения свойств обычно задаются дифференциальным уравнением, алгоритмы решения которых достаточно апробированы.

В данной работе расчеты выполнены с использованием модуля Multibody Dynamics («Динамика многотельных систем»). Выбор модуля для решения поставленных задач связан с возможностью моделировать взаимодействие элементов конструкции с учетом сил трения.

Решение задачи осуществлено в несколько этапов. На первом этапе графическими методами построена трехмерная модель фрагмента балластной призмы (рисунок 6.1). Фрагмент включает плечо балластной призмы и частично откос, укрепленные полимерным вяжущим материалом (позиции «а», «б»). Эти элементы конструкции размещены на балластном основании (позиция «в»). Для практической реализации расчетов использованы возможности компьютера Super

Micro, содержащего 24 ядра, на котором выполнен расчет методом конечных элементов. Расчетам предшествовали методические исследования, позволившие обосновать выбор сетки разбиения расчетной области. В данном случае трехмерная сетка составлена из тетраэдров, в каждом из которых выполнялся приблизительный расчет смещения элементов конструкции, определяющего деформацию в трехмерном пространстве. Точность расчета зависит от густоты сетки, но слишком мелкая сетка замедляет работу и увеличивает потребление памяти, что недопустимо при ограниченных вычислительных возможностях.

В данной работе выбрано значение сетки «Extra Fine» (очень мелкая), обеспечивающее плавный характер сходимости зависимости поперечного перемещения от величины приложенной силы.

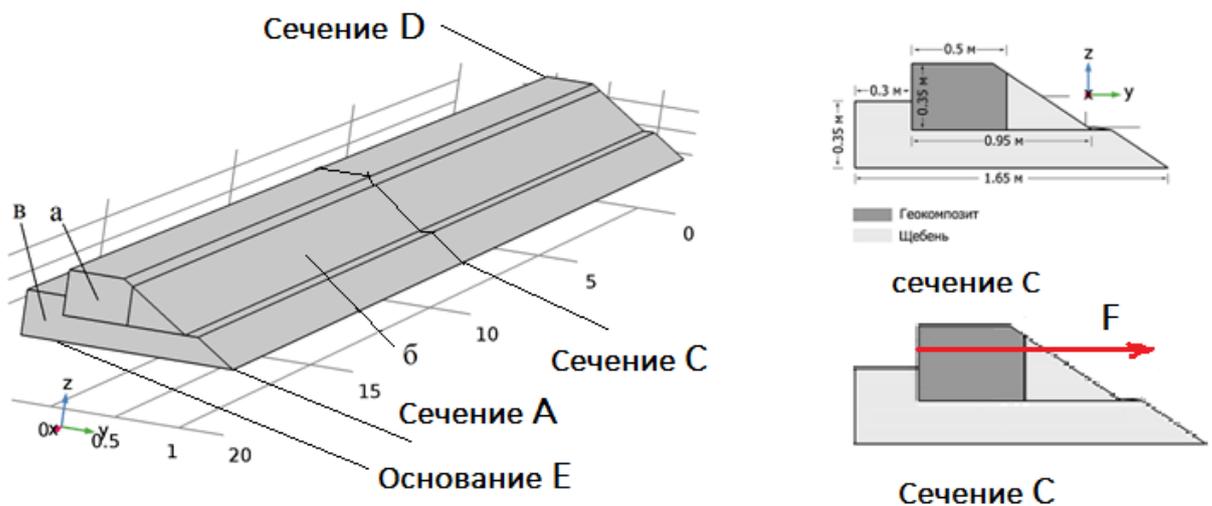


Рисунок 6.1 – Компьютерная модель фрагмента балластной призмы. Боковые грани (сечения А и D) и основание балластной призмы (E) при расчетах считаются неподвижными, горизонтальная сила со стороны шпалы приложена в сечении С

В построенной модели для описания свойств конструкции и материалов использованы изложенные выше геометрические ограничения и достаточно широко применяемое при исследовании малых деформаций приближение

линейно-упругих сред. В этом приближении к реальным свойствам материалов тензоры напряжений и деформаций связаны обобщенным законом Гука.

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (6.1)$$

где  $\sigma$  – напряжение;  $\varepsilon$  – относительная деформация;  $E$  называется модулем упругости.

В соответствии с (6.1) компоненты тензора напряжений  $s_{ij}$  ( $\sigma$  – тензор напряжения) линейно связаны с компонентами тензора деформаций  $\varepsilon_{mn}$ :

$$s_{ij} = \sum_{k,l} C_{ijkl} \varepsilon_{kl}. \quad (6.2)$$

Из выражения (6.2) следует, что  $s_{ij}$  представляет собой  $i$  – компонент силы, действующей на площадке с площадью, равной единице, перпендикулярно оси с нумерацией  $j$ . Компоненты  $s_{ij}$  тензора деформаций общим числом 9 штук составляют квадратную матрицу размером  $3 \times 3$ .

Используем оператор ( $\nabla$ ), тогда полный тензор деформации принимает вид:

$$\varepsilon_{mn} = \frac{1}{2} (\nabla u + \nabla u^T), \quad (6.3)$$

Для определения локальных деформаций в деформированной под действием внешних нагрузок конструкции ее объем средствами программного пакета COMSOL представляется в виде пространственной сетки, элементарные ячейки которой имеют форму пирамидки, для каждой из которых строится уравнение, отражающее ее механическое равновесие:

$$-\nabla \cdot \sigma = F_V, \quad (6.4)$$

где  $F_V$  – сила на единицу объема.

В построенной компьютерной модели учтена сила трения, возникающая между конструктивными слоями при деформации под действием внешних сил. Для этого использовано приближение статического трения Кулона с коэффициентом трения, равным коэффициенту трению между балластными слоями и составляющим величину 0,9.

Компьютерная модель (см. рисунок 6.1, позиции «а», «б», «в») задана геометрическими размерами, значениями плотности, модуля упругости и коэффициента Пуассона балластного материала и геокомпозита. Механические параметры сформированного геокомпозита исследованы в лабораторных и полевых условиях и использованы при выполнении расчетов. Длина модели первоначально выбрана равной 24 метрам и варьировалась в процессе исследований.

Граничные условия в COMSOL Multiphysics можно разделить на три вида: задача Дирихле, задача Неймана и периодические граничные условия. На каждой границе расчетной области исходя из анализа физических условий устанавливаются свои граничные условия. В рассматриваемой модели плеча балластной призмы для боковых граней (сечения А и D) и основания балластной призмы (E) задано граничное условие вида  $u = 0$ , что означает, что данные границы плеча зафиксированы.

Для последующей верификации компьютерной модели выполнены измерения силы, приложенной в центре модели (сечение С), действующей со стороны шпалы и приводящей к 10 мм деформации закрепленного полимерными вяжущими материалами плеча, с геометрическими размерами, соответствующими использованным на Забайкальской железной дороге (см. Приложение). Результаты измерений представлены на рисунке 6.2. Рассчитанная погрешность отдельных измерений оказалась равной 8 %. Эта величина будет использоваться далее для анализа и представления результатов измерений.

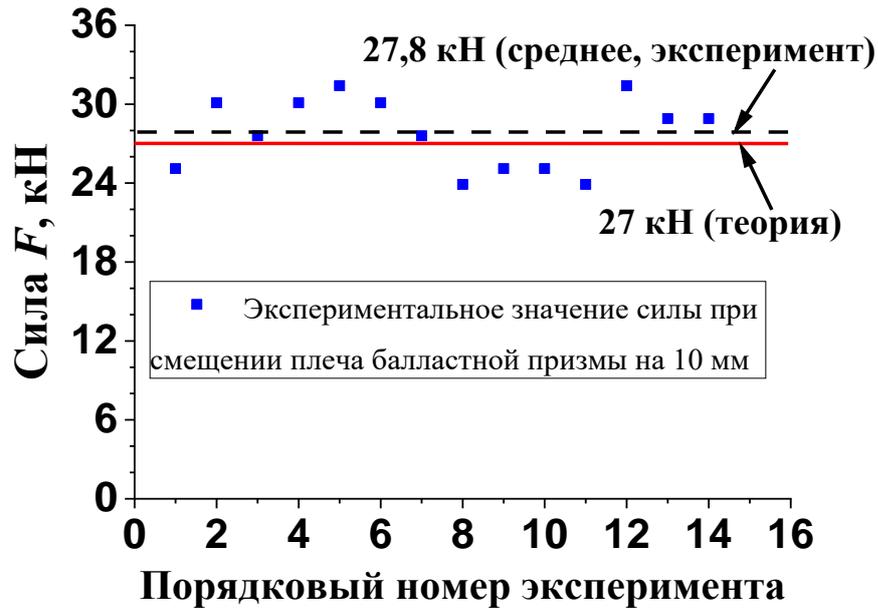


Рисунок 6.2 – Результаты измерений сил при деформации плеча балластной призмы на 10 мм

## 6.2 Исследование влияния длины модели геокомпозита на расчетную величину смещения

В данном разделе выполнены расчеты поперечного смещения одной шпалы при разных значениях длины модели и величины модуля упругости геокомпозита.

На рисунке 6.3 представлены результаты, полученные при приложении силы на торец шпалы в размере 20 кН. При этом увеличение длины балки геокомпозита на 20 % дает прирост в поперечном смещении рельса до 50 %. Вместе с этим изменение модуля упругости конструкции на 25 %, от 360 МПа (экспериментальное значение в вертикальном направлении для ненагруженного геокомпозита) до 460 МПа, вызывает на длине плеча 24 м поперечное смещение от 7,8 до 7,1 мм (до 10 %).

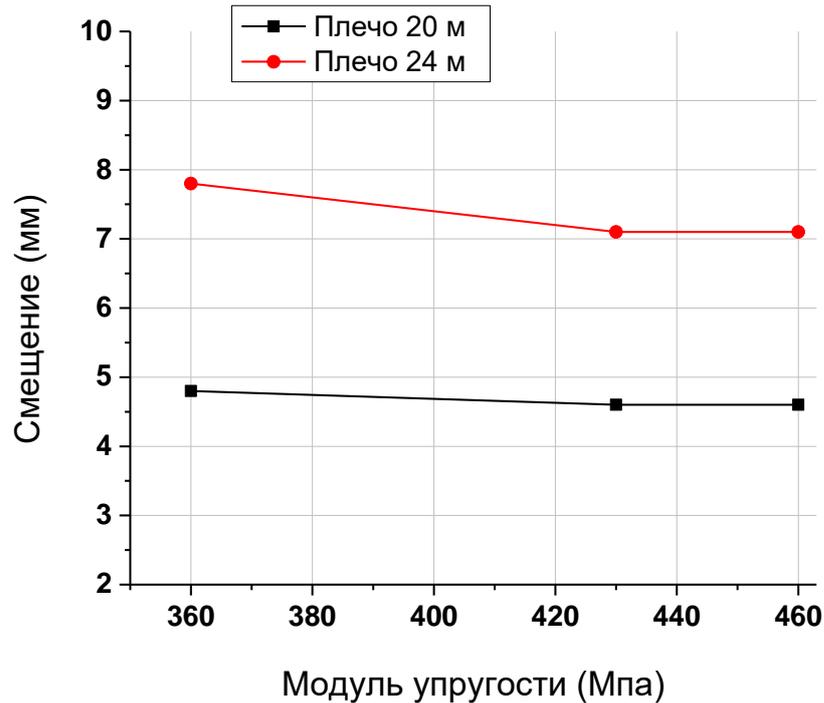


Рисунок 6.3 – Зависимость смещения плеча от модуля упругости при одинаковой силе  $F = 20$  кН, приложенной к шпале, для разной длины плеча  $L$

Рисунок 6.4 иллюстрирует скорость сходимости численных процедур для разных значений длин и модулей упругости геокомпозита. Использованный тип средств и методов вычислений позволяет получить зависимость смещения от величины приложенной силы за 0,6–1,5 суток. Видно, что увеличение геометрических размеров модели и модуля упругости приводит к заметному росту требуемого времени расчета. К примеру, увеличение протяженности геокомпозита с 20 до 24 м потребует в 1,5–2,0 раза больше времени для расчетов.

Дальнейшие исследования выполнены для балки длиной 23 м с модулем упругости  $E = 360$  МПа. Эти значения параметров при приложении в центре компьютерной модели (см. рисунок 6.1) поперечной горизонтальной силы  $F = 20$  кН, при допустимых затратах компьютерного времени позволяют получить значения деформаций, близкие к эксперименту.

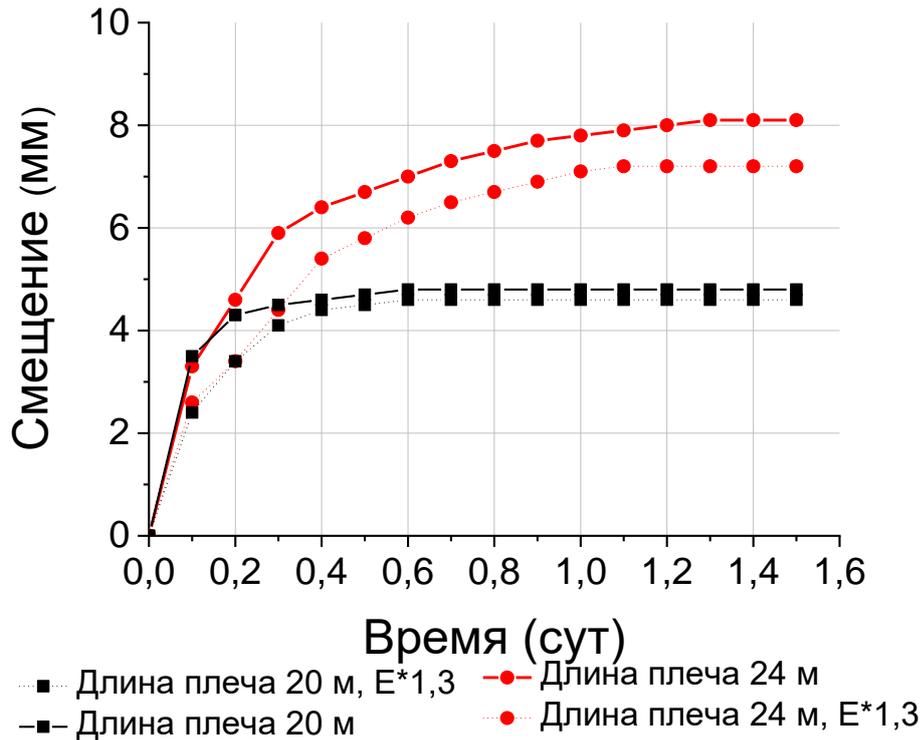


Рисунок 6.4 – Сила, приложенная к шпале, равна  $F = 20$  кН, модуль упругости  $E = 360$  МПа

### 6.3 Исследование влияния модуля деформации геокомпозита на расчетную величину смещения

На рисунке 6.5 приведены экспериментальные и теоретические результаты определения силы сопротивления поперечному сдвигу конструкции балластной призмы с омоноличенным плечом. Рассматривается случай, когда при поперечном сдвиге металлической пластины, моделирующей шпалу, была зафиксирована сила сопротивления омоноличенного плеча балластной призмы.

Соответствующие измерения проведены с применением приборов и оснастки, рассмотренных в главе 2. Результаты экспериментальных измерений на этом рисунке изображены символами (■). Погрешности измерений, оцененные величиной 8 % в п. 6.1, изображены вертикальными отрезками.

Для аппроксимации эксперимента в области малых деформаций (до 5 мм) использована линейная зависимость. На рисунке 6.5 соответствующая зависимость приведена штриховой линией красного цвета:

$$F = a + bx \quad (6.5)$$

и экспоненциальной зависимостью вида (—):

$$F = f_0 + F_0 \cdot e^{-\frac{x}{t}}, \quad (6.6)$$

где  $x$  – поперечное смещение;  $a = 1,41$  (кН);  $b = 2,87 \left( \frac{\text{кН}}{\text{мм}} \right)$ ,  $F_0 = -24,87$  (кН),  $f_0 = 26,17$  (кН),  $t = 5,31$  (мм).

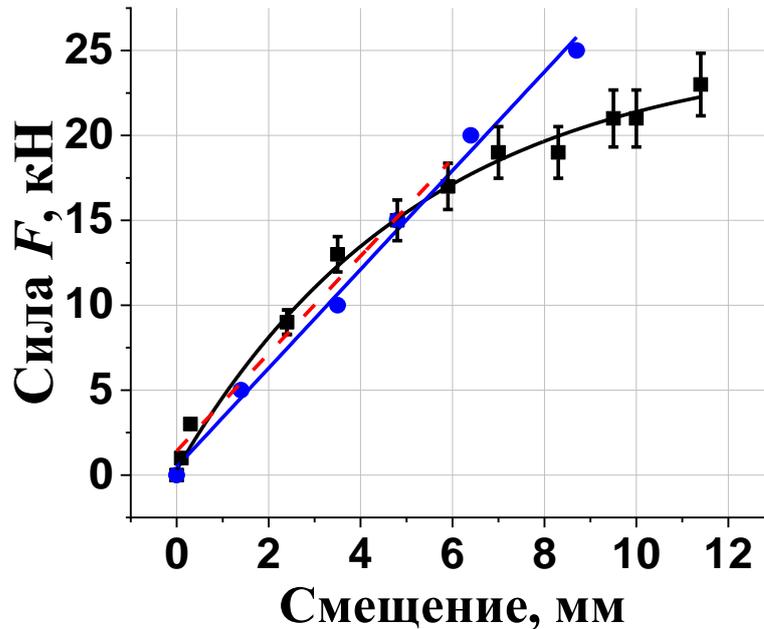


Рисунок 6.5 – Зависимость смещения плеча от силы для  $L = 23$  м (теория (●) и эксперимент (■)). Приведены линейная (---, формула (6.5)) и экспоненциальная (—, формула (6.6)) аппроксимации результатов измерений и линейная аппроксимация (—) результатов расчета

На рисунке 6.5 видно, что в рассмотренном диапазоне малых смещений (до 5 мм) зависимости (6.5) и (6.6) можно считать совпадающими с точностью до погрешностей измерений. Разложим выражение (6.6) в ряд по степени величины  $x$ :

$$F = f_0 + F_0 \cdot e^{-\frac{x}{t}} = f_0 + F_0 \left( 1 - \frac{x}{t} + \dots \right) = f_0 - |F_0| + \frac{|F_0|}{t} x + \dots \quad (6.7)$$

Видно, что, с точностью до квадратичных вкладов в разложение, условие  $x > \frac{x^2}{2} \dots$ , или  $x < 2$ , дает основание считать эту зависимость близкой к линейной. В нашем случае увеличение диапазона связано с погрешностями измерений, допускающими выбор вида аппроксимирующей зависимости (6.6).

Результаты расчета величины поперечной силы (в линейно-упругом приближении свойств использованных материалов) приведены на рисунке 6.5 в виде кружков синего цвета. Расчеты выполнены при постоянном значении модуля упругости недеформированного геокомпозита. Данные показатели получены посредством применения прибора ПДУ-МГ4, принцип действия которого описан в главе 2. Измерения проведены в вертикальном направлении для ненагруженного геокомпозита. Значение модуля упругости определено величиной  $E = 360$  МПа. Результаты линейной интерполяции расчетных значений также приведены на рисунке 6.5 в виде сплошной прямой синего цвета.

На рисунке 6.5 видно, что на малой величине поперечного смещения, значение которого не превышает 5–6 мм, результаты экспериментальных измерений системно больше результатов расчетов. Это соотношение изменяется на противоположное при поперечных смещениях, превышающих 6 мм. Подобное изменение может объясняться использованием упруго-линейного приближения для описания свойств материалов, поскольку расчеты при других значениях модуля упругости не позволяют передать кривизну зависимости, аппроксимирующей экспериментальные данные. Становится понятно, что изменение значения величины модуля упругости в упруголинейной модели не меняет формы зависимости силы сопротивления от величины деформации и приведет лишь к изменению угла наклона аппроксимирующей результаты расчета линейной зависимости.

Улучшить сходимость теории и эксперимента при больших поперечных смещениях плеча балластной призмы можно, включив в рассмотрение возможный

механизм зависимости модуля упругой деформации от величины смещения и имеющую место пластичность свойств геокомпозита. Пластические свойства геокомпозита при смещениях, превышающих 5–6 мм, при периодическом приложении силы могут приводить к накоплению деформации. К сожалению, в рамках настоящей работы такие исследования не проводились, поскольку при приложении сил, превышающих предел упругости, было зарегистрировано смещение рельсошпальной решетки из проектного положения и измерения были прекращены.

Для улучшения сходимости теории и эксперимента при больших значениях сил выполнены расчеты, в которых модуль деформации зависит от величины поперечной силы, как показано на рисунке 6.6. Это приближение, не являясь упругопластичным, все же уточняет поведение свойств геокомпозитной балки при больших ( $x > 6$  мм) смещениях.

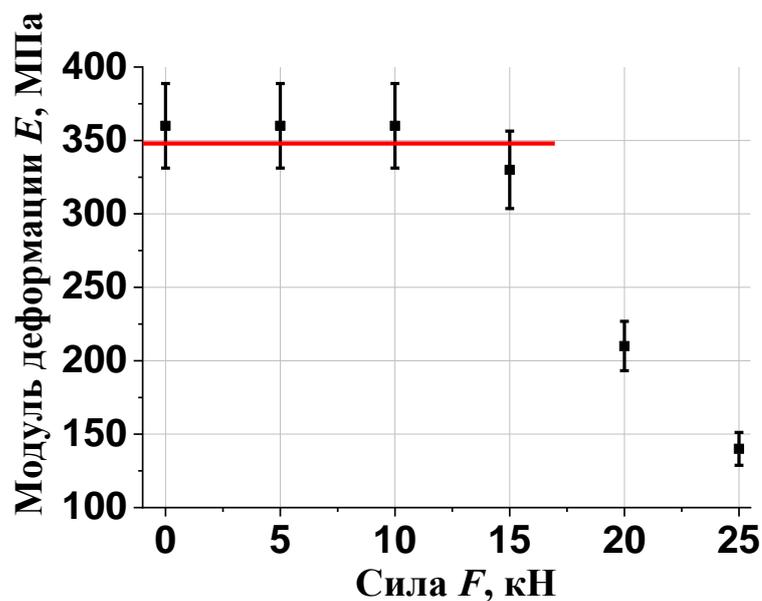


Рисунок 6.6 – Зависимость модуля деформации от силы для  $L = 23$  м (теория).

Горизонтальная красная линия указывает область изменения сил, в которой с точностью до погрешностей измерений обосновано применение линейно-упругой модели

Из рисунка видно, что с точностью до погрешностей экспериментальных измерений модуль деформации остается постоянным для приложенных сил, не превышающих 15 кН, и существенно нелинейным при больших значениях.

Результаты расчета зависимости силы и смещения при этих модулях деформации приведены на рисунке 6.7 (●). Их экспоненциальная аппроксимация изображена в виде (---). Видно, что в используемом приближении удается лучше передать кривизну аппроксимирующей эксперимент функции при больших значениях поперечных сил, чем на рисунке 6.5.

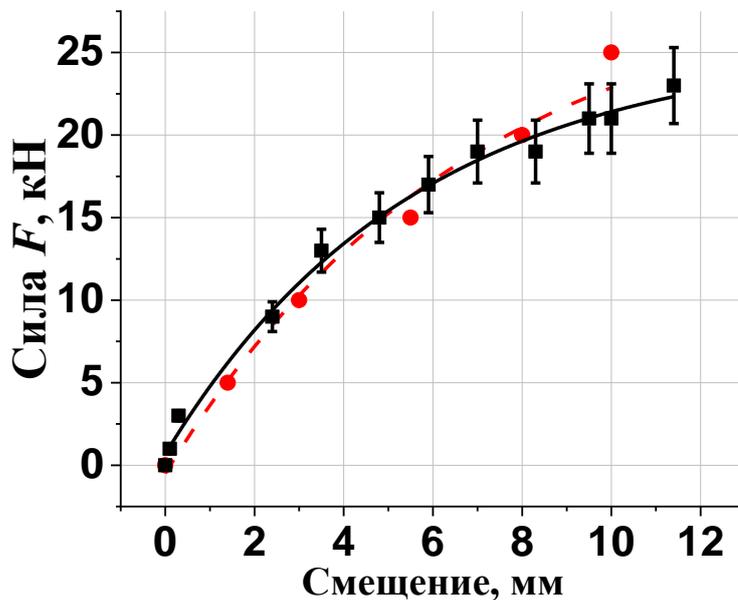


Рисунок 6.7 – Зависимость смещения плеча от силы для  $L = 23$  м  
(теория и эксперимент)

Вместе с этим дальнейшее уменьшение значения модуля деформации при больших смещениях становится нефизичным, поскольку приводит к деформациям геокомпозита в области приложения силы, что не наблюдается на эксперименте и может интерпретироваться как его разрушение. Следующие шаги в уточнении компьютерной модели могут быть связаны с учетом зависимости модуля деформации от ее величины в различных точках модели при приложении поперечной силы. Значения этих величин в точках балки иллюстрируют рисунки 6.8 и 6.9 соответственно.

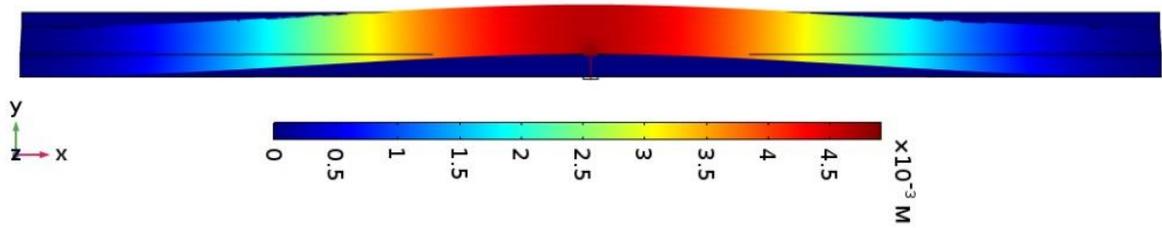


Рисунок 6.8 – Зависимость величины поперечной деформации в геокompозите длиной 23 м при приложении к шпале силы 20 кН

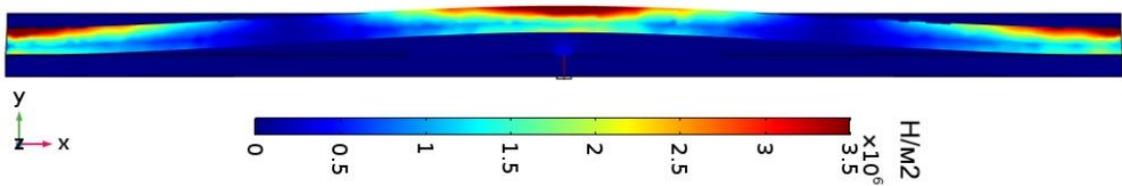


Рисунок 6.9 – Зависимость величины напряжения в геокompозите длиной 23 м при приложении к шпале силы 20 кН

Очевидно, что для реализации первой модели необходимо предусмотреть возможность задавать зависимость модуля деформации от линейной координаты, а для реализации второй – от трех координат, описывающих положение геокompозита в пространстве, что требует специального рассмотрения и выхода за рамки данного исследования.

#### 6.4 Выводы

1. Для верификации компьютерной модели выполнены измерения силы, приводящей к 10 мм деформации плеча балластной призмы, закрепленного полимерными вяжущими материалами, с геометрическими размерами, подобными использованным на Забайкальской железной дороге. Рассчитанная погрешность отдельных измерений оказалась равной 8 %.

2. Методом компьютерного моделирования подобрана зависимость величины модуля деформации геокомпозита от приложенной поперечной силы, позволяющая теоретически обосновать связь силы и смещения.

3. Следующие итерационные шаги в уточнении компьютерной модели могут быть связаны с учетом зависимости свойств геокомпозитной балки от величины деформации (напряжения), возникающей в различных точках модели при приложении поперечной силы.

4. Использование компьютерной модели для расчетов силы сопротивления плеча балластной призмы поперечным перемещениям рельсошпальной решетки позволяет оптимизировать геометрические размеры монолитного плеча балластной призмы и соответствующий расход вяжущего материала.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсификация процесса перевозок пассажиров и грузов, наблюдаемая в последние годы, предъявляет повышенные требования к конструкции железнодорожного пути, его прочностным и упругим характеристикам. Для обеспечения требуемых показателей применяют различные технические решения, одним из которых является полимерное закрепление балластного слоя.

Данная работа посвящена разработке технологии закрепления балластного материала полимерными вяжущими материалами, изготовленными на основе полиуретана.

Конкретные научно-практические задачи, решаемые в работе, связаны с модификацией свойств балласта действующих участков железных дорог и сформулированы ниже.

1. Разработка технологии полимерного закрепления плеча балластной призмы в кривых малого радиуса для повышения поперечной устойчивости рельсошпальной решетки.

2. Создание георадиолокационной технологии определения толщины сформированного геокомпозита.

3. Разработка технологических решений при проектировании и строительстве участков переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям омоноличиванием балластного слоя.

4. Разработка метода улучшения свойств двухкомпонентных вяжущих материалов на основе полиуретана, применяемых для решения первой и третьей задач.

5. Создание компьютерной модели и выполнение компьютерного моделирования свойств элементов балластной призмы, укрепленных современным полимерным вяжущим материалом.

При решении первой и второй задач получено следующее:

– изменение расхода вяжущего материала до образования геокомпозита на всю глубину балластной призмы позволяет увеличивать модуль упругости в 4 раза, со значения 77 МПа до значения 320 МПа;

– применение вяжущего материала позволит создавать участки железнодорожного пути на балластном основании с заданной жесткостью, соответствующей требованиям конструкции железнодорожного пути;

– использование вяжущего материала на основе полиуретана не препятствует проведению ремонтно-путевых работ с применением машин тяжелого типа;

– укрепление плеча балластной призмы вяжущим материалом РТ-КС-001 позволяет повысить общее статическое сопротивление ненагруженной шпалы при приложении боковой нагрузки в 2,7 раза (см. таблицу 3.4);

– метод георадиолокации может быть использован для контроля глубины омоноличивания балластной призмы на больших по протяженности участках железнодорожного пути.

Сделанные выводы позволяют сформулировать первое и второе положения, выносимые на защиту.

1. Конструкция балластной призмы с плечом, закрепленным на всю толщину балласта двухкомпонентным связующим на основе полиуретана, при поперечном сдвиге рельсошпальной решетки на 20 мм повышает силу сопротивления сдвигу до 40 кН.

2. Способ определения толщины омоноличенного балластного слоя на протяженных участках железнодорожного пути, основанный на георадиолокационном измерении положения контрастной границы подбалластного основания.

При решении третьей задачи получено следующее:

– применение полимерных вяжущих материалов позволяет повысить упругие свойства балластной призмы, а также приводит к подавлению низкочастотных составляющих спектра колебаний железнодорожного пути и уменьшению средневзвешенной амплитуды колебаний при воздействии

подвижного состава; численные значения указанных изменений зависят от расхода вяжущего материала;

– исследования, направленные на разработку технологии проектирования и строительства участков железнодорожного пути переменной жесткости методом омоноличивания балластной призмы, позволяют обосновать необходимую толщину геокомпозита, расход вяжущего материала и длину переходного участка.

Сделанные выводы позволяют сформулировать третье положение, выносимое на защиту.

3. Модуль упругости балластной призмы, омоноличенной на всю толщину щебеночного балласта, возрастает до 4 раз. Достигаемая величина модуля упругости зависит от свойств балластного и вяжущего материалов и должна учитываться при проектировании и строительстве участков переменной жесткости с использованием технологии омоноличивания.

Перспектива применения полимерных вяжущих материалов на транспорте для решения задачи повышения поперечной устойчивости рельсошпальной решетки и организации участков переменной жесткости существенным образом зависит от свойств формируемых геокомпозитов. Возможность улучшения свойств изучена в рамках Соглашения о предоставлении субсидии от 27 ноября 2014 г. № 14.607.21.0110 по теме: «Разработка технологии получения феллосиликатных функциональных материалов нового поколения для высокоскоростного рельсового транспорта, обладающих улучшенными эксплуатационными характеристиками и повышенной устойчивостью к внешним воздействиям» ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы».

В диссертационной работе соответствующая задача сформулирована в качестве четвертой задачи в следующем виде: разработка методов улучшения свойств двухкомпонентных вяжущих материалов на основе полиуретана, применяемых для решения первой и второй задач.

При решении третьей задачи получено, что использование добавки на основе органомодифицированного монтмориллонита в полиуретановых системах обеспечивает:

- повышение стойкости экспериментальных образцов геокомпозита к внешним воздействиям;
- ~33 %-е увеличение прочности при изгибе экспериментальных образцов;
- ~22 %-е увеличение адгезионной прочности экспериментальных образцов.

Сделанные выводы позволяют сформулировать четвертое положение, выносимое на защиту.

4. Добавки на основе монтмориллонита, модифицированного дидецилдиметиламмония хлоридом, вводимые в полиуретановые двухкомпонентные вяжущие в количестве 5 % по массе, обеспечивают увеличение прочности и адгезионной способности геокомпозита более чем на 20 %.

Применяемая технология формирования геокомпозита будет способствовать улучшению прочностных и упругопластичных свойств балластной призмы. В связи с этим актуальным направлением развития исследований является создание компьютерных моделей балластной призмы, включающей геокомпозит в качестве элемента. Численное определение состояния такой конструкции позволяет теоретически определить ее свойства и без проведения натурных исследований судить о степени ее адекватности растущим требованиям по прочности и другим механическим свойствам. В связи с этим пятая задача, решаемая в данной работе, сформулирована следующим образом: «Создание компьютерных моделей и компьютерное моделирование свойств элементов балластной призмы, укрепленных современным полимерным вяжущим материалом».

Практическая значимость исследований этой главы связана с созданием оптимальных технологий закрепления, реализуемых с учетом индивидуальных особенностей конкретных участков железнодорожного пути и возможных воздействий от подвижного состава.

При решении этой задачи создана компьютерная модель плеча балластной призмы, закрепленная вяжущим материалом, с известными из натурных испытаний

геометрическими размерами и механическими свойствами геокомпозита и незакрепленного плеча балластной призмы. В результате проведенных исследований установлено, что:

– расчеты с использованием компьютерной модели закрепленного плеча балластной призмы верифицированы экспериментом с погрешностью 8 % и позволили установить зависимость величины модуля деформации геокомпозита от приложенной поперечной силы, позволяющую теоретически обосновать экспериментально установленную связь силы сопротивления конструкции продольному смещению шпалы;

– использование компьютерной модели с закрепленным плечом балластной призмы для расчета силы сопротивления конструкции поперечным перемещениям рельсошпальной решетки позволяет оптимизировать геометрические размеры геокомпозита и соответствующий расход вяжущего материала.

Сделанные выводы позволяют сформулировать пятое положение, выносимое на защиту.

5. Закрепленное плечо балластной призмы в расчетной модели длиной 24 м проявляет упругие свойства, прогибаясь до 5 мм при приложении в центральном сечении поперечной горизонтальной силы, действующей со стороны шпалы. Значение указанного прогиба соответствует приложению силы, равной 15 кН, и ее дальнейший рост приводит к проявлению пластических свойств закрепленного плеча балластной призмы.

Полученные в работе результаты позволяют наметить дальнейшие направления исследований по развитию технологии закрепления балластного материала вяжущими материалами на основе полиуретана. К ним в первую очередь можно отнести следующие:

1. Изучение процесса разрушения геокомпозита при механических воздействиях рельсошпальной решетки. Выработка технических требований к рабочим органам путевых машин.

2. Поведение рельсошпальной решетки при разрушении геокомпозита плеча балластной призмы.

3. Уточнение зависимости поперечной устойчивости рельсошпальной решетки от геометрических параметров геокомпозита.

4. Совершенствование свойств вяжущих материалов за счет оптимизации количества и состава применяемых для модификации их свойств добавок.

5. Совершенствование технологий применения вяжущих материалов для закрепления балласта.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ашпиз, Е.С. Подход к расчету показателей надежности элементов пути / Е.С. Ашпиз // Мир транспорта. – 2011. – № 9. – С. 34–41.
2. Певзнер, В.О. Общие положения методики оценки воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности / В.О. Певзнер, Е.С. Ашпиз, А.В. Замуховский, В.В. Третьяков, И.Б. Петропавловская, И.В. Третьяков, К.В. Шапетько, И.С. Смелянская, Т.И. Громова // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 3. – С. 34–37.
3. Фроловский, Ю.К. Оценка новых технических решений по усилению земляного полотна / Ю.К. Фроловский, В.В. Виноградов, А.А. Зайцев // Путь и путевое хозяйство. – 2008. – № 6. – С. 24–25.
4. Крицкий, М.Я. Стабилизация деформаций высоких насыпей над водопропускными трубами / М.Я. Крицкий // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2007. – № 17. – С. 62–70.
5. Шаповалов, В.А. Инженерные решения по повышению устойчивости верхнего строения железнодорожного пути / В.Л. Шаповалов, В.А. Явна, К.М. Ермолов, А.А. Кругликов, М.В. Окост, З.Б. Хакиев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. Секция «Железнодорожный путь и транспортное строительство». – 2017. – № 4. – С. 119–135.
6. Ашпиз, Е.С. Обоснование нормативов деформативности подрельсового и подшпального оснований / Е.С. Ашпиз, А.В. Замуховский // Мир транспорта. – 2012. – № 10. – С. 112–119.
7. Ашпиз, Е.С. Усиление деформирующихся длительно эксплуатируемых насыпей на многолетнемерзлом основании / Е.С. Ашпиз, Т.С. Вавринюк // Политранспортные системы. – 2017. – С. 86–90.
8. Певзнер, В.О. Экспериментальные исследования по оценке влияния ширины колеи и состояния ходовых частей на уровень боковых сил / В.О. Певзнер, Ю.С.

- Ромен, А.М. Орлова, А.В. Заверталоук // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2010. – № 2. – С. 39–41.
9. Суслов, О.А. Экспериментальные исследования сопротивления поперечному сдвигу шпал новых типов. Современные и перспективные конструкции железнодорожного пути для различных условий эксплуатации / О.А. Суслов, П.Е. Сквозняков // Сборник трудов ученых ОАО «ВНИИЖТ» (ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта»). – М., 2013. – № 20. – С. 114–116.
10. Певзнер, В.О. Накопление остаточных деформаций пути на участках интенсификации перевозочного процесса / В.О. Певзнер, И.Б. Петропавловская, Т.И. Громова // РСП Эксперт. – 2018. – № 5. – С. 22–25.
11. Певзнер, В.О. Влияние скорости и длины поезда из вагонов с повышенными осевыми нагрузками на развитие деформаций пути / В.О. Певзнер, В.В. Третьяков, И.Б. Петропавловская, И.В. Третьяков, К.В. Шапетько, И.С. Смелянская, Т.И. Громова // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. – 2018. – С. 152–157.
12. Железнов, М.М. Влияние длительности и частоты приложения нагрузки на напряженно-деформированное состояние пути / М.М. Железнов, В.О. Певзнер, В.П. Соловьев, А.В. Анисин, И.М. Анисина, С.С. Надежин, И.В. Третьяков // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – № 6. – С. 364–367.
13. Абдурашитов, Ю.А. Оценка влияния воздействия подвижного состава с различной нагрузкой на ось на железнодорожный путь с различной толщиной балластного слоя и элементами верхнего строения пути на основе моделирования / Ю.А. Абдурашитов, В.П. Сычев, А.Ю. Абдурашитов // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2018. – № 12(12). – С. 58–64.
14. Абдурашитов, А.Ю. Определение динамической нагрузки подвижного состава, передаваемой на верхнее строение безбалластного железнодорожного пути /

- А.Ю. Абдурашитов, Ю.Н. Юркова // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2018. – № 12(12). – С. 95–100.
15. Прокудин, И.В. Распространение виброускорений в балластном слое железнодорожного пути под действием повышенных осевых нагрузок / И.В. Прокудин, А.Ф. Колос, А.В. Щукин, А.А. Морозова // Сборник научных трудов Sworld. – 2011. – № 4. – С. 60–65.
16. Прокудин, И.В. Исследование колебательного процесса гранитного щебня в балластной призме / И.В. Прокудин, Т.М. Петрова, Х.И. Турсунов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – № 2(31). – С. 68–73.
17. Дыдышко, П.И. Усиление железнодорожного пути в современных условиях / П.И. Дыдышко, А.Ю. Абдурашитов // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 7. – С. 48–55.
18. Колос, А.Ф. Исследование распространения виброускорений частиц балластного слоя в условиях движения поездов с повышенными осевыми нагрузками / А.Ф. Колос, А.А. Морозова // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2014. – № 2(39). – С. 29–35.
19. Колос, А.Ф. Подшпальное основание пути при повышенных осевых нагрузках / А.Ф. Колос, А.А. Морозова // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 7. – С. 13–14.
20. Исаков, А.Л. Абсолютно устойчивые насыпи относительно поездной нагрузки / А.Л. Исаков, И.Н. Гудкова // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: сб. тр. XIII Междунар. науч.-техн. конф. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. – 2016. – С. 66–68.
21. Новакович, В.И. Сопротивление рельсошпальной решетки перемещениям / В.И. Новакович, И.Р. Курилина, В.В. Ершов // Путь и путевое хозяйство. – 2004. – № 2. – С. 5–7.
22. Новакович, В.И. Контроль над устойчивостью бесстыкового пути / В.И. Новакович, Г.В. Карпачевский, Н.И. Залавский // Безопасность движения поездов. – 2011. – С. 12–13.

23. Коган, А.Я. Перспективные конструкции железнодорожного пути / А.Я. Коган, В.Б. Каменский, С.Н. Шарапов, Л.Г. Крысанов // Железнодорожный транспорт. – 1998. – № 4. – С. 52–56.
24. Певзнер, В.О. Эффективность георешетки / В.О. Певзнер, О.Ю. Белоцветова, И.В. Третьяков // Путь и путевое хозяйство. – 2010. – № 8. – С. 22–23.
25. Певзнер, В.О. Влияние применения упругих элементов различной жесткости под железобетонными шпалами при выправке пути на его стабильность / В.О. Певзнер, М.М. Железнов, В.В. Третьяков, В.Н. Каплин, М.Н. Мысливец // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. – 2015. – С. 196–197.
26. Абдурашитов, А.Ю. Укладка объемной георешетки в защитном подбалластном слое / А.Ю. Абдурашитов, П.И. Дыдышко, А.В. Мелиоранский // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 3. – С. 29–32.
27. Савин, А.В. Выбор конструкции пути для высокоскоростного движения / А.В. Савин // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 1(68). – С. 18–21.
28. Савин, А.В. Условия применения безбалластного пути / А.В. Савин // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2016. – № 9(9). – С. 76–80.
29. Блажко, Л.С. Влияние геотекстиля на геометрию рельсовой колеи / Л.С. Блажко, В.И. Штыков, А.Б. Пономарёв, М.В. Бушуев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2007. – № 4(13). – С. 36–48.
30. Блажко, Л.С. Требования к материалу защитного слоя, на который укладывается геотекстиль / Л.С. Блажко, В.И. Штыков, Ю.А. Канцибер, А.Б. Пономарев, Е.В. Черняев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 2(23). – С. 56–63.
31. Блажко, Л.С. Внутреннее загрязнение балластного слоя при имитации вибродинамической поездной нагрузки / Л.С. Блажко, Е.В. Черняев // Конструкция железнодорожного пути и вопросы технического обслуживания высокоскоростных магистралей. – 2010. – С. 66–71.

32. Колос, А.Ф. Современные конструкции верхнего строения пути для строительства скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий / А.Ф. Колос, И.С. Козлов // Бюллетень результатов научных исследований. – 2013. – № 1–2(6–7). – С. 16–21.
33. Фроловский, Ю.К. Расчетное и макетное обоснование усиления земляного полотна армогрунтовыми поддерживающими сооружениями с применением нагельных конструкций / Ю.К. Фроловский, А.А. Зайцев, А.В. Горлов // Политранспортные системы. – 2015. – С. 226–232.
34. Добров, Э.М. Оценка эффективности усиления слабых оснований дорожных насыпей грунтовыми сваями / Э.М. Добров, Куок Дат Куок Дат Чан, Суан Тхо Суан Тхо Ле // Транспортное строительство. – 2010. – № 7. – С. 25–27.
35. Казарновский, В.Д. Назначение конструкции насыпи, армируемой геосинтетическими полотнами / В.Д. Казарновский // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2012. – № 7. – С. 13–14.
36. Ланис, А.Л. Применение метода напорной инъекции для усиления насыпей / А.Л. Ланис // Путь и путевое хозяйство. – 2009. – № 2. – С. 32–34.
37. Ланис, А.Л. Армирование основной площадки высокой насыпи с инъектированием твердеющих растворов / А.Л. Ланис // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 3(50). – С. 38–46.
38. Коган, А.Я. Поперечные горизонтальные силы, возникающие от действия продольных температурных сил в рельсовых плетях бесстыкового пути и передаваемые на подшпальное основание / А.Я. Коган // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2011. – № 5. – С. 10–13.
39. Коган, А.Я. Устойчивость бесстыкового пути по условию сдвига рельсошпальной решетки под проходящими поездами с учетом трения / А.Я. Коган, О.А. Суслов, И.В. Полещук // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2012. – № 2. – С. 22–26.

40. Абдурашитов, Ю.А. Моделирование воздействия подвижного состава на железнодорожный путь с различной нагрузкой на ось и толщиной балластного слоя и песчаной подушки / Ю.А. Абдурашитов, В.П. Сычев, А.Ю. Абдурашитов // Строительство в прибрежных курортных регионах. – 2018. – С. 76–81.
41. Савин, А.В. Комбинированный метод исследования безбалластного пути / А.В. Савин // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2015. – № 3. – С. 48–52.
42. Савин, А.В. Расчёт устойчивости бесстыкового пути на подходах к искусственным сооружениям / А.В. Савин, Д.В. Овчинников // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2014. – № 7(7). – С. 106–114.
43. Дыдышко П.И. Моделирование усиления подшпального основания / П.И. Дыдышко, В.Г. Кривоногов, В.В. Макаров // Путь и путевое хозяйство. – 2008. – № 11. – С. 37–39.
44. Колос, А.Ф. Теоретические и практические основы оценки несущей способности подшпального основания при движении поездов с повышенными осевыми нагрузками / А.Ф. Колос, А.А. Морозова // Сборник научных трудов Sworld. – 2014. – № 1. – С. 21–25.
45. Моделирование усиления насыпи / Ю.К. Фроловский, В.В. Виноградов, А.А. Зайцев, И.В. Иванченко // Путь и путевое хозяйство. – 2007. – № 3. – С. 26–27.
46. Аккерман, Г.Л. Оценка поперечной устойчивости рельсошпальной решетки в балластной призме / Г.Л. Аккерман, Д.А. Скутин // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения: научно-технический журнал. – 2015. – № 3. – С. 36–44.
47. Суслов, О.А. Моделирование устойчивости бесстыкового пути / О.А. Суслов, В.А. Показкий // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2003. – С. 19–21.
48. Савин, А.В. Переходные участки безбалластного пути после 1,1 млрд т брутто / А.В. Савин, К.И. Третьяков, А.В. Петров, А.Г. Кинжалиев, С.С. Князев // Современные проблемы железнодорожного транспорта. – 2019. – С. 436–446.

49. Петрова, Т.М. Управление жесткостью железнодорожного пути изменением модуля упругости материала конструкций подрельсового основания / Т.М. Петрова, Л.С. Блажко, А.В. Полетаев // Прогрессивные ресурсосберегающие технологии в строительстве. – 2002. – С. 44–50.
50. Стоянович, Г.М. Эффективность конструкции пути переменной жесткости / Г.М. Стоянович, В.В. Пупатенко, К.В. Змеев // Проектирование развития региональной сети железных дорог. – 2016. – № 4. – С. 103–109.
51. Кругликов, А.А. Организация переходных участков ж.-д. пути переменной жесткости на основе полимерных связующих материалов / А.А. Кругликов, Я.М. Ермолов, А.В. Морозов, И.А. Нахимович, В.А. Явна // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. Секция «Железнодорожный путь и транспортное строительство». – 2016. – № 4. – С. 106–113.
52. Замуховский, А.В. Участки переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям / А.В. Замуховский, А.В. Гречаник // Соискатель. Приложение к журналу «Мир транспорта». – 2005. – № 2. – С. 100–105.
53. Дорошкевич, А.А. Новая конструкция пути на подходах к мостам / А.А. Дорошкевич, А.П. Леманский, С.В. Ольхина // Современные и перспективные конструкции железнодорожного пути для различных условий эксплуатации. – 2013. – С. 129–133.
54. Дыдышко, П.И. Усиление пути добавками полифилизаторов / П.И. Дыдышко, С.В. Ольхина, Ю.А. Веселов, Н.А. Леошкина, А.Д. Косенко, Е.А. Сафонова, В.В. Легкий, И.С. Козлов // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 9. – С. 9–12.
55. Стоянович, Г.М. Обеспечение стабильности пути в зоне сопряжения искусственных сооружений и земляного полотна / Г.М. Стоянович, В.В. Пупатенко, К.В. Змеев // Путь и путевое хозяйство. – 2017. – № 10. – С. 14–17.
56. Луцкий, С.Я. Композитные сооружения в тундре / С.Я. Луцкий, А.М. Черкасов, К.Н. Хрипков // Мир транспорта. – 2012. – № 6(44). – С. 138–145.
57. Кругликов, А.А. Оптимизация формы геокомпозита для повышения поперечной устойчивости железнодорожного пути на балластном основании /

- А.А. Кругликов, А.А. Васильченко, А.В. Морозов, В.А. Явна, З.В. Холодный // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 7 – С. 20–24.
58. Кругликов, А.А. Вяжущие материалы для переходных участков переменной жесткости / А.А. Кругликов, Я.М. Ермолов, В.А. Явна, З.В. Холодный // Путь и путевое хозяйство. – 2017. – № 2 – С. 10–13.
59. Коншин, Г.Г. Вибрационный метод диагностики насыпей / Г.Г. Коншин // Путь и путевое хозяйство. – 2007. – № 10. – С. 22–26.
60. Суворов, А.Б. Практическое использование методов вибродиагностики для определения интегральных параметров проходящего подвижного железнодорожного состава / А.Б. Суворов, Т.В. Суворова, С.А. Усошин // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – № 11(4). – С. 489–493.
61. Шаповалов, В.Л. Контроль плотности грунтов земляного полотна методом георадиолокации / В.Л. Шаповалов, М.В. Окост, А.В. Морозов В.А. Явна, А.А. Васильченко // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 9. – С. 7–13.
62. Явна, В.А. Этапы проектирования интеллектуальной системы мониторинга объектов транспортной инфраструктуры / В.А. Явна, А.С. Каспржицкий, А.А. Кругликов, Г.И. Лазоренко, З.Б. Хакиев, В.Л. Шаповалов // Управление большими системами. – 2012. – № 38. – С. 105–120.
63. Кругликов, А.А. Диагностика объектов транспортной инфраструктуры методом георадиолокации / А.А. Кругликов, К.Ю. Кислица, А.В. Морозов, В.А. Явна, В.Л. Шаповалов // Вестник РГУПС. – 2011. – № 4. – С. 148–154.
64. Замуховский, А.В. Измерение вибрации грунта насыпи на подходе к мосту / А.В. Замуховский, С.А. Буромбаев, М.Я. Квашнин, И.С. Бондарь, А.П. Шмаков // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 1. – С. 19–21.
65. Indraratna, B. Rail track infrastructure for enhanced speed – analysis design and construction challenges / B. Indraratna, S.S. Nimbalkar, J.S. Vinod // Indian Geotechnical Conference. – 2013. – С. 1–19.

66. Teixeira, P.F. The Use of Bituminous Subballast on Future High-Speed Lines in Spain: Structural Design and Economical Impact / P.F. Teixeira, P.A. Ferreira, A. López Pita, C. Casas, A. Bachiller // *Int. J. of Railway*. – 2009. – № 2(1). – С. 1–7.
67. Sol-Sánchez, M. Advanced characterisation of bituminous sub-ballast for its application in railway tracks: The influence of temperature / M. Sol-Sánchez, L. Pirozzolo, F. Moreno-Navarro, M.C. Rubio-Gámez // *Construction and Building Materials*. – 2015. – № 101(1). – С. 338–346.
68. Современные и перспективные конструкции железнодорожного пути для различных условий эксплуатации: сб. тр. ученых ОАО «ВНИИЖТ» (ОАО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта») / под ред. А.Ю. Абдурашидова. – М., 2013. – 152 с.
69. Le Pen, L. Contribution of Base, Crib, and Shoulder Ballast to the Lateral Sliding Resistance of Railway Track / L. Le Pen, W. Powrie // *A Geotechnical Perspective*. – 2011. – № 225. – С. 113–129.
70. Esmaeili, M. Experimental comparison of the lateral resistance of tracks with steel slag ballast and limestone ballast materials. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F* / M. Esmaeili, R. Nouri, K. Yousefian // *Journal of Rail and Rapid Transit*. – 2017. – № 231. – С. 175–184.
71. Babadeyev, I.S. Design of a new reinforced-concrete railroad sleeper / I.S. Babadeyev, A.A. Kireyevnin, V.V. Karpachevsky // *Put' i Putevoye Khozyaistvo*. – 2010. – № 5. – С. 31.
72. Ungureanu, V.V. Y shape railway sleepers from fiber reinforced foamed urethane / V.V. Ungureanu, A.N. Maris. // *Bulletin of the Transilvania University of Braşov, CIBv*. – 2013. – № 6 (55). Special Issue No. 1.
73. Domingo, L.M. Design of lateral resistance sleeper and performance comparison with conventional sleepers in a curved railway track / L.M. Domingo, J.I.R. Herraiz, C. Zamorano, T.R. Herraiz. // *Latin American Journal of Solids and Structures*. – 2014. – № 11.
74. Fischer, Sz. Investigation of inner shear resistance of geogrids built under granular protection layers and railway ballast / Sz. Fischer // *Наука та прогрес транспорту*.

- Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2015. – № 5 (59), doi : 10.15802/stp2015/53169.
75. Esmaeili, M. Investigating the effect of nailed sleepers on increasing the lateral resistance of ballasted track / M. Esmaeili, A. Alireza, H.K. Neyestanaki, S. Nazari // *Computers and Geotechnics*. – 2016. – № 71. – С. 1–11.
76. Hausmann, M.R. *Engineering Principles of Ground Modification* / M.R. Hausmann // McGraw-Hill Inc. – 1990.
77. Karol, R.H. *Chemical Grouting and Soil Stabilization* / R.H. Karol // Marcel Dekker Inc. – 2003.
78. Buzzi, O. Use of expanding polyurethane resin to remediate expansive soil foundations / O. Buzzi, S. Fityus, Y. Sasaki, S.W. Sloan // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2010. – № 47(6). – С. 623–634.
79. Ferdous, W. Composite railway sleepers – Recent developments, challenges and future prospects / W. Ferdous, A. Manalo, G. Van Erp, T. Aravinthan, S. Kaewunruen, A. Remennikov // *Composite Structures*. – 2015. – № 134. – С. 158–168.
80. Manalo, A. A review of alternative materials for replacing existing timber sleepers / A. Manalo, T. Aravinthan, W. Karunasena, A. Ticoalu // *Composite Structures* 2010. – № 92(3). – С. 603–611.
81. Woodward, P.K. Cost effective solution of persistent track faults using XiTRACK geocomposite technology / P.K. Woodward, G. Nicholl, D.R. Thompson // *Permanent Way Inst J*. – 2005. – № 123(4). – С. 191–5.
82. Woodward, P.K. Geocomposite technology: reducing railway maintenance / P.K. Woodward, D. Thompson, M. Banimahd // *Proc. Inst. Civil Eng. Transport*. – 2007. – № 160(3). – С. 109–115.
83. Keene, A. Mechanical properties of polyurethane-stabilized ballast / A. Keene, J.M. Tinjum, T.B. Edil // *Geotechnical Engineering Journal*. – 2014. – № 45(1). – С. 66–73.

84. Kennedy, J. Reducing railway track settlement using three-dimensional polyurethane polymer reinforcement of the ballast. / J. Kennedy, P.K. Woodward, G. Medero, M. Banimahd // *Construction and Building Materials*. – 2013. – № 44. – С. 615–625.
85. Keene, A. Modeling the Effect of Polyurethane Stabilization on Rail Track Response / A. Keene, T. Edil, D. Fratta, J. Tinjum // *Geotechnical special publication number*. Reston, VA: American Society of Civil Engineerings. – 2013. – № 231.
86. Woodward, P.K. Study of railway track stiffness modification by polyurethane reinforcement of the ballast / P.K. Woodward, J. Kennedy, O. Laghrouche, D.P. Connolly, G. Medero // *Transportation Geotechnics*. – 2014. – № 1(4). – С. 214–224.
87. Кругликов, А.А. Укрепление откосов земляного полотна полимерными вяжущими материалами / А.А. Кругликов, Я.М. Ермолов, М.В. Окост, И.А. Нахимович, В.А. Явна // *Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство»*. – 2017. – № 2. – С. 278–281.
88. Woodward, P.K. Application of in-situ polyurethane geocomposite beams to improve the passive shoulder resistance of railway track / P.K. Woodward, J. Kennedy, G.M. Medero, M. Banimahd // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F. J. Rail. Rapid Transit* 2011a.
89. Woodward, P.K. Maintaining absolute clearances in ballasted railway tracks using in-situ three-dimensional polyurethane GeoComposites / P.K. Woodward, J. Kennedy, G.M. Medero, M. Banimahd // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F. J. Rail. Rapid Transit* 2011b. <http://dx.doi.org/10.1177/0954409711420521>.
90. ГОСТ 27751-88. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету. – М.: Стандартинформ, 2007.
91. СНиП 32-04-97. Тоннели железнодорожные и автодорожные / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1997.
92. Никонов, А.М. Железнодорожный путь искусственных сооружений: учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / А.М. Никонов – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. – 291 с.

93. Замуховский, А.В. Экспериментальное обследование участков переменной жесткости / А.В. Замуховский, К.В. Меренченко // Мир транспорта. – 2013. – № 3. – С. 74–82.
94. Zhao, C. Application of Polyurethane Polymer and Assistant Rails to Settling the Abnormal Vehicle-Track Dynamic Effects in Transition Zone between Ballastless and Ballasted Track / C. Zhao, P. Wang, Q. Yi, D. Meng // Shock and Vibration. – 2015. – С. 1–9.
95. СП 119.13330.2017 Железные дороги колеи 1520 мм: утв. приказом Минстроя РФ от 12 декабря 2017 г. № 1648/пр. – М., 2018.
96. Живин, Р.И. Путь на подходах к искусственным сооружениям и в тоннелях / Р.И. Живин // Путь и путевое хозяйство. – 2010. – № 2.
97. Шаповалов, В.Л. Расчет конструкции сопряжения участков железнодорожного пути с различной жесткостью / В.Л. Шаповалов, Г.И. Лазоренко, В.А. Явна, З.В. Холодный, А.А. Дорошкевич // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 12. – С. 12–15.
98. Новые конструкции переходных участков с насыпи на мост: утв. совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу. – Варшава: Комитет ОСЖД, 2005. – 12 с.
99. СП 238.132.6000.2015. Железнодорожный путь. – Введ. 2015-07-06. – М.: Минтранс РФ, 2015. – С. 71.
100. Кругликов, А.А. Усиление балластной призмы двухкомпонентными полимерными связующими / А.А. Кругликов, Я.М. Ермолов, З.В. Холодный, В.А. Явна // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 2. – С. 16–19.
101. Kruglikov, A.A. Strengthening of the railway ballast section shoulder with two-component polymeric binders / A.A. Kruglikov, V.A. Yavna, Y.M. Ermolov, A.G. Kochur, Z.B. Khakiev // Transportation Geotechnics. – 2017. – Vol. 11. – P. 133–143.
102. Технические условия на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути: утв. Распоряжением ОАО «РЖД» № 75р

- [Электронный ресурс] // ИПС «Гарант». – Режим доступа: <https://base.garant.ru/70716962>.
103. Методические указания по обследованию балластного слоя № ЦПТ-16-77 / МПС СССР. – М.: Транспорт, 1979.
104. Annan, A. Ground Penetrating Radar: Principles, Procedures & Applications / A. Annan. – Mississauga: Sensors & Software Inc., 2003.
105. Yavna, V. Monitoring of railway infrastructure objects / V. Yavna, V. Shapovalov, A. Kruglikov, A. Kochur, Y. Ermolov // Construction and Maintenance of Railway Infrastructure in Complex Environment. – China: China Railway Publishing House, 2014. – P. 109–113.
106. Явна, В.А. Георадиолокационный контроль процесса укрепления балластной призмы железнодорожного пути полимерными связующими материалами / В.А. Явна, А.А. Кругликов, Я.М. Ермолов, В.Л. Шаповалов // Сб. матер. конф. «Инженерная геофизика – 2017»: г. Кисловодск, 24–28 апреля 2017 г.
107. Кругликов, А.А. Методы оценки геометрических и деформационных характеристик геокомпозита / А.А. Кругликов, А.А. Васильченко, Я.М. Ермолов, М.В. Окост, В.А. Явна // Научно-практическая конференция «Инженерная и рудная геофизика», 2019.
108. Khakiev, Z. GPR determination of physical parameters of motor road and railway structural layers / Z. Khakiev, V. Shapovalov, A. Kruglikov, V. Yavna // Journal of Applied Geophysics. – 2014. – № 106. – С. 139–145.
109. Shahraki, Ch. Numerical Study of Transition Zone Between Ballasted and Ballastless Railway Track / Ch. Shahraki, Warnakulasooriya, K.J. Witt. – 2015.
110. Альбрехт, В.Г. Бесстыковой путь / В.Г. Альбрехт, Н.П. Виногородов, Н.Б. Зверев. – М.: Транспорт, 2000. – 408 с.
111. De Iorio, A. Transverse strength of railway tracks. Part 2 / A. De Iorio, M. Grasso, F. Penta, G. P. Pucillo, V. Rosiello // Test system for ballast resistance in line measurement, Fratturaed Integrità Strutturale. – 2014. – № 30. – С. 578–592; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.30.69.

112. Indraratna, B. Performance Improvement of Rail Track Substructure using Artificial Inclusions. Experimental and Numerical Studies / B. Indraratna, S. Nimbalkar, N. Trung Ngo, T. Neville. – 2016.
113. Railway critical velocity – Analytical prediction and analysis. / Sara B. Mezher, David P. Connolly, Peter K. Woodward, Omar Laghrouche, Joao Pombo, Pedro Alves Costa // Transportation Geotechnics. – 2016. – № 6. – С. 84–96.
114. Kouroussis, G. Review of Trackside Monitoring Solutions. / G. Kouroussis, C. Caucheteur, D. Kinet, G. Alexandrou, O. Verlinden and V. Moeyaert. // From Strain Gages to Optical Fibre Sensors, Sensors. – 2015. – № 15. – С. 20115–20139. doi:10.3390/s150820115.
115. Kish, A. On the fundamentals of track lateral resistance. / A. Kish. // American Railway Engineering and Maintenance of Way Association. – 2011.
116. Berggren, E. Railway track stiffness: dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance. / E. Berggren. // Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Aeronautical and Vehicle Engineering, Div. of Rail Vehicles, Stockholm. – 2009.
117. Esmaeili, M. Experimental comparison of the lateral resistance of tracks with steel slag ballast and limestone ballast materials. / M. Esmaeili, R. Nouri, K. Yousefian // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. – 2017. – № 231. – С. 175–184.
118. Ir. R.A. van den Bosch, Principal Consultant, DeltaRail BV, Utrecht, The Netherlands. Non-destructive continuous dynamic measurement of lateral track resistance offers real-time results directly after track maintenance. Rail Engineering International Edition. – 2007. – № 2.
119. Sussmann, T. Influence of Track Maintenance on Lateral Resistance of Concrete-Tie Track. / T. Sussmann, A. Kish, M. A. & Trosino. // Transportation Research Record. – 2003. – С. 56.
120. Кругликов, А.А. Исследование балластного слоя железных дорог при организации участка пути переменной жесткости с использованием вяжущих

- материалов / А.А. Кругликов, Я.М. Ермолов, В.Л. Шаповалов, В.А. Явна // «Инженерная геофизика – 2016». – 2016.
121. Кругликов, А.А. Применение вяжущих материалов для организации переходных участков ж.-д. пути переменной жесткости / А.А. Кругликов, Я.М. Ермолов, З.В. Холодный, В.А. Явна // Труды XIII международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». – 2016. – С. 94–98.
122. Полимерная балластная конструкция высокоскоростных участков железнодорожного пути в зоне примыкания к искусственным сооружениям. Дата регистрации: 28.05.2018, Опубликовано: 28.05.2018 Бюл. № 16. Автор(ы): Явна Виктор Анатольевич (RU), Каспржицкий Антон Сергеевич (RU), Лазоренко Георгий Иванович (RU), Окост Максим Викторович (RU), Хакиев Зелимхан Багауддинович (RU), Шаповалов Владимир Леонидович (RU), Морозов Андрей Владимирович (RU), Кругликов Александр Александрович (RU), Ермолов Яков Михайлович (RU) (73) Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС) (RU).
123. Карпов, А.Ю. Диагностика инженерных объектов методом георадиолокации / А.Ю. Карпов, А.В. Морозов, М.В. Окост, В.Л. Шаповалов. // 4-я Международная научно-практическая конференция и выставка «Инженерная и рудная геофизика – 2008». – Геленджик, 2008.
124. Капустин, В.В. Возможности геофизических методов на этапе сопровождения строительства и эксплуатации сооружений. / В.В Капустин, В.В Монахов // 7-я Международная конференция и выставка «Инженерная и рудная геофизика – 2011». – 2011.
125. ТУ (Общие технические условия применения технологии омоноличивания балластной призмы вяжущими материалами). – М.: ОАО «РЖД», 2013.
126. Кругликов, А.А. Усиление плеча балластной призмы железнодорожного пути двухкомпонентными полимерными связующими. / А.А. Кругликов, Я.М.

- Ермолов, З.Б Хакиев, М.В. Окост, В.А. Явна // Труды междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт-2015». – 2015. – С. 52–54.
127. Кругликов, А.А. Усиление балластной призмы железнодорожного пути двухкомпонентными полимерными связующими / А.А. Кругликов, Я.М. Ермолов, З.В. Холодный, В.А Явна. // Труды XII Междунар. науч.-техн. конф. «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». Чтения, посвященные 110-летию профессора Г.М. Шахунянца. – 2015. – С. 85–189.
128. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2011613071 Российская Федерация. Скоростная георадиолокационная диагностика земляного полотна / Явна В.А., Хакиев З.Б., Каспржицкий А.С., Шаповалов В.Л., Окост М.В., Морозов А.В., Кругликов А.А.; заявитель и патентообладатель Явна В.А., Хакиев З.Б., Каспржицкий А.С., Шаповалов В.Л., Окост М.В., Морозов А.В., Кругликов А.А.; заявл. 21.02.11; зарег. в реестре 18.04.11.
129. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2011613070 Российская Федерация. Скоростная георадиолокационная диагностика земляного полотна – визуализация / Явна В.А., Хакиев З.Б., Каспржицкий А.С., Шаповалов В.Л., Окост М.В., Морозов А.В., Кругликов А.А.; заявитель и патентообладатель Явна В.А., Хакиев З.Б., Каспржицкий А.С., Шаповалов В.Л., Окост М.В., Морозов А.В., Кругликов А.А.; заявл. 21.02.11; зарег. в реестре 18.04.11.
130. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2012618628 Российская Федерация. Многоканальное профилирование конструкционных слоев автомобильных и железных дорог в режиме реального времени / Явна В.А., Хакиев З.Б., Каспржицкий А.С., Шаповалов В.Л., Окост М.В., Морозов А.В., Кругликов А.А.; Лазоренко Г.И., заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»; заявл. 06.08.12; зарег. в реестре 21.09.12.
131. Кругликов, А.А. Оценка воздействия подвижного состава на переходные участки ж.-д. пути переменной жесткости / А.А. Кругликов, Я.М. Ермолов, З.Б.

- Хакиев, М.В. Окост, В.А. Явна // Сб. науч. тр. «Транспорт: наука, образование, производство». – Ростов н/Д: Рост. гос. ун-т. путей сообщения, 2016. – Т. 4. – С. 78–82.
132. Lin, C. Effect of different sizes of graphene on Diels-Alder self-healing polyurethane. / C. Lin, D. Sheng, X. Liu, S. Xu, F. Ji, L. Dong, Y. Zhou, Y. Yang // *Polymer*. – 2019. – № 182. – С. 121822.
133. Adak, B. Polyurethane/functionalized-graphene nanocomposite films with enhanced weather resistance and gas barrier properties. / B. Adak, M. Joshi, B.S. Butola // *Composites Part B: Engineering*. – 2019. – № 176. – С. 107303.
134. Sarafrazi, M. Optimize epoxy matrix with RSM/CCD method and influence of multi-wall carbon nanotube on mechanical properties of epoxy/polyurethane. / M. Sarafrazi, M. Hamadani, A.R. Ghasemi // *Mechanics of Materials*. – 2019. – № 138. – С. 103154.
135. Ha, Y.-M. Rapidly self-heating shape memory polyurethane nanocomposite with boron-doped single-walled carbon nanotubes using near-infrared laser. / Y.-M. Ha, Y.-O. Kim, Y.-N. Kim, J. Kim, J.-S. Lee, J.W. Cho, M. Endo, H. Muramatsu, Y.A. Kim, Y.C. Jung // *Composites Part B: Engineering*. – 2019. – № 175. – С. 107065.
136. Tian, D. High-performance polyurethane nanocomposites based on UPy-modified cellulose nanocrystals. / D. Tian, F. Wang, Z. Yang, X. Niu, Q. Wu, P. Sun // *Carbohydrate Polymers*. – 2019. – № 219. – С. 191–200.
137. Lei, W. New approach to recycle office waste paper: Reinforcement for polyurethane with nano cellulose crystals extracted from waste paper. / W. Lei, X. Zhou, C. Fang, Y. Li, Y. Song, C. Wang, Z. Huang // *Waste Management*. – 2019. – № 95. – С. 59–69.
138. Awad, S. Free volume properties of the zinc oxide nanoparticles/waterborne polyurethane coating system studied by a slow positron beam (2019). / S. Awad, A. Al-Rashdi, E.E. Abdel-Hady, Y.C. Jean., J.D. Van Horn // *Journal of Composite Materials*. – 2019. – № 53(13). – С. 1765–1775.
139. Nematollahi, M.H. CO<sub>2</sub> separation over light gases for nano-composite membrane comprising modified polyurethane with SiO<sub>2</sub> nanoparticles (2019) / M.H.

- Nematollahi, S. Babaei, R. Abedini // *Korean Journal of Chemical Engineering*. – 2019. – № 36(5). – С. 763–779.
140. Kasprzhitskii, A.S. Preparation and structural characterization of organoclay based on zwitterionic surfactant: A comparative study. / A.S. Kasprzhitskii, G.I. Lazorenko, V.A. Yavna // *Book of Abstracts 8th Mid-European Clay Conference*. – 2016. – С. 134.
141. Steve, J. Baseline studies of the clay minerals society source. / J. Steve, Chipera and David L. Bish // *Chtys and Clay Minerals*. – 2001. – № 5.
142. Каспржицкий, А.С. Разработка новых органоглин на основе цвитерионных ПАВ для получения полимерных нанокомпозитов с регулируемыми свойствами. / А.С. Каспржицкий, Г.И. Лазоренко, В.А. Явна // *Труды Второго междисциплинарного молодежного научного форума с международным участием «Новые материалы»*. – 2016. – С. 78–79.
143. Bian, X. Full-scale model testing on a ballastless high-speed railway under simulated train moving loads / X. Bian, H. Jiang, C. Cheng, Y. Chen, R. Chen, J. Jiang // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2014. – № 66. – P. 368–384.
144. Correia dos Santos, N. Track-ground vibrations induced by railway traffic: experimental validation of a 3D numerical model / N. Correia dos Santos, J. Barbosa, R. Calçada, R. Delgado // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2017. – № 97. – С. 324–344.
145. Явна, В.А. Оценка динамического воздействия подвижного состава на объекты железнодорожной инфраструктуры / В.А. Явна, А.А. Кругликов, З.Б. Хакиев, В.Л. Шаповалов, М.В. Окост, А.В. Морозов // *Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог*. – 2014. – № 2 (26). – С. 33–35.
146. Loktev, A.A. Modeling the Dynamic Behavior of the Upper Structure of the Railway Track / A.A. Loktev, V.V. Korolev, I.V. Shishkina, D.A. Basovsky // *Procedia Engineering*. – 2017. – № 189. – С. 133–137.
147. Daves, W. A finite element model to simulate the physical mechanisms of wear and crack initiation in wheel/rail contact / W. Daves, W. Kubin, S. Scheriau, M. Pletz // *Wear*. – 2016. – № 366–367. – С. 78–83.

148. Mai, S.H. Numerical simulation of rolling contact fatigue crack growth in rails with the rail bending and the frictional contact / S.H. Mai, A. Gravouil, M.L. Nguyen-Tajan, B. Trollé // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2017. – № 174. – С. 196–206.
149. Trung, N. Modelling geogrid-reinforced railway ballast using the discrete element method / N. Trung, B. Indraratna, C. Rujikiatkamjorn // *Transportation Geotechnics*. – 2016. – № 8. – С. 86–102.
150. Li, W. Dynamic Performance of Pile-supported Bridge-embankment Transition Zones Under High-speed Train Moving Loads / W. Li, X. Bian // *Procedia Engineering*. – 2016. – № 143. – С. 1059–1067.
151. Xiao, J. Shakedown behaviors of railway ballast under cyclic loading / J. Xiao, D. Zhang, K. Wei, Z. Luo // *Construction and Building Materials*. – 2017. – № 155. – С. 1206–1214.
152. Woodward, P.K. Application of in situ polyurethane geocomposite beams to improve the passive shoulder resistance of railway track / P.K. Woodward, J. Kennedy, G.M. Medero, M. Banimahd // *Proc. IMechE Part F: J. Rail Rapid Transit*. – 2011. – № 226. – С. 294–304.
153. Хакиев, З.Б. Компьютерное моделирование свойств плеча балластной призмы железнодорожного пути, омоноличенной полимерными связующими на основе полиуретана / З.Б. Хакиев, А.А. Кругликов, Я.М. Ермолов, В.А. Явна // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2018. – № 3 (71). – С. 142–152.
154. Борисов, А.В. Численное моделирование физических процессов с применением метода конечных элементов на базе COMSOL Multiphysics / А.В. Борисов, А.А. Воронцов. – Томск, 2010. – С. 92.
155. Кругликов, А.А. Применение метода конечных элементов при устройстве удерживающих конструкций на оползнеопасных склонах / А.А. Кругликов, Г.И. Лазоренко, Я.М. Ермолов, В.А. Явна // «Инженерная геофизика – 2015». – 2015.
156. Трусков, П.В. Введение в математическое моделирование: учеб. пособие / П.В. Трусков. – М.: Университетская книга, Логос, 2007. – 440 с.

## Справка

**по объему выполненных работ по закреплению (пропитке) плеча балластной призмы двухкомпонентным вяжущим RT-RC-001.  
Северо-Кавказская железная дорога**

Таблица А.1

2013 год

1	На участке пути № 3-КМ от сигнала НМБ до СП № 505 ст. Тихорецкая (ПЧ-6) Северо-Кавказской ж.д. (100 м пути омоноличено в порядке эксперимента)	
2	На перегоне Якорная Щель – Лоо по четному пути 1942 км ПК9-10 Северо-Кавказской ж.д. (80 м пути омоноличено в порядке эксперимента).	
3	На перегоне Лоо – Дагомыс по четному пути 1951 км ПК-10 Северо-Кавказской ж.д. (80 м пути омоноличено (в порядке эксперимента))	
Всего погонных метров пути		<b>260</b>

Таблица А.2

2014 год

Участок: Лихая – Морозовская. Перегон: Белая Калитва – Грачи нечетный путь (по титулу «модернизация пути»)						
№	Начало участка		Конец участка		Радиус кривой	Протяженность участков в погонных метрах пути
	Км	ПК	Км	ПК		
4	53	0 + 85	53	3 + 15	551 м	230
5	56	8 + 13	57	2 + 05	503 м	392
6	57	2 + 16	57	8 + 19	524 м	603
7	64	5 + 82	65	3 + 58	542 м	776
Всего погонных метров пути						<b>2001</b>

Таблица А.3

2015 год

Перегон: Белая Калитва – Грачи, путь четный (по титулу «модернизация пути»)						
№	Начало участка		Конец участка		Радиус кривой	Протяженность участков в погонных метрах пути
	Км	ПК	Км	ПК		
8	52	8+23	53	9+1	550 м	268
9	56	8+33	57	1+96	435 м	363
10	63	8+30	64	4+93	458 м	663
Всего погонных метров пути						<b>1294</b>

Таблица А.4

2015 год

Участок: Туапсе – Веселое. Перегон: Лоо – Дагомыс, путь нечетный						
№	Начало участка		Конец участка		Радиус кривой	Протяженность участков в погонных метрах пути
	Км	ПК	Км	ПК		
11	1953	1+99	1953	3+34		135
12	1950	7	Участок переменной жесткости			360
Всего погонных метров пути						<b>495</b>
Всего погонных метров пути по СКЖД						<b>3770</b>

2017 год

Забайкальская железная дорога						
№	Начало участка		Конец участка		Радиус кривой	Протяженность участков в погонных метрах пути
	Км	ПК	Км	ПК		
Перегон Жипхеген – Хилок						
1	5924	5+0	5924	9+0	337 м	400
Перегон Хилок – Гыршелун						
2	5939	8	5940	1	305	300
3	5945	5+0	5945	8+0	327	400
Перегон Кадала – Чита						
4	6192	1	6192	5	632	500
Перегон Размахино – Казаново						
5	6402	1	6402	3	440	300
6	6408	4	6408	6	380	250
7	6409	2	6409	3	624	300
8	6409	8	6410	2	310	400
9	6417	1	6417	3	570	300
10	6417	5	6417	9	320	400
11	6421	2	6421	4	570	300
Всего погонных метров пути						<b>3850</b>



комиссионного обследования участков пути с омоноличенным плечом балластной призмы двухкомпонентным вяжущим составом на основе полиуретана.

Ст. Хилок

31.05.2017

Комиссия в составе:

Председателя:

Главного инженера службы пути Забайкальской ДИ – Семенова Ю.В.

И членов комиссии:

Начальника дистанции пути ПЧ-2 – Овчинникова С.Н.

Начальника – 2-го участка – Кожина Д.Л.

Заведующего кафедрой физики, профессора РГУПС – Явны В.А.

Главного инженера проекта ООО «МК-20» – Холодного З.В.

Заместителя технического директора ООО «МК-20» – Кузнецова И.А.

На основании телеграммы ЦПГ Лисицына А.И. № ИСХ-18420/ЦДИ от 23.05.2017 проведено обследование участка пути соблюдения требований безопасности и эффективности применения технологии омоноличивания плеча балластной призмы для повышения сопротивления рельсошпальной решетки сдвигу.

#### Характеристика участка:

Перегон Жипхеген – Хилок и Хилок - Гыршелун, класс пути 1А3, установленная скорость движения поездов для пассажирских 70 км\ч, грузовых 70 км\ч, электрифицированный, рельсы Р-65 (рельсовая плеть);

скрепление ЖБР-65Ш, грузонапряженность – 147,8 млн. т брутто, пропущенный тоннаж 278 млн. т брутто, с момента эксплуатации участка с пропиткой пропущенный тоннаж 110 млн. т брутто.

При натурном обследовании определены следующие параметры:

1. Геометрические размеры и состояние зоны балластной призмы омоноличенной связующим материалом ДПС - РТ- КС-001:

1.1. Контроль геометрических размеров выполнен стандартной рулеткой с ценой деления 1 мм.

1.2. Контроль глубины омоноличенного слоя щебня выполнен путем шурфления и замеров стандартной рулеткой с ценой деления 1 мм.

1.3. Контроль сопротивления плеча балластной призмы поперечному сдвигу определялся прибором ИСС-1 (с точностью 5 бар.), (прибор ИСС-1 диаметр цилиндра 40 мм.) На камеральном этапе работ, данные измерения при сдвиге плеча балластной призмы, по показаниям манометра в (барах), преобразованы в усилие сопротивления плеча балластной призмы в кН. Коэффициент перевода показаний для данного, от показаний манометра бар. в кН составляет  $K = 12,56$

2. Результаты натурных обследований и камеральной обработки приведены в табличной форме по участкам:

Таблица 2.2. Сопротивления плеча балластной призмы

Км, ПК участка	Протяженность	Радиус	Глубина на пропитки (м)	№ измерения	Показание прибора в (Бар)	Усилие сдвига в (кН)	Среднее усилие сдвига в (кН)
Перегон Жипхеген – Хилок							
5924 км ПК 5 – 9	400	337	31	1	240	30,1	30,7
			33	2	250	31,4	
Перегон Хилок - Гыршелун							
5939 км ПК 8 5940 км ПК 1	300	305	32	1	250	31,4	31,4
			36	2	250	31,4	
5945 км ПК 5 – 8	400	327	30	1	220	27,6	21,9
			30	2	130	16,3	

**Общие результаты осмотра:**

Внешний осмотр участков пути с закреплением плеча балластной призмы двухкомпонентным вяжущим составом на основе полиуретана, показал:

1. Участок с омоноличенным плечом балластной призмы не имеет внешних повреждений;
2. Ширина закрепленной полосы балласта по всем участкам составляет 0,5 метра;
3. Сопротивление плеча балластной призмы поперечному сдвигу на участках пути не закрепленных двухкомпонентным вяжущим составом на основе полиуретана, измеренное по методике неразрушающего контроля\* прибором ИСС-1 составило 30 бар или 3,8 Кн.

**Выводы:**

1. Участки пути с закреплением плеча балластной призмы двухкомпонентным вяжущим составом на основе полиуретана за период эксплуатации с 05.10.2016 (по сопоставлению с актами первичных осмотров) не имеют внешних повреждений и изменений геометрических размеров.
2. Плечо балластной призмы закрепленное двухкомпонентным вяжущим составом на основе полиуретана обеспечивает повышение сопротивления плеча балластной призмы поперечному сдвигу в 5,6 -9 раза по сравнению с не закрепленными участками пути.
3. Наблюдается отсутствие отрясённости щебня по концам шпал с омоноличенным плечом балластной призмы по сравнению с не закрепленными участками пути.
4. Наблюдается отсутствие неисправностей (рихтовка) по лентам вагона-путеизмерителя.
5. Хилокской дистанции пути Забайкальской ДИ продолжить наблюдение за опытными участками пути с соблюдением требований методики неразрушающего контроля.

6. Ежеквартально проводить анализ состояния участка пути требованиям безопасности по лентам вагонапутьеизмерителя, вести учет производимых работ путевыми бригадами и механизированными комплексами.

7. Представить предложения с технико-экономическим обоснованием о целесообразности применения данной технологии в рамках Забайкальской железной дороги.

A collection of handwritten signatures in blue ink, arranged vertically. The signatures are stylized and cursive, corresponding to the names listed to their right.

Семенов Ю.В.

Овчинников С.Н.

Вийтовича А.О.

Кожин Д.Л.

Явна В.А.

Холодный З.В.

Кузнецов И. А.



## Акт

комиссионного обследования участков пути с омоноличенным плечом балластной призмы двухкомпонентным вяжущим составом на основе полиуретана.

Ст. Чита

30.05.2017

Комиссия в составе:

Председателя:

Главного инженера службы пути Забайкальской ДИ – Семенова Ю.В.

И членов комиссии:

Начальника дистанции пути ПЧ-4 – Кучера А.М.

Начальника 1-го участка – Вийтовича А.О.

Заведующего кафедрой физики, профессора РГУПС – Явны В.А.

Главного инженера проекта ООО «МК-20» – Холодного З.В.

Заместителя технического директора ООО «МК-20» – Кузнецова И.А.

На основании телеграммы ЦПГ Лисицына А.И. № ИСХ-18420/ЦДИ от 23.05.2017 проведено обследование участка пути соблюдения требований безопасности и эффективности применения технологии омоноличивания плеча балластной призмы для повышения сопротивления рельсошпальной решетки сдвигу.

**Характеристика участка:**

Перегон Кадала – Чита 6192 км пк 1-5, класс пути 1А3, установленная скорость движения поездов для пассажирских 70 км/ч, грузовых 70 км/ч, электрифицированный, рельсы Р-65 (рельсовая плеть); крепление

ЖБР-65Ш, грузонапряженность – 147,4 млн. т брутто, пропущенный тоннаж 278 млн. т брутто, с момента эксплуатации участка с пропиткой пропущенный тоннаж 106 млн. т брутто.

При натурном обследовании определены следующие параметры:

1. Геометрические размеры и состояние зоны балластной призмы омоноличенной связующим материалом ДПС - РТ- КС-001:

1.1. Контроль геометрических размеров выполнен стандартной рулеткой с ценой деления 1 мм.

1.2. Контроль глубины омоноличенного слоя щебня выполнен путем шурфления и замеров стандартной рулеткой с ценой деления 1 мм.

1.3. Контроль сопротивления плеча балластной призмы поперечному сдвигу определялся прибором ИСС-1 (с точностью 5 bar.), (прибор ИСС-1 диаметр цилиндра 40 мм.) На камеральном этапе работ, данные измерения при сдвиге плеча балластной призмы, по показаниям манометра (в барах), преобразованы в усилие сопротивления плеча балластной призмы в кН. Коэффициент перевода показаний для данного, от показаний манометра bar. в кН составляет  $K = 12,56$

2. Результаты натурных обследований и камеральной обработки приведены в табличной форме по участкам:

Таблица 2.2. Сопротивления плеча балластной призмы

Км, ПК участка	Протяженность	Радиус	Глубина на пропитки (м)	№ измерения	Показание прибора в (Бар)	Усилие сдвига в (кН)	Среднее усилие сдвига в (кН)
Кадала – Чита							
6192 км ПК 1 - 5	500	632	32	1	160	20,1	19,15
			33	2	145	18,2	

**Общие результаты осмотра:**

Внешний осмотр участков пути с закреплением плеча балластной призмы двухкомпонентным вяжущим составом на основе полиуретана, показал:

1. Участок с омоноличенным плечом балластной призмы не имеет внешних повреждений;
2. Ширина закрепленной полосы балласта по всем участкам составляет 0,5 метра;
3. Сопротивление плеча балластной призмы поперечному сдвигу на участках пути не закрепленных двухкомпонентным вяжущим составом на основе полиуретана, измеренное по методике неразрушающего контроля\* прибором ИСС-1 составило 23 бар или 3,6 Кн.

**Выводы:**

1. Участки пути с закреплением плеча балластной призмы двухкомпонентным вяжущим составом на основе полиуретана за период эксплуатации с 05.10.2016 (по сопоставлению с актами первичных осмотров) не имеют внешних повреждений и изменений геометрических размеров.
2. Плечо балластной призмы закрепленное двухкомпонентным вяжущим составом на основе полиуретана обеспечивает повышение сопротивления плеча балластной призмы поперечному сдвигу в 6,7 раза по сравнению с не закрепленными участками пути.
3. Наблюдается отсутствие отрясённости щебня по концам шпал с омоноличенным плечом балластной призмы по сравнению с не закрепленными участками пути.
4. Наблюдается экономия щебня (осыпание) на участках несанкционированного прохода граждан.
5. Читинской дистанции пути Забайкальской ДИ продолжить наблюдение за опытными участками пути с соблюдением требований методики неразрушающего контроля.
6. Ежеквартально проводить анализ состояния участка пути требованиям безопасности по лентам вагонапутьеизмерителя, вести учет

производимых работ путевыми бригадами и механизированными комплексами.

7. Представить предложения с технико-экономическим обоснованием о целесообразности применения данной технологии в рамках Забайкальской железной дороги.



Семенов Ю.В.  
Кучер А. М.  
Вийтович А.О.  
Явна В.А.  
Холодный З.В.  
Кузнецов И. А.



комиссионного обследования участков пути с омоноличенным плечом балластной призмы двухкомпонентным вяжущим составом на основе полиуретана.

Ст. Шилка

1.06.2017

Комиссия в составе:

Председателя:

Главного инженера службы пути Забайкальской ДИ – Семенова Ю.В.

И членов комиссии:

Инженер ИГБ ДИЦДМ – Разумовского В.В.

Начальник участка – Погорельцева И.В.

Заведующего кафедрой физики, профессора РГУПС – Явны В.А.

Главного инженера проекта ООО «МК-20» – Холодного З.В.

Заместителя технического директора ООО «МК-20» – Кузнецова И.А.

На основании телеграммы ЦПГ Лисицына А.И. № ИСХ-18420/ЦДИ от 23.05.2017 проведено обследование участка пути соблюдения требований безопасности и эффективности применения технологии омоноличивания плеча балластной призмы для повышения сопротивления рельсошпальной решетки сдвигу.

**Характеристика участка:**

Перегон Размахнино - Казаново, класс пути 1А3, установленная скорость движения поездов для пассажирских 70 км\ч, грузовых 70 км\ч, электрифицированный, рельсы Р-65 (рельсовая плеть); крепление ЖБР-

65Ш, ПШМ, грузонапряженность – 128,4 млн. т брутто, пропущенный тоннаж 169,2 млн. т брутто, с момента эксплуатации участка с пропиткой пропущенный тоннаж 107 млн. т брутто.

При натурном обследовании определены следующие параметры:

1. Геометрические размеры и состояние зоны балластной призмы омоноличенной связующим материалом ДПС - РТ- КС-001:

1.1. Контроль геометрических размеров выполнен стандартной рулеткой с ценой деления 1 мм.

1.2. Контроль глубины омоноличенного слоя щебня выполнен путем шурфления и замеров стандартной рулеткой с ценой деления 1 мм.

1.3. Контроль сопротивления плеча балластной призмы поперечному сдвигу определялся прибором ИСС-1 (с точностью 5 бар.), (прибор ИСС-1 диаметр цилиндра 40 мм.) На камеральном этапе работ, данные измерения при сдвиге плеча балластной призмы, по показаниям манометра в (барах), преобразованы в усилие сопротивления плеча балластной призмы в кН. Коэффициент перевода показаний для данного, от показаний манометра бар. в кН составляет  $K = 12,56$

2. Результаты натурных обследований и камеральной обработки приведены в табличной форме по участкам:

Таблица 2.3. Сопротивления плеча балластной призмы

Км, ПК участка	Протяженность	Радиус	Глубина пропитки (м)	№ измерения	Показание прибора в (Бар)	Усилие сдвига в (кН)	Среднее усилие сдвига в (кН)
Перегон	Перегон	Размахино – Казаново					
6402 км ПК 1 - 3	300	440	30	1	200	25,1	27,6
				2	240	30,1	
6408 км ПК 4 – 6	250	380	34	1	220	27,6	28,9
				2	240	30,1	
6409 км ПК 2 – 3	300	624	31	1	250	31,4	30,8
				2	240	30,1	
6409 км ПК 8 – 6410 км ПК 2,	400	310	30	1	220	27,6	25,7
				2	190	23,9	
6417 км ПК 1 – 3	300	570	32	1	200	25,1	25,1
				2	200	25,1	
6417 км ПК 5 – 9	400	320	30	1	190	23,9	27,6
				2	250	31,4	
6421 км ПК 2 – 4	300	570	35	1	230	28,9	28,9
				2	230	28,9	

**Общие результаты осмотра:**

Внешний осмотр участков пути с закреплением плеча балластной призмы двухкомпонентным вяжущим составом на основе полиуретана, показал:

1. Участок с монолитическим плечом балластной призмы не имеет внешних повреждений;
2. Ширина закрепленной полосы балласта по всем участкам составляет 0,5 метра;

3. Сопротивление плеча балластной призмы поперечному сдвигу на участках пути не закрепленных двухкомпонентным вяжущим составом на основе полиуретана, измеренное по методике неразрушающего контроля\* прибором ИСС-1 составило 30 бар или 3,8 Кн.

**Выводы:**

1. Участки пути с закреплением плеча балластной призмы двухкомпонентным вяжущим составом на основе полиуретана за период эксплуатации с сентября 2016 года (по сопоставлению с актами первичных осмотров) не имеют внешних повреждений и изменений геометрических размеров.

2. Плечо балластной призмы закрепленное двухкомпонентным вяжущим составом на основе полиуретана обеспечивает повышение сопротивления плеча балластной призмы поперечному сдвигу в 5,6 -9 раза по сравнению с не закрепленными участками пути.

3. Наблюдается отсутствие отрясённости щебня по концам шпал с омоноличенным плечом балластной призмы по сравнению с не закрепленными участками пути.

4. На участке 6417 пк 5-7 и 6421 пк 2-4 наблюдается осыпание щебня из-за недостаточной обочины полотна (ширина основной площадки), при этом сохранено плечо балластной призмы 50 см омоноличенное двухкомпонентным вяжущим материалом, что обеспечивает требования безопасности для пропуска поездов.

5. Наблюдается отсутствие неисправностей (рихтовка) по лентам вагона-путеизмерителя.

6. Шилковской дистанции пути Забайкальской ДИ продолжить наблюдение за опытными участками пути с соблюдением требований методики неразрушающего контроля.

7. Ежеквартально проводить анализ состояния участка пути требованиям безопасности по лентам вагонапутеизмерителя, вести учет

производимых работ путевыми бригадами и механизированными комплексами.

8. Представить предложения с технико-экономическим обоснованием о целесообразности применения данной технологии в рамках Забайкальской железной дороги.

A vertical column of five handwritten signatures in blue ink, corresponding to the names listed to the right. The signatures are stylized and cursive.

Семенов Ю.В.

Погорельцев И. В.

Разумовский В.В.

Явна В.А.

Холодный З.В.

Кузнецов И. А.



**РОСЖЕЛДОР**  
**Федеральное государственное бюджетное**  
**образовательное учреждение высшего образования**  
**«Ростовский государственный университет путей сообщения»**  
**(ФГБОУ ВО РГУПС)**

пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038  
 Тел. (863) 245-06-13, Факс (863) 255-32-83, 245-06-13, E-mail: up\_del@dep.rgups.ru  
 ОКПО 01116006, ОГРН 1026103709499, ИНН/КПП 6165009334/616501001

Утверждаю:

Проректор по научной работе  
 д.т.н., профессор



А.Н. Гуда

«17» 09 2020 г.

### АКТ

внедрения результатов диссертационных исследований

**Ермолова Якова Михайловича**

на тему: «Модификация свойств балластной призмы полимерными  
 вяжущими материалами»

Мы, нижеподписавшиеся члены комиссии в составе: председатель – директор научно-исследовательской части ФГБОУ ВО РГУПС, к.т.н., доцент Носков В.Н.; члены комиссии: с.н.с. НОЦ «Диагностика объектов инженерной инфраструктуры» НИЧ ФГБОУ ВО РГУПС, к.т.н., доцент Шаповалов В.Л. и доцент кафедры «Физика» ФГБОУ ВО РГУПС, к.т.н. Морозов А.В. составили настоящий акт о том, что теоретические и практические результаты диссертационных исследований Ермолова Я.М. на тему «Модификация свойств балластной призмы полимерными вяжущими материалами», представленных на соискание ученой степени кандидата наук, содержащие научную новизну и включающие:

- технологию полимерного закрепления плеча балластной призмы в кривых малого радиуса для повышения поперечной устойчивости рельсошпальной решетки и балластного основания на подходах к искусственным сооружениям на действующих участках железных дорог;
- технологию определения свойств омоноличенного балласта и изучения физико-механических параметров конструкции балластной призмы с закрепленным плечом;

- компьютерную модель и результаты компьютерного моделирования свойств балластной призмы с закрепленным плечом для обоснования параметров конструкции в кривых малого радиуса;

- технологические решения при проектировании и строительстве участков переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям омоноличиванием балластного слоя;

- метод улучшения свойств двухкомпонентных вяжущих материалов на основе полиуретана, применяемых для закрепления плеча балластной призмы в кривых малого радиуса и омоноличивания балласта на подходах к искусственным сооружениям;

использованы в ОАО «РЖД» при разработке проектов и проведении работ по укреплению плеча балластной призмы и оценке качества их выполнения на участках железнодорожного пути Северо-Кавказской и Забайкальской железных дорог – филиалов ОАО «РЖД».

Некоторые научные положения диссертации изложены в нижеперечисленных отчетах о хозяйственных научно-исследовательских работах, которые выполнены с участием Ермолова Я.М. (в качестве исполнителя работ) и сданы Заказчикам (АО «Росжелдорпроект», ОАО «РЖД» и ООО «РТ-Полипласт») в установленном порядке:

1. «Определение оптимальных параметров закрепления балластной призмы железнодорожного пути связующим материалом на основе полиуретана с применением присадок». Договор № 2017 г. Акт приемки работ № 1 от 14.12.2017 г.

2. «Выполнение проектных работ по объекту: «Участок Гойтх-Индюк, путь однопутный, 1850 км ПК 1 – 1852 км ПК 1 км», 2018 г. Акт приемки работ № 2 от 25.06.2018 г.

3. «Выполнение проектных работ по объекту: «Участок Кабардинская - Хадьженская, путь однопутный, 1814 км ПК 1 - 1815 км ПК 4», 2018 г. Акт приемки работ № 2 от 25.06.2018 г. Акт приемки работ № 3 от 29.12.2018 г.

4. «Выполнение проектных работ по объекту: «Участок Чинары-Чилипси (тоннель), путь однопутный, 1736 км ПК 4 – 1739 км ПК 4»». 2018 г. Акт приемки работ № 1 от 29.12.2018 г.

5. «Выполнение проектных и изыскательских работ по объекту: «Станция Индюк (тоннели), путь однопутный, 1853 км ПК 7 - 1856 км ПК 1» 2020 г. Акт приемки работ № 2 от 25.02.2020 г.

Использование результатов диссертационных исследований Ермолова Я.М., а также применение разработанных им методов и технологий повышения поперечной устойчивости рельсошпальной решетки закреплением плеча балластной призмы двухкомпонентными вяжущими на основе

полиуретана, ведет к сокращению расходов железнодорожного транспорта на текущее содержание и ремонт, повышает безопасность движения поездов.

Председатель комиссии:

Директор

научно-исследовательской части

ФГБОУ ВО РГУПС, к.т.н., доцент

В.Н. Носков

Члены комиссии:

с.н.с. НОЦ ДООИ НИЧ

В.Л. Шаповалов

доцент кафедры «Физика»

А.В. Морозов



ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»  
ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДИРЕКЦИЯ  
ИНФРАСТРУКТУРЫ

ПОРУЧЕНИЕ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ г. № \_\_\_\_\_

(о подконтрольной эксплуатации кривых участков пути с закреплением плеча балластной призмы)

В целях изучения эффективности применения технологии закрепления плеча балластной призмы, откосов насыпи земляного полотна:

1. Отанесяну В.В.  
Третьяку П.А.

1.1. Определите в качестве опытного полигона участки пути Северо-Кавказской и Забайкальской железных дорог с укрепленным плечом балластной призмы и откоса насыпи для проведения испытаний в целях изучения показателей устойчивости бесстыкового пути против выброса.

Срок – 20.07.2017.

1.2. Обеспечьте ежеквартальное комиссионное обследование кривых с укреплением плеча балластной призмы в границах дорог с обязательным контролем их положения в плане и профиле по результатам геодезической съемки и анализа графических лент по проходам вагона-путеизмерителя с последующим представлением в Центральную дирекцию инфраструктуры.

1.3. Привлеките Центр диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры к проведению эксплуатационных испытаний омоноличенных кривых и откоса насыпи земляного полотна.

1.4. С учетом имеющегося опыта эксплуатации кривых участков пути с укрепленным плечом балластной призмы представьте предложения по дальнейшему применению технологии в рамках текущих и планируемых проектов нового строительства, реконструкции и текущего содержания объектов железнодорожной инфраструктуры.

Срок – 01.08.2017.

Электронная подпись. Подписал: Борозин А.А.  
№ЦДМ-327/п от 11.07.2017

2. Воробьеву В.Б. (по согласованию)

Обеспечьте включение в план работ путеобследовательских станций ПС-1 и ПС-8 наблюдение за подконтрольной эксплуатацией кривых участков пути с закреплением плеча балластной призмы в границах Северо-Кавказской и Забайкальской железных дорог

Срок – 01.08.2017.

3. Третьяку П.А.

Воробьеву В.Б. (по согласованию)

Представьте технико-экономическое обоснование закрепления плеча балластной призмы двухкомпонентным связующим составом ДПС-RT-RC-001 в кривых участках пути малого радиуса.

Срок – 01.11.2017.

Первый заместитель  
начальника дирекции

А.А.Борецкий