

На правах рукописи



Ермолов Яков Михайлович

**МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ БАЛЛАСТНОЙ ПРИЗМЫ
ПОЛИМЕРНЫМИ ВЯЖУЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ**

05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование
железных дорог

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону

2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС).

Научный руководитель: **Явна Виктор Анатольевич,**
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Физика» ФГБОУ ВО
«Ростовский государственный университет путей
сообщения»

Официальные оппоненты: **Ашпиз Евгений Самуилович,**
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Путь и путевое хозяйство» ФГАОУ ВО
«Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ))

Колос Алексей Федорович,
кандидат технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Строительство дорог транспортного
комплекса» ФГБОУ ВО «Петербургский
государственный университет путей сообщения
Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Сибирский государственный университет путей
сообщения (ФГБОУ ВО СГУПС)

Защита состоится «28» декабря 2020 г. в 11.30 часов на заседании диссертационного совета Д 218.010.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС) по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 (главный корпус, конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, конференц-зал и на сайте <http://www.rgups.ru>.

Автореферат разослан «__» ноября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 218.010.02,
доктор технических наук, профессор



П.Н. Щербак

Актуальность темы исследования.

Свойства конструкции железнодорожного пути существенным образом определяют уровень допускаемых скоростей движения поездов и затраты на его текущее содержание.

Среди отечественных исследователей вопросам повышения устойчивости железнодорожного пути, совершенствованию методов измерения параметров его устойчивости, а также модификации свойств конструкции посвящены работы Г.М. Шахунянца, А.Ю. Абдурашитова, Г.Л. Аккермана, Е.С. Ашпиза, Л.С. Блажко, В.В. Виноградова, Э.М. Доброва, А.А. Дорошкевича, П.И. Дыдышко, А.В. Замуховского, А.Л. Исакова, В.Д. Казарновского, А.Я. Когана, А.Ф. Колоса, Г.Г. Коншина, М.Я. Крицкого, А.Л. Ланиса, С.Я. Луцкого, В.И. Новаковича, В.О. Певзнера, И.В. Прокудина, Ю.С. Ромена, А.В. Савина, Г.М. Стояновича, Т.В. Суворовой, О.А. Сулова, В.П. Сычева, Ю.К. Фроловского, В.А. Явны. Среди зарубежных исследователей, работающих над перечисленными проблемами в последние годы, известны работы М. Эсмаейли, Б. Индратратна, Л. Ле Пен, П.К. Вудворд, А. Кин, Дж. Кеннеди.

В данной работе рассмотрены два направления повышения устойчивости железнодорожного пути. Первое направление связано с разработкой технологии улучшения свойств балластной призмы, которая обеспечивает вертикальную и горизонтальную устойчивость пути при воздействии динамических нагрузок от подвижного состава в кривых малого радиуса. Второе направление связано с возможностью модификации свойств балластной призмы, что можно использовать при формировании оптимальной упругости подшпального основания на переходных участках пути при подходах к искусственным сооружениям.

Увеличение скоростей движения подвижного состава предъявляет повышенные требования к прочностным характеристикам балластного материала и упругим характеристикам балластной призмы. Для обеспечения требуемых показателей применяют различные технические решения, одним из которых является полимерное закрепление или омоноличивание.

В настоящее время порядок омоноличивания щебеночного балласта регламентируется Стандартом ОАО «РЖД» – СТО ЖД 08.032-2019 «Насыпные элементы железнодорожного пути, омоноличенные полимерными составами».

Как показывает мировой опыт эксплуатации железных дорог, омоноличивание балластного слоя целесообразно по следующим причинам: снижается истираемость и разрушение частиц балласта, улучшается контакт между частицами балласта, и, как следствие, улучшаются механические свойства балластного слоя, стабилизируется его состояние под нагрузкой.

Кроме того, данное решение позволяет управлять жесткостью железнодорожного пути, что имеет большое значение в решении проблемы организации переходных участков на подходах к искусственным сооружениям.

Несмотря на очевидные достоинства, указанная технология имеет ряд недостатков, к которым следует отнести накопление остаточных деформаций в омоноличенном балласте (далее по тексту – геокompозите) под действием

длительных нагрузок и зависимость физико-механических свойств от перепадов температуры.

В связи с этим, повышение прочности омоноличенной конструкции балластной призмы за счет модификации физико-механических свойств полимерного связующего является актуальной прикладной научной задачей в области современного рельсового транспорта. В данной работе эта задача решается методом разработки добавок, в частности органомодифицированных частиц монтмориллонита, повышающих термостойкость и прочность полимеров при сохранении (или незначительном снижении) эластичности.

В связи с этим, **целью** данной диссертационной работы является разработка методов и технологии 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 выполняется **решением следующих научных задач:**

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

Благодарность. Работа выполнена при поддержке Соглашения о предоставлении субсидии от 27 ноября 2014 г. № 14. 607.21.0110 по теме: «Разработка технологии получения филлосиликатных 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».

Объекты и методы исследований. В качестве объектов исследования для оценки эффективности технологии увеличения поперечной устойчивости рельсошпальной решетки в кривых малого радиуса методом полимерного

закрепления плеча балластной призмы выбраны участки Северо-Кавказской и Забайкальской железных дорог. Подробная информация о натуральных объектах исследования приведена в приложении к диссертационной работе.

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

В лабораторных условиях исследованы возможности улучшения механических свойств геокомпозита при добавлении в полиуретан функциональных добавок на основе монтмориллонита.

Методами компьютерного моделирования исследованы свойства балластной призмы, плечо которой закреплено полимерным вяжущим материалом.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

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, 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 значения сил сопротивлений поперечному сдвигу шпалы, возникающих в конструкции балластной призмы с плечом, закрепленным на всю толщину балластного слоя;

- разработан 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 балластной призмы, использованы функциональные наноматериалы на основе органомодифицированного монтмориллонита.

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. Достижимая величина модуля упругости зависит от свойств балластного и вяжущего материалов, которая 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, а ее дальнейший рост приводит к проявлению пластических свойств закрепленного плеча балластной призмы.

Достоверность полученных результатов. Достоверность результатов лабораторных и натурных измерений базируется на использовании регулярно поверяемого оборудования лаборатории «Испытания и мониторинг в гражданском и транспортном строительстве» объединенного научно-исследовательского и испытательного центра научно-исследовательской части Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «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 натуральных измерений.

Достоверность выводов о модификации упругих свойств балластной призмы при полимерном закреплении на переходных участках подтверждается инструментальными 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 хорошо апробированной лицензированной компьютерной программы COMSOL Multiphysics, версии 4.2a, и сходимостью результатов расчета с результатами экспериментальных измерений.

Апробация результатов работы выполнена на международных и национальных конференциях, перечень которых приведен в разделе «Основные положения опубликованы в следующих работах».

Обоснование выбора научной специальности.

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 и областей исследований, относящихся к этой специальности.

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

Разработка технологии организации участков переменной жесткости на подходах к искусственным сооружениям омоноличиванием балластного слоя соответствует области исследований «Технология производства и организации работ. Мониторинг состояния пути. Аппаратура и системы контроля».

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

Создание компьютерной модели и выполнение компьютерного моделирования свойств элементов балластной призмы, омоноличенных современным полимерным вяжущим материалом, соответствует области исследований «Методы исследования и испытания и моделирования

железнодорожного пути и процессов его взаимодействия с подвижным составом».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и трех приложений.

Во введении обоснован выбор направления и объектов исследования, сформулированы научные задачи, решаемые в работе, научная новизна и практическая значимость исследования, а также достоверность полученных результатов. В заключение этого раздела сформулированы положения, выносимые на защиту и литературные источники, где они опубликованы, а также места апробации научных результатов.

Первая глава посвящена обоснованию актуальности выбора цели и задач исследований. В главе отмечается, что в последние годы продолжают выполняться исследования по выработке методов повышения поперечной устойчивости рельсошпальной решетки. Из анализа литературы следует, что значительные результаты в этой области исследований могут быть получены путем использования полимерных материалов. Одним из главных преимуществ указанной технологии является возможность закрепления балласта без ухудшения его дренирующих свойств.

Вторая глава посвящена описанию измерительных устройств, методов их тарировки, а также приспособлений, использованных при проведении натурных и лабораторных измерений, выполненных при решении поставленных в работе научных задач. Рассмотрены устройства и приборы для измерения механических свойств закрепленной балластной призмы; геофизическое оборудование для измерения физических и размерных свойств балластной призмы в натурных условиях; оборудование и оснастка для изготовления экспериментальных образцов геокомпозита и измерения их механических свойств в лабораторных условиях.

Третья глава посвящена разработке технологии полимерного закрепления плеча балластной призмы в кривых малого радиуса для повышения поперечной устойчивости рельсошпальной решетки.

В разделах 3.1-3.2 изложены требования к используемому балласту и полимеру; приведены основные особенности технологии закрепления балласта в условиях меняющихся температур окружающей среды (рисунок 1), показана корреляция модуля упругости сформированного геокомпозита и его толщины (рисунок 2).

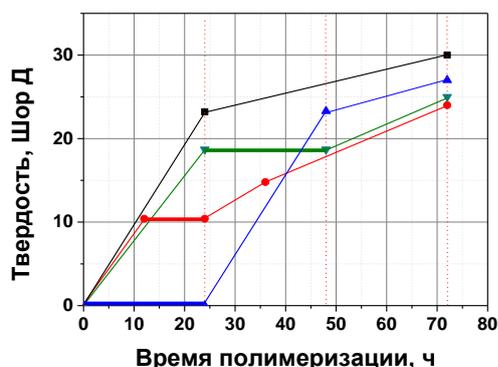


Рисунок 1 – Зависимость твердости полимера от времени и температуры окружающей среды. Горизонтальные участки графиков соответствуют температуре -20°C

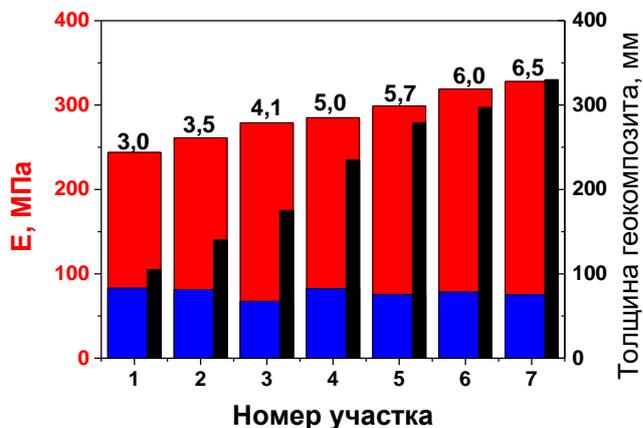


Рисунок 2 – Модуль упругости балласта до (■) и после (■) закрепления вяжущим материалом, толщина геокompозита (■) при указанном в кг на п.м. пути расходе вяжущего материала

Изучена зависимость модуля упругости от расхода вяжущего материала марки РТ-КС-001 (рисунок 2). Соответствующие измерения выполнены с использованием измерителя модуля упругости грунтов и оснований дорог ПДУ-МГ4, применение которого регламентируется национальными и международными стандартами (например, International Standard ASTM E2835-11). Проведенные исследования показали, что при образовании геокompозита на всю толщину балластной призмы модуль упругости конструкции возрастает примерно в 4 раза со значения 77 МПа до значения 320 МПа.

Исследована возможность контроля толщины образующегося геокompозита на протяженных участках методом георадиолокации (рисунок 3). Эта задача решена за счет анализа изменения положения на радарограмме контрастной границы балластной призмы и подбалластного основания.

Проведены измерения сопротивлений сдвигу плеча балластной призмы прибором ИСС-1 (глава 2). Относительная погрешность измерений составила величину 10 %. Анализ полученных данных 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 пути – несколько раньше, чем достигается укрепление балластного слоя на всю толщину. При этом, боковое сопротивление торца шпалы возрастает в 15 раз по сравнению со случаем незакрепленного плеча балластной призмы, а изменение бокового сопротивления коррелирует с изменением толщины геокompозита, формирующегося при полимеризации вяжущего материала.

Для выяснения влияния закрепления плеча балластной призмы вяжущим материалом на общее сопротивление сдвигу железобетонная шпала освободилась от скрепления с рельсами. Измерения выполнялись прибором ИСС-2 (глава 2). Измерения силы выполнялось при сдвиге шпалы до 22-25 мм. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Величины сдвига шпалы при приложении силы

	Особенности плеча балластной призмы	Величина сдвига, мм	Величина силы, кН
А	Балласт закреплен (толщина геокompозита составила 0,35 м)	23	40,2
В	Балласт не закреплен	22	15,0
С	Балласт закреплен и отсутствует плечо балластной призмы	22	13,5

Разность сил, приведенных в строках «b» и «с», 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. Сравнение сил, приведенных в строках «a» и «b», позволяет отметить, что формирование геокompозита с использованием полимерного вяжущего РТ-КС-001 приводит к росту силы сопротивления сдвигу шпалы в 2,7 раза. Разность сил, приведенных в этих строках, позволяет оценить вклад в силу сопротивления продольному перемещению со стороны балки геокompозита толщиной 0,33 м значением 25,2 кН или 63 % от общей силы сопротивления при поперечном перемещении 22-23 мм. На рисунке 4 приведены силы сопротивления геокompозита толщиной 0,33 м (▼), 0,17 м (▽) и силы, возникающие в незакрепленном плече (Le Pen L., Powrie W. Contribution of Base, Crib, and Shoulder Ballast to the Lateral Sliding Resistance of Railway Track. A Geotechnical Perspective. – 2011. – № 225. – С. 113–129. – ▼). Видно, что величина поперечной силы сопротивления зависит от толщины геокompозита, поэтому для уменьшения продольных перемещений необходимо формировать геокompозит большей толщины.

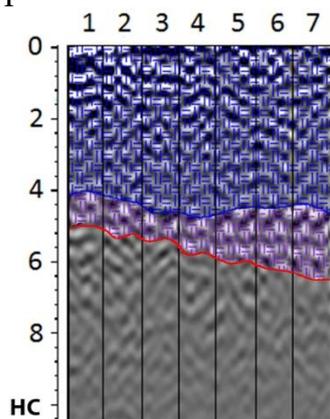


Рисунок 3 – Синяя и красная линии демонстрируют изменение положения границы балласта и подбалластного основания в зависимости от расхода вяжущего материала (рисунок 2)

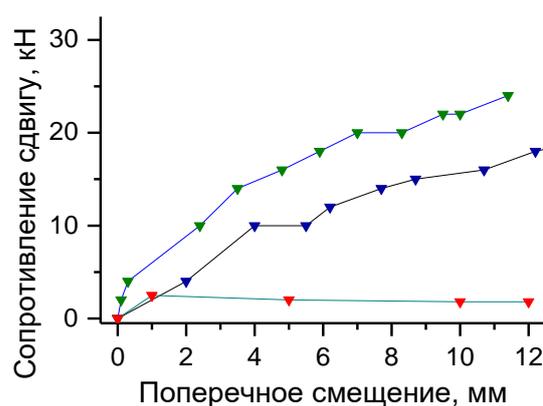


Рисунок 4 – Зависимость силы сопротивления геокompозита боковому смещению шпалы

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. Установлено, что проведение закрепления балласта не препятствует разрушению балластного слоя машинами тяжелого типа с последующей очисткой балластного материала и проведением выправочно-подбивочных работ (рисунок 5). Дополнительное воздействие разрушаемого геокомпозита на рабочие органы машин тяжелого типа в работе не рассматривались.

Четвертая глава посвящена разработке метода модификации упругих свойств балластной призмы при устройстве участков переменной жесткости. В **разделе 4.1 – 4.2** изложены результаты опытной проверки технического решения по устройству переходного участка железнодорожного пути на основе полимерного вяжущего материала на 1950 км ПК7 перегона Лоо – Дагомыс Северо-Кавказской железной дороги, примыкающего к трехпролетному железобетонному мосту длиной 44 м. Работы по омоноличиванию балластной призмы выполнены с северной и южной сторон моста в соответствии с инструкцией по применению двухкомпонентной полиуретановой системы РТ-КС-001. При выполнении работ указанные участки железнодорожного пути были разбиты на 24 фрагмента, работы на которых выполнены с различным расходом вяжущего материала (от 14,47 до 33,67 кг на погонный метр пути).

В **разделе 4.3** выполнен контроль сплошности и толщины омоноличивания балластного материала методом георадиолокации. В результате измерений получены радарограммы до и после выполнения работ. Предложено выражение для оценки относительного изменения показателя преломления частично омоноличенного балластного слоя толщиной l :

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{\bar{n}_g - n}{n} = \frac{c}{nl} (\Delta t_g - \Delta t), \quad (1)$$

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

На рисунке 6 приведено сравнение расхода вяжущего материала с относительным изменением показателя преломления балластного слоя. Таким образом, измеряя $\Delta t_g - \Delta t$ по данным георадиолокации можно рассчитать относительное изменение показателя преломления по формуле (1) и определить расход вяжущего материала, используя данные, приведенные на рисунке 6.



Рисунок 5 – Закрепленный балластный слой после работы машин тяжелого типа

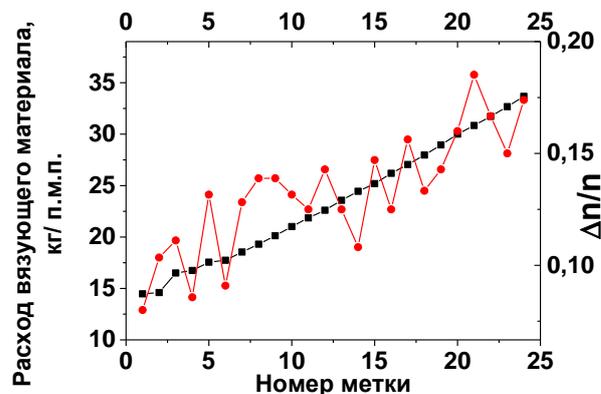


Рисунок 6 – Сравнение расхода вяжущего материала (—■—) и относительного изменения показателя преломления (—●—) балластного слоя при его частичном омоноличивании

В разделе 4.4 выполнено изучение механических свойств омоноличенного балластного материала. Измерения осуществлялись при помощи измерителя модуля упругости грунтов и оснований дорог ПДУ-МГ4. На участке исследования модуль упругости балластной призмы увеличился до 320 МПа при этом наблюдалась пропитка вяжущим материалом балластной призмы на всю ее глубину. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение двухкомпонентной полиуретановой системы РТ-КС-001 позволило прочно скрепить между собой вяжущим материалом частицы щебня, создав упругую единую систему, тем самым, существенно повысить модуль упругости балластной призмы. Наблюдаемое увеличение модуля упругости балластного слоя вблизи шкафных стенок моста должно учитываться при организации участков переменной жесткости с использованием технологии омоноличивания и требует увязки расхода вяжущего материала с начальными свойствами конструктивных слоев железнодорожного пути и искусственного сооружения.

В разделе 4.5 приведены результаты исследований динамического воздействия подвижного состава на железнодорожный путь виброрейсметическим методом. Датчик сейсмических колебаний располагался на обочине пути на специально подготовленной площадке, а также по оси пути и на шпале. Регистрировалась информация в диапазоне частот от 1 до 80 Гц. Анализ полученных данных позволяет отметить, что омоноличивание балластной призмы железнодорожного пути приводит к уменьшению средневзвешенной амплитуды виброрейсметических и подавлению низкочастотных колебаний.

Пятая глава посвящена разработке технологии повышения прочности двухкомпонентных вяжущих материалов на основе полиуретана.

В разделе 5.1 изложены технологический процесс и схема изготовления экспериментальных образцов балласта, закрепленного феллосиликатными полимерными материалами. Использована двухкомпонентная система, ранее упомянутая в главах 3-4. В качестве наполнителя при изготовлении геокомпозита использовался щебень (ГОСТ 7392-2002, ГОСТ 8267-93).

Улучшение механических свойств геокомпозита в данной работе выполнено применением функциональных наноматериалов на основе органомодифицированных наночастиц монтмориллонита. Выбор химического соединения для модификации наночастиц филлосиликатов и получения функционального наноматериала, обеспечивающего лучшую совместимость с полиуретановой полимерной матрицей разрабатываемых композитных материалов осуществлен по результатам экспериментальных исследований, поддержанных Соглашением о предоставлении субсидии от 27 ноября 2014 г. № 14.607.21.0110 по теме: «Разработка технологии получения филлосиликатных 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 разделе 5.2 рассмотрена аппаратура для исследовательских испытаний экспериментальных образцов геокомпозита с использованием модифицированного полиуретанового вяжущего материала для балластного слоя железнодорожного пути.

В разделе 5.3 приведены результаты сравнительных испытаний прочностных свойств экспериментальных образцов балласта, закрепленного не модифицированными и модифицированными полимерными материалами. Цель испытаний заключалась в определении прочностных свойств образцов геокомпозита при изгибе и разрыве, а также изучение влияния на эти свойства внешних факторов.

В результате анализа полученных данных отмечено следующее. Использование наполнителя на основе органомодифицированного монтмориллонита в полиуретановых вяжущих материалах способствует повышению устойчивости 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 во время 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, а для контрольных – 0,05 МПа. Влияние дистиллированной воды на прочностные свойства сформированного геокомпозита не обнаружено.

Использование наполнителя на основе органомодифицированного монтмориллонита в полиуретановых вяжущих материалах обеспечивает ~33 %-е увеличение прочности экспериментальных образцов геокомпозита при изгибе и ~22 %-е увеличение их адгезионной прочности.

Шестая глава посвящена компьютерному моделированию механических свойств балластной призмы, закрепленной используемым в работе вяжущим материалом.

В разделе 6.1 для моделирования плеча балластной призмы и расчета его свойств использован лицензированный программный продукт COMSOL Multiphysics версии 4.2a (лицензия № 17073466). Графическими методами программного продукта построена трехмерная модель фрагмента балластной призмы (рисунок 7), включающая плечо балластной призмы (позиция «а»), закрепленное полимерным вяжущим материалом, балластный откос (позиция «б»), частично закрепленный полимерным вяжущим и балластное основание (позиция «в»). Длина модели выбрана равной 24 метрам.

Боковые грани (сечения А и D) и основание балластной призмы (Е) при расчетах считаются неподвижными, а горизонтальная сила со стороны шпалы приложена в сечении С. Для описания свойств компьютерной модели (позиции «а», «б», «в») заданы геометрические размеры элементов конструкции, значения плотности, модуля упругости и коэффициента Пуассона балластного материала и геокompозита.

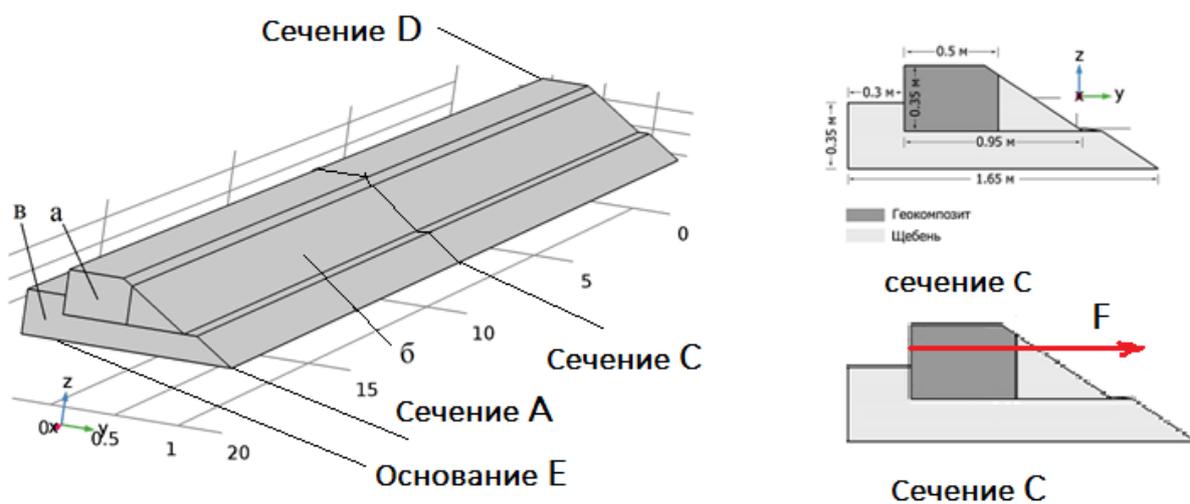


Рисунок 7 – Компьютерная модель фрагмента балластной призмы

Расчеты выполнены с использованием модуля Multibody Dynamics («Динамика многотельных систем»), позволяющего моделировать взаимодействие нескольких тел, в том числе с учетом трения. Для его описания выбрано приближение статического трения Кулона с коэффициентом трения, равным 0,9.

В разделе выполнена верификация компьютерной модели. Для этого рассчитана сила, вызывающая смещение плеча балластной призмы на 10 мм. Результаты расчета сопоставлены с результатами измерений, что позволило оценить погрешность численной процедуры величиной 8 %.

В разделе 6.2 исследовано влияние длины модели и величины модуля упругости геокompозита на поперечное смещение центральной шпалы, к которой приложена поперечная сила в $F = 20$ кН. Получено, что при допустимых затратах компьютерного времени имеющих компьютерных систем дальнейшие исследования целесообразно получать для балки длиной 24 м и модуля упругости

$E = 360$ МПа. Эти значения параметров позволяют получить значения деформации, близкие к экспериментальным данным.

В разделе 6.3 приведены результаты исследования работы плеча балластной призмы, включающего в качестве элемента геокомпозит. Рассчитаны деформации плеча под действием внешних поперечных сил, приложенных в центре модели в нормальном направлении в горизонтальной плоскости. В результате установлена область изменения внешних сил, в которой с точностью до погрешностей измерений обосновано применение линейно-упругой модели.

В **Заключении** сформулированы основные выводы, полученные в работе, а также намечены возможные направления дальнейших исследований. Основные выводы приведены ниже:

- изменение расхода вяжущего материала при закреплении плеча балластной призмы на всю ее глубину позволяет увеличивать модуль упругости более, чем 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;

- метод георадиолокации может быть использован для контроля глубины омоноличивания балластной призмы на протяженных участках железнодорожного пути;

- 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;

- использование добавки на основе органомодифицированного монтмориллонита в полимерных вяжущих обеспечивает повышение стойкости экспериментальных образцов геокомпозита к внешним воздействиям, а также ~33% увеличение прочности при изгибе и ~22% увеличение адгезионной прочности экспериментальных образцов;

- 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.

Приложения содержат справку о протяженности железнодорожных путей при проведении натурных испытаний, акты комиссионных осмотров экспериментальных участков, распоряжение Центральной дирекции инфраструктуры о подконтрольной эксплуатации кривых участков пути с закреплением плеча балластной призмы.

Основное содержание диссертационного исследования отражено в следующих публикациях:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

Статьи:

1. 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 РГУПС. Железнодорожный путь и транспортное строительство. – 2016. – № 4. – С. 106–113.

2. 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.

3. Повышение устойчивости пути омоноличиванием балласта / А.А. Кругликов, А.А. Васильченко, **Я.М. Ермолов**, В.А. Явна // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 11. – С. 12–15.

Публикации в базе данных Scopus:

Тезисы:

1. Применение метода конечных элементов при устройстве удерживающих конструкций на оползнеопасных склонах [Электронный ресурс] / А.А. Кругликов, Г.И. Лазоренко, **Я.М. Ермолов**, В.А. Явна // «Инженерная геофизика – 2015», 20–24 апреля. – Геленджик, 2015. – Режим доступа: www.earthdoc.org/publication/search?pubsearchkey=%D0%9A%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2+%D0%90.%D0%90.

2. Исследование балластного слоя железных дорог при организации участка пути переменной жесткости с использованием вяжущих материалов [Электронный ресурс] / А.А. Кругликов, **Я.М. Ермолов**, В.Л. Шаповалов, В.А. Явна // «Инженерная геофизика – 2016», 25–29 апреля. – Анапа, 2016. – Режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/search?pubsearchkey=%D0%9A%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2+%D0%90.%D0%90>.

3. Георадиолокационный контроль процесса укрепления балластной призмы железнодорожного пути полимерными связующими материалами [Электронный ресурс] / В.А. Явна, А.А. Кругликов, **Я.М. Ермолов**, В.Л.

Шаповалов // «Инженерная геофизика – 2017», г. Кисловодск, 24–28 апреля. – Кисловодск, 2017. – Режим доступа: www.earthdoc.org/publication/search?Pubsearchkey=%D0%9A%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%BB%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2+%D0%90.%D0%90.

4. Методы оценки геометрических и деформационных характеристик геокompозита / А.А.Кругликов, А.А. Васильченко, **Я.М. Ермолов**, М.В. Окост, В.А. Явна // Научно-практическая конференция «Инженерная и рудная геофизика – 2019», 22–26 апреля 2019 г. Геленджик, Россия.

Статьи:

1. Strengthening of the railway ballast section shoulder with two-component polymeric binders / А.А. Kruglikov, V.A. Yavna, **Y.M. Ermolov**, A.G. Kochur, Z.B. Khakiev // Transportation Geotechnics. – 2017. – Vol. 11. – P. 133–143.

Публикации в базе данных РИНЦ:

Статьи:

1. 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.

2. 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.

Публикации на международных конференциях:

Тезисы:

1. 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.

Публикации на отечественных конференциях:

Тезисы:

1. Усиление балластной призмы железнодорожного пути двухкомпонентными полимерными связующими / А.А. Кругликов, **Я.М. Ермолов**, В.А. Явна, З.В. Холодный // Труды XII Международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», 01–02 апреля. – М., 2015. – С. 185–189.

2. 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», 31 марта – 01 апреля. – М., 2016. – С. 94–98.

3. 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 Международной научно-практической конференции «Транспорт-2015», 21–24 апреля. – Ростов н/Д: Рост. гос. ун-т путей сообщения, 2015. – С. 52–54.

4. 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 // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». – Ростов н/Д: Рост. гос. ун-т. путей сообщения, 2016. – Т. 4. – С. 78–82.

5. Укрепление откосов земляного полотна полимерными связующими материалами / А.А. Кругликов, **Я.М. Ермолов**, М.В. Окост, И.А. Нахимович, В.А. Явна // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». Т. 2. Технические науки. – Ростов н/Д : Рост. гос. ун-т. путей сообщения, 2017. – С. 278–281.

Патенты:

1. Полимерная балластная конструкция высокоскоростных участков железнодорожного пути в зоне примыкания к искусственным сооружениям. Дата регистрации: 27.12.2016; Опубликовано: 28.05.2018. 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). Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС) (RU).

2. Способ повышения поперечной устойчивости железнодорожного пути на балластном основании. Дата регистрации: 10.08.2018; Опубликовано: 30.09.2019. 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). Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС) (RU).

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве. Автор совместно с научным руководителем сформулировал цель и задачи исследования, а также подготовил план, программу и методики выполнения работ. Личный вклад автора состоит в разработке экспериментальных и теоретических методов решения поставленных задач, а также в обработке и анализе полученной информации.

В опубликованных работах автор совместно с соавторами принимал участие в проведении экспериментальных исследований и выполнении теоретических расчетов с последующей интерпретацией полученных данных.

Автор совместно с научным руководителем провел обобщение результатов, полученных в ходе диссертационного исследования, а также сформулировал положения, выносимые на защиту.

Ермолов Яков Михайлович

**МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ БАЛЛАСТНОЙ
ПРИЗМЫ ПОЛИМЕРНЫМИ ВЯЖУЩИМИ
МАТЕРИАЛАМИ**

Подписано в печать 26.10.2020. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,10.
Тираж 100 экз. Заказ № 10799.

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2.