



Дорошенко Кирилл Андреевич

**РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К ЗАЩИТНОМУ СЛОЮ ОСНОВНОЙ
ПЛОЩАДКИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ИЗ ДРЕНИРУЮЩИХ
ГРУНТОВ, ОБРАБОТАННЫХ ВЯЖУЩИМ**

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ).

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент
Ашпиз Евгений Самуилович.

Официальные оппоненты:

Колос Алексей Федорович,
доктор технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Петербургский
государственный университет путей
сообщения Императора Александра I»,
кафедра «Строительство дорог
транспортного комплекса», заведующий
кафедрой;

Ломов Петр Олегович,
кандидат технических наук,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский государственный
университет путей сообщения», кафедра
«Здания, строительные конструкции и
материалы», доцент.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ростовский государственный
университет путей сообщения».

Защита состоится «18» сентября 2025 года в 12:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.03 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 (ул. Часовая д. 22/2, стр. 1, ауд. 329).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.rut-miit.ru.

Автореферат разослан «___» июля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Гринь Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В связи с задачами транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года по увеличению объема и скорости доставки грузов предусматривается внедрение поездов с повышенными осевыми нагрузками до 27 тс. Развитие тяжеловесного движения в части повышения осевых нагрузок является основным направлением повышения провозной и пропускной способности железнодорожных линий за счет повышения производительности грузовых вагонов, а также отсутствия необходимости в переустройстве приемоотправочных путей под поезда повышенной длины.

По этим причинам необходимо обеспечить стабильность положения рельсовой колеи, которая напрямую зависит от состояния земляного полотна. Учитывая, что, в большинстве своем, земляное полотно было возведено более 100 лет назад и рассчитано под существующие на тот момент поездные нагрузки, рост которых в связи с исчерпанием несущей способности грунтов вызывает в последние годы по данным Управления пути Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» увеличение количества дефектов и деформаций земляного полотна, приводя к серьезным потерям. Для преодоления данной негативной тенденции необходимо назначать усиление земляного полотна, и особенно важно обеспечить стабильность основной площадки на линиях скоростного пассажирского движения и на участках обращения тяжеловесных поездов.

Выделяется три основных вида влияния повышения осевых нагрузок на земляное полотно:

- увеличение нагрузки на грунты рабочей зоны земляного полотна (как правило, на глубине до трех метров);
- устойчивость откосных частей земляного полотна;
- снижение несущей способности слабых оснований насыпей.

При оценке результатов испытаний на участке Октябрьской железной дороги «Ковдор–Мурманск» было выявлено, что при осевой нагрузке 27 тс средние

напряжения на основной площадке увеличиваются на 42 % относительно вагонов с осевой нагрузкой 23,5 тс, при этом 94,6 % от всех осей дают превышение допускаемого напряжения на основной площадке $[\sigma_{\text{доп}}] = 80$ кПа. Также стоит отметить, что при доле вагонов с осевой нагрузкой 27 тс до 10 % от общего грузооборота на участке, суммарное протяжение участков с нестабильной геометрией возросло на 13 %, а трудозатраты на текущее содержание пути – на 23 %. Аналогичные данные были получены в результате анализа эксплуатационных испытаний на участке «Качканар–Смычка» – трудозатраты при эксплуатации поездов с осевыми нагрузками 27 тс возрастают на 18 %.

По статистике за 2024 г., на сети железных дорог имеется 2309,11 дефектных километров насыпей. При этом, порядка 15 % от всех дефектов и деформаций занимают балластные углубления. Данный факт свидетельствует о недостаточной прочности грунтов основной площадки земляного полотна и необходимости принятия мер по повышению их несущей способности.

При этом, согласно концепции перспективных направлений развития хозяйства пути и сооружений, на участках особогруженапряженных линий планируется усилить до 6,4 тыс. км рабочей зоны земляного полотна из общей их протяженности в 16 тыс. км. Как показано в работе основным способом для ее усиления является устройство подбалластных защитных слоев (далее ПЗС) из щебеночно-песчано-гравийных смесей, регламентируемое на железных дорогах ОАО «РЖД» Инструкцией № 2544р от 12.12.2012 (Далее – Инструкция). Данный способ усиления основной площадки земляного полотна железнодорожного пути подтвердил свою техническую эффективность как в нашей стране, так и за рубежом, но его широкое внедрение сдерживается низкой производительностью при производстве работ по капитальному ремонту пути, дороговизной материала ПЗС и необходимостью его доставки в больших объемах на большие расстояния. С другой стороны на многих участках железнодорожного пути под балластной призмой стандартных размеров накопилась после предыдущих ремонтов большая толща старого загрязненного балласта, который в традиционной технологии принято вырезать и заменять на материал ПЗС, поэтому перспективным

представляется использовать его для создания такого слоя, но по своим деформационным свойствам без их улучшения этот материал в прямую не подходит. Добиться необходимого повышения характеристик ПЗС, создаваемого из старого балласта, можно попытаться, используя опыт закрепления грунтов вяжущими материалами, применяемый на автомобильных дорогах, что определяет направленность данной работы.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами усиления рабочей зоны земляного полотна железных дорог занимались такие отечественные ученые как Е.С. Ашпиз, Л.С. Блажко, В.В. Виноградов, П.И. Дыдышко, П.В. Иванов, М.С. Каримов, А.В. Козлов, А.Ф. Колос, Г.Г. Коншин, А.Л. Ланис, Л.С. Лapidус, М.В. Окост, И.В. Прокудин, Г.М. Шахунянц, а за рубежом необходимо отметить труды E.T. Selig, D. Li, C. Esveld, L. Yang.

Вопросами закрепления грунтов вяжущими материалами занимались в основном ученые для автомобильных дорог В.М. Безрук, А.К. Бируля, И.М. Грушко, И.Л. Гурячков, В.А. Кейльман, Ф.С. Климашов, А.П. Кузнецов, Т.М. Луканина, В.М. Могилевич, П.А. Ребиндер, А.О. Салль, А.К. Славущий, Р.П. Щербакова, A. Nabiba, K. Raja, H. Solihu.

Объект исследования – ПЗС из старогодных балластных материалов, обработанных вяжущими материалами.

Предмет исследования – свойства, технология устройства и технико-экономическая эффективность ПЗС из старогодных балластных материалов с применением вяжущих.

Цель диссертационной работы состоит в оценке возможности и технико-экономической эффективности технологии закрепления старогодных балластных материалов для их применения в качестве материала подбалластного защитного слоя и обоснованию требований к его конструкции.

Для выполнения поставленной цели исследования должны быть выполнены следующие задачи:

- оценить свойства старогодного балласта без закрепления;

- провести подбор вяжущих и полимерных добавок для материала ПЗС из старогородных балластных материалов;
- провести стендовые лабораторные испытания модели ПЗС для подтверждения обеспечения требуемого модуля деформации;
- разработать технологию создания ПЗС из старогородных балластных материалов с обработкой вяжущими и провести укладку ПЗС по предлагаемой технологии с испытаниями получаемых деформативных характеристик слоя;
- разработать требования на ПЗС из старогородных балластных материалов с применением вяжущих;
- оценить экономическую эффективность предлагаемой технологии на основании стоимости труда рабочих, машин и материалов для производства работ.

Научная новизна:

1. Разработан состав добавок портландцемента и полимерного стабилизатора на основе полученных прочностных и деформационных характеристик материала ПЗС.
2. Разработана и апробирована технология устройства подбалластного защитного слоя из закрепленных старогородных балластных материалов.
3. Предложена методика расчета модуля деформации по верху ПЗС и на его основе даны рекомендации по выбору толщины ПЗС из закрепленных старогородных балластных материалов
4. Доказана техническая и экономическая эффективность применения закрепленных вяжущими старогородных материалов в качестве материала ПЗС в сравнении с существующими технологиями.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты лабораторных исследований показали возможность применения накопленной толщи балласта в качестве материала для ПЗС при условии ее усиления вяжущими материалами.

Внедрение технологии устройства ПЗС из старогородных балластных материалов позволит сократить затраты на закупку и доставку кондиционных материалов на место производства работ, а также исключить необходимость вырезки и вывоза старогородных материалов с места производства работ.

Приведенные рекомендуемые толщины ПЗС по условию деформативности позволят назначать его толщину по результатам лабораторных испытаний материала ПЗС и предварительных изысканий без проведения дополнительных расчетов.

Расчеты напряжений в элементах верхнего строения пути при устройстве ПЗС с повышенным модулем деформации позволяют эффективнее назначать конструкции верхнего строения пути для обеспечения оптимального модуля упругости железнодорожного пути.

Полученные результаты по оценке времени и трудозатрат на выполнение операций может быть использовано для формирования технологических карт и внесения в нормы на выполнение работ при капитальных ремонтах железнодорожного пути.

Методология и методы исследования. Решение приведенных задач производилось с применением общесистемного метода исследования, основанного на анализе выполненных научно-исследовательских работ по теме диссертационного исследования в РФ и за рубежом, проведения лабораторных и натурных экспериментов, а также численного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа применения закрепленных грунтов на автомобильных и железных дорогах;
2. Результаты экспериментального исследования по определению прочностных и деформативных характеристик грунта ПЗС из старогодных балластных материалов.
3. Результаты укладки и полигонных испытаний на ЭК ВНИИЖТа и Красноярской ж.д. конструкции ПЗС из старогодных балластных материалов.
4. Методика определения приведенного модуля деформации по верху ПЗС.
5. Рекомендуемые толщины ПЗС по условию деформативности для закрепленных грунтов.

6. Технология проведения капитального ремонта железнодорожного пути с устройством подбалластного защитного слоя из закрепленных старогодных балластных материалов.

7. Экономическая эффективность применения закрепленных старогодных балластных материалов в качестве подбалластного защитного слоя.

Достоверность результатов исследования подтверждается применением сертифицированного оборудования с поверенными средствами измерения, включающие в себя аттестованные универсальные гидравлические машины, обеспечивающие требуемую точность результатов определения прочностных и деформативных свойств исследуемых материалов, сходимости полученных результатов с результатами исследований по тематике диссертационного исследования, а также, использованием сертифицированного программного обеспечения «Plaxis 2D».

Апробация и реализация результатов исследования. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на **следующих конференциях:**

- XIX Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» памяти профессора Георгия Михайловича Шахунянца (Москва, РУТ (МИИТ), 2022 г.);

- 6-й Международный Симпозиум по строительному инжинирингу грунтовых сооружений на транспорте в холодных регионах Transoilcold 2023 (Москва, РУТ (МИИТ), 2023 г.);

- XXI Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» памяти профессора Георгия Михайловича Шахунянца (Москва, РУТ (МИИТ), 2024 г.).

- «Неделя науки 2025» в рамках секции «Транспортное строительство» на кафедре «Путь и путевое хозяйство».

Структура и объем диссертации. Диссертация включает в себя введение, шесть разделов, заключение, список литературы и два приложения. Работа изложена на 202 страницах машинописного текста, в том числе 43 таблицы, 68 рисунков. Список литературы насчитывает 158 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной работы, проанализирована степень разработанности темы, определены цель и предмет исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту.

В разделе 1 приведен анализ существующих методов усиления основной площадки земляного полотна (Далее – ОПЗП), который включает в себя ПЗС из щебеночно-песчано-гравийных смесей (далее – ЩПГС). Данная технология имеет ряд недостатков, таких как необходимость вырезки некондиционного грунта ОПЗП, высокая стоимость эксплуатации машин, составов для материала ЩПГС и вывоза вырезанного грунта. Для сокращения объемов вырезки грунта за счет снижения требуемой толщины ПЗС для обеспечения необходимого модуля деформации по верху ОПЗП применяют геосинтетические материалы, а именно плоские и объемные георешетки. При этом толщина ПЗС с армированием георешетками снижается в 1,6–2 раза. Однако, применение геосинтетических материалов полностью не решает выявленных проблем, связанных с необходимостью вырезки и вывоза некондиционных грунтов ОПЗП, хоть и значительно сокращает их объем.

Альтернативным вариантом является применение местных материалов в качестве ПЗС, которыми могут выступать старогодные балластные материалы, накопленные на пути в процессе эксплуатации. Данная технология позволит решить проблемы с транспортировкой кондиционных материалов, однако, по проведенным испытаниям, модуль деформации такого материала составляет около 65 МПа, соответственно, добиться значений выше приведенного не представляется возможным, что ограничивает применение данной технологии.

Для минимизации приведенных недостатков предлагается рассмотреть технологию закрепления накопленной толщи старогодного балласта вяжущими материалами, тем самым повысить физико-механические характеристики получаемого материала, сократить время и стоимость проведения работ за счет исключения операции вывоза некондиционных материалов, а также сократить толщину самого ПЗС.

Технология закрепления грунтов широко используется при реконструкциях и капитальных ремонтах автомобильных дорог начиная с 1920-х годов по настоящее время.

Для закрепления накопленной толщи старогодных балластных материалов наиболее перспективными по условиям создания прочного и долговечного слоя, является применение портландцементов.

На данный момент основными параметрами для проектирования ПЗС являются его оптимальная влажность, плотность, прочность при сжатии и изгибе/расколе и модуль упругости получаемого материала.

Для сокращения объемов используемого вяжущего материала, повышения морозостойкости, водонепроницаемости, повышения прочностных и деформационных характеристик применяют добавки к портландцементу. На данный момент распространилось применение добавок, включающих в свой состав суперпластификаторы, гидрофобизаторы, сложноэфирные группы и ионогенные комплексы, чья задача состоит в придании закрепляемому грунту повышенной прочности, водостойкости и водонепроницаемости, морозостойкости и трещиностойкости.

С учетом того, что материал старогодного балласта не обеспечивает требуемых характеристик по модулю деформации для особогрузонапряженных, скоростных и высокоскоростных линий, перспективным является исследование по возможности закрепления данного материала вяжущими и полимерными добавками для обеспечения им требуемых характеристик, а также оценка эффективности данного решения.

В разделе 2 приведены результаты лабораторных испытаний материала накопленной толщи балластных материалов с целью проверки возможности применения его в конструкции ПЗС на особогрузонапряженных линиях для обеспечения модуля деформации по верху не менее 80 МПа. В качестве материала старогоднего балласта была взята смесь с опытного полигона ООО «КБ «Тулажелдормаш», приготовленная из продуктов от вырезки старого балласта щебнеочистительными комплексами. При рассмотрении результатов по определению гранулометрического состава смеси был выявлен недостаток фракций с размером частиц от 5 до 20 мм, а также присутствие фракций крупнее 30 мм, которые могут быть повторно использованы в материале балластной призмы. В связи с этим было принято решение отсечь фракции частиц крупнее 30 мм и провести испытания по подбору состава добавок портландцемента и полимерного стабилизатора на модифицированном гранулометрическом составе. По анализу нормативных документов и научных трудов были определены критерии к закрепленному материалу ПЗС, а именно прочность на сжатие не менее 1,0 МПа и модуль деформации не менее 150 МПа. Гранулометрический состав, на котором проводились испытания представлен на рисунке 1.

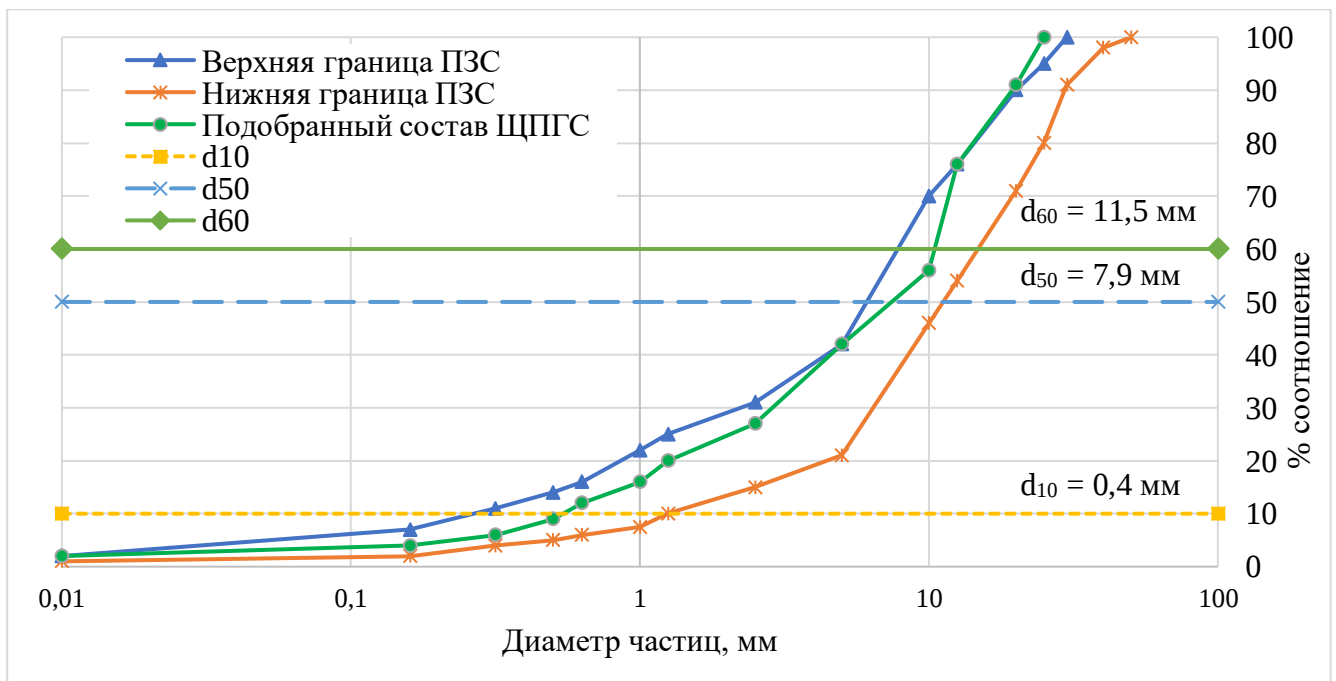


Рисунок 1 – Гранулометрический состав образца старогоднего балласта

В первую очередь необходимо было подтвердить гипотезу, что материал старогоднего балласта в исходном (незакрепленном) состоянии не обеспечивает требуемого модуля деформации для его применения в конструкции ПЗС.

Для решения поставленной задачи была собрана модель ПЗС толщиной 30 см с модифицированным гранулометрическим составом исходной смеси на жестком основании, что позволило оценить модуль деформации самого материала старогоднего балласта.

На модели ПЗС были проведены штамповые испытания, по результатам которых модуль деформации материала составил 76,24 МПа, что не удовлетворяет принятому критерию.

Для повышения прочностных и деформационных свойств были изготовлены элементарные цилиндрические образцы с добавлением 2, 3, 4 % портландцемента от массы грунта, которые были испытаны на прочность при сжатии в сухом и водонасыщенном состоянии в возрасте 7 суток. Результаты испытаний представлены на рисунке 2.

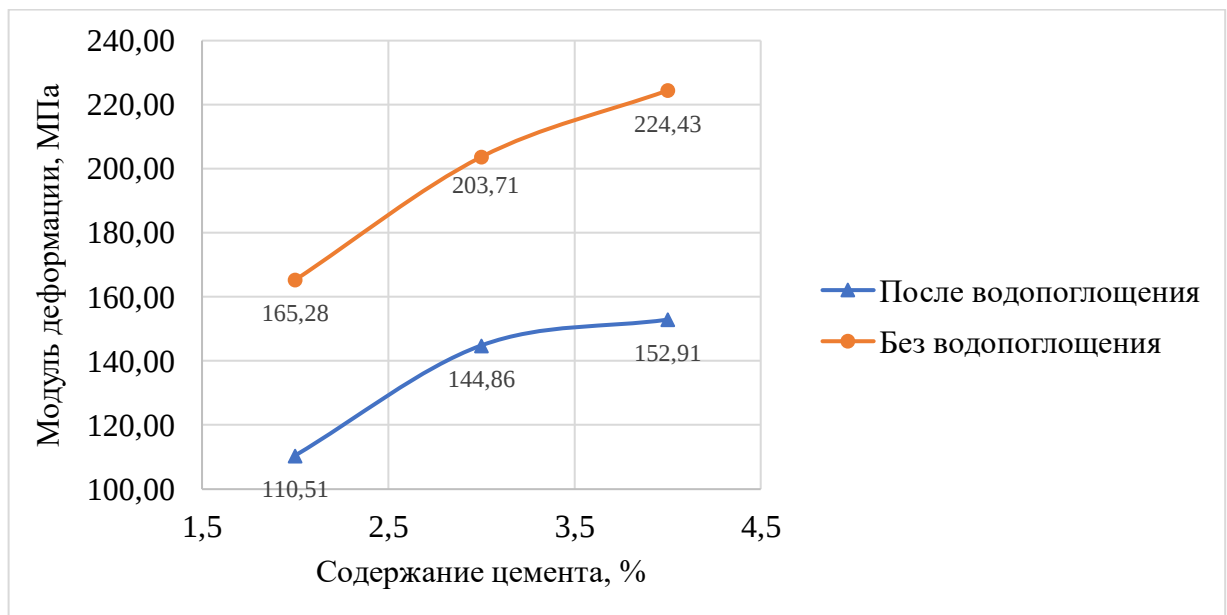


Рисунок 2 – Результаты испытаний по подбору содержания портландцемента

Для дальнейшей работы была принят состав с 3 % портландцемента от массы грунта, так как в образце с 2 % цемента состав по модулю деформации в водонасыщенном состоянии не удовлетворяет требованиям к ПЗС, а увеличение содержания цемента с 3 до 4 % изменяет модуль деформации всего в 1,06 раз, что

экономически нецелесообразно. При этом, состав с 3 % цемента в водонасыщенном состоянии также показал результаты на 3,5 % ниже требуемого значения 150 МПа, однако, была выдвинута гипотеза, что применение полимерного стабилизатора должно привести модуль деформации смеси к нормативному. При этом стоит отметить, что увеличения прочностных и деформационных свойств можно добиться за счет увеличения процентного содержания цемента, но данное решение повышает риск образования усадочных трещин и способствует увеличению хрупкости материала.

После подбора состава портландцемента проводились испытания на прочность при сжатии и растяжении при расколе с добавлением 5 (минимально рекомендуемое производителем), 7, 10 % полимерного стабилизатора от массы портландцемента. Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость прочности от процентного содержания полимерного стабилизатора

Процентное содержание ПМК, %	Прочность на сжатие/Модуль деформации, МПа при времени набора прочности, суток			Прочность на растяжение при расколе, МПа, при времени набора прочности 7 суток
	7	14	28	
0	7,56/201,4	8,53/204,9	8,55/221,8	0,26
5	7,86/208,4	8,37/245,2	9,51/249,2	0,40
7	8,03/207,3	8,63/257,2	10,09/258,5	0,41
10	8,08/244,5	8,66/268,2	9,96/274,3	0,43

По анализу всех проведенных испытаний был выбран состав добавок, содержащий 3 % портландцемента от массы грунта и 5 % полимерного стабилизатора от массы цемента, исходя из того, что состав с 3 % портландцемента показал характеристики, близкие к требуемому значению в 150 МПа, а применение 5 % полимерного стабилизатора от массы цемента позволило довести свойства материала до требуемых значений, повысить трещиностойкость материала, однако дальнейшее увеличение его процентного содержания не оказало большого влияния на его свойства, следовательно, его повышение нецелесообразно.

Для оценки модуля деформации по верху ПЗС была собрана модель толщиной 25 см на типовом основании с модулем деформации 30 МПа. Была проведена серия штамповых испытаний на необработанном грунте, по результатам которых средний модуль деформации по верху модели составил 47,89 МПа, после чего материал ПЗС был обработан приведенным составом добавок. Для модели с закрепленным материалом были проведены испытания в возрасте 0, 3 и 7 суток, по результатам которых модуль деформации по верху ПЗС вырос с 51,84 МПа до 84,43 МПа, соответственно, требуемый модуль деформации был обеспечен при 7 сутках набора прочности.

По результатам проведенных испытаний было выявлено, что накопленную толщ старогоднего балласта возможно применять в качестве материала ПЗС при условии его закрепления вяжущими.

Раздел 3 посвящен апробации технологии холодного ресайклинга (перемешивания грунта с добавлением в него портландцемента и полимерных стабилизаторов) в условиях Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» на станции Щербинка.

На предварительном этапе были отобраны 3 участка, имеющие накопленную толщ балластных материалов от 0,5 до 1,0 м. Также, перед укладкой были проведены штамповые испытания на уровне 40 см ниже подошвы шпалы, результаты которых показали средний модуль деформации 107,88 МПа, при этом требуемый модуль деформации достигался на всех участках, кроме сечения ПК 15+50 на участке № 2, где модуль деформации составил 55,9 МПа.

На основе результатов лабораторных испытаний было принято решение уложить на опытных участках № 1 и № 3 защитный слой из накопленной толщи балластных материалов, усиленных вяжущими, с минимально возможной толщиной 0,2 м, а на участке № 2 толщиной 0,25 м.

Технологический процесс устройства ПЗС включал выполнение таких работ, как рассыпка ЩПС самосвалами, распределение вяжущих по основной площадке земляного полотна, уплотнение и планировка слоя ПЗС.

Перед началом укладки был определен гранулометрический состав балластных материалов, назначена его обогащение смесью ЦПС С7 в объеме 30 % от массы грунта. Гранулометрический состав предложенного материала ПЗС представлен на рисунке 3.

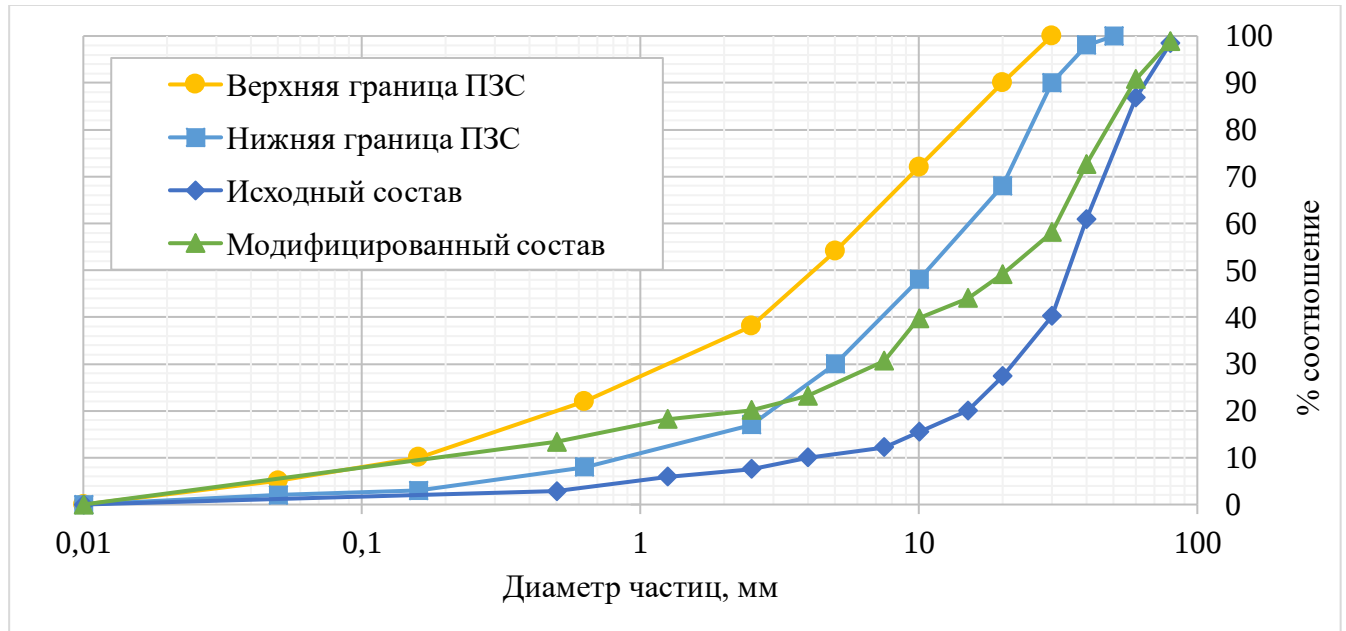


Рисунок 3 – Гранулометрический состав материала ПЗС

По результатам испытаний по подбору состава добавок, исходя из критерия прочности на сжатие не менее 6,0 МПа, был принят состав с 3 % портландцемента и 5 % полимерного стабилизатора от массы грунта, показавший значение прочности на сжатие 8,2 МПа.

Всего по данной технологии было устроено 740 м ПЗС, на которых были проведены динамические и статические испытания по определению модуля деформации. В качестве критерия уплотнения ПЗС были выбраны показатели динамического и статического модуля деформации, которые на момент укладки должны составлять не менее 75 % от нормативного. По результатам проведенных испытаний динамического модуля деформации по верху ПЗС среднее значение E_{vd} на первом участке составило 54 МПа, на втором 56 МПа, а на третьем – 45 МПа. Статические штамповые испытания проводились сразу после укладки, на 7 и 28 сутки после укладки. Результаты штамповых испытаний приведены на рисунке 4, согласно которым модуль деформации материала ПЗС к 28 суткам составил от 405 до 516 МПа.

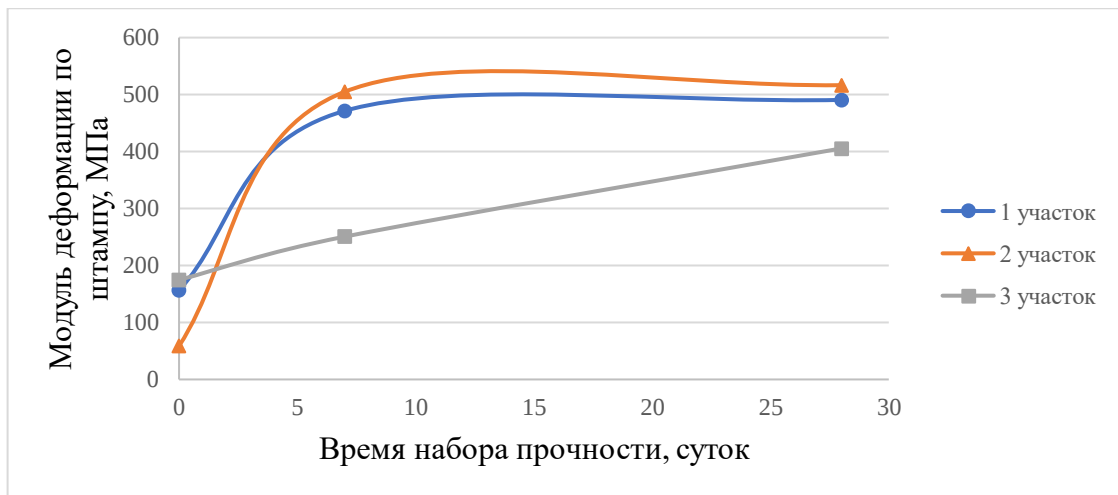


Рисунок 4 – График набора прочности ПЗС

Данные результаты оказались выше значений, полученных при лабораторных испытаниях (около 225 МПа), в связи с чем встал вопрос о корректности определения модуля деформации по испытаниям на одноосное сжатие. В качестве альтернативы для дальнейших работ было предложено использовать нормативные значения модуля деформации материала ПЗС в зависимости от его марки по прочности, представленные в ГОСТ 71404.

При устройстве ПЗС средняя погонная выработка составила 67 м/ч с основными потерями времени, связанными с загрузкой распределителей для портландцемента и полимерного стабилизатора. Для повышения производительности было предложено применение двух распределителей для портландцемента и отдельного распределителя для полимерного стабилизатора.

По опытным участкам с ПЗС на начало 2025 г. было пропущено 205 млн. т брутто. На начальном этапе эксплуатации были выявлены 4 перекоса 2-ой степени, связанные с периодом стабилизации балластной призмы. При наработке 80 млн. т брутто была проведена послеосадочная выправка, после которой отступлений в геометрии рельсовой колеи не было обнаружено, что говорит о стабильности участков с ПЗС.

В разделе 4 приведено устройство ПЗС и полигонные испытания на участке Заозерная–Камала Красноярской железной дороги с внедрением рекомендаций по повышению производительности.

На этапе предварительных изысканий были проведены штамповые испытания, по результатам которых средний модуль деформации грунта ниже ПЗС составил 73,8 МПа, что является недостаточным для особогрузонапряженной линии. Для старогоднего балласта, отобранного с указанного участка, был проведен подбор гранулометрического состава смеси и состава добавок для материала ПЗС.

Технологический процесс устройства ПЗС претерпел следующие изменения: рассыпка ЩПС велась из хоппер-дозаторных вагонов по торцам шпал вместо самосвалов, загрузка распределителей вяжущих проводилась из биг-бэгов с применением автокрана вместо цементовоза, также, исходя из рекомендаций по опыту укладки на ЭК, было принято 3 распределителя – 2 под портландцемент и 1 под полимерный стабилизатор. На последнем участке, в качестве эксперимента, уплотнение проводилось только гладковальцовыми катками. Остальные технологические операции остались без изменения.

В ходе проведения укладки были разработаны дополнительные рекомендации по повышению качества производства работ, связанные с необходимостью обеспечения оптимальной влажности материала ПЗС, а также рассыпки ЩПС не только по торцам шпал, но и внутрь рельсовой колеи для обеспечения ее равномерного распределения автогрейдерной техникой.

На первые и третьи сутки после укладки на участках были проведены штамповые испытания, по результатам которых модуль деформации на первые сутки составил от 75,9 до 99,5 МПа со средним значением в 88,7 МПа, к третьим суткам модуль деформации составил от 146,6 до 190,5 МПа со средним значением 166,3 МПа. Как видно из результатов испытаний, к 3 суткам после проведения укладки ПЗС нормативный модуль деформации не менее 80 МПа был обеспечен на всех участках.

Помимо этого, в процессе укладки были зафиксировано время на выполнение технологических операций, по результатам которых средний темп выполнения работ по устройству ПЗС составил 111 м/ч, что в 1,66 раз быстрее, чем значение,

полученное на ЭК, что говорит об эффективности предложенных рекомендаций по применению трех распределителей вяжущих.

Раздел 5 посвящен разработке рекомендаций по толщинам ПЗС из закрепленных материалов и оценке напряжений в элементах ВСП при применении ПЗС рассматриваемой конструкции.

Для расчета толщины ПЗС по условию обеспечения необходимого модуля деформации по верху ПЗС (приведенного модуля) была предложена формула

$$E_{v2пр} = \frac{\sum \alpha_i}{\sum \frac{\alpha_i}{E_i}} \quad (1)$$

где α_i — коэффициент, принимаемый по таблице 5.8 СП 22.13330 в зависимости от относительной глубины ξ ;

E_i — модуль деформации i -го слоя.

Для валидации формулы были проведены расчеты приведенного модуля деформации для сечения 4271км ПК1+50 II главного пути участка Заозерная – Камала Красноярской ж.д., показавшей наименьший модуль деформации по результатам испытаний равный 58,1 МПа. В качестве исходных данных для расчета были использованы геологический разрез и характеристики грунтов, полученные при инженерно-геологических изысканий. По результатам расчета модуль деформации по верху составил 58,6 МПа, что составляет с экспериментальными данными разницу в 1 %.

Расчет при условии устроенного ПЗС показал значение модуля деформации 113,9 МПа, что на 28,6 % ниже, чем экспериментально полученное значение 146,6 МПа, в связи с чем была выдвинута гипотеза о более быстром затуханий напряжений с глубиной при наличии ПЗС из закрепленного материала, что должно повысить получаемое расчетное значение модуля деформации.

Для подтверждения гипотезы была построена конечно-элементная модель в ПК «Plaxis 2D», где были промоделирована вторая ветвь штамповых испытаний с построением эпюр затухания напряжений для условий без ПЗС и с ПЗС в возрасте 3 суток и проектом, представленные на рисунке 5.

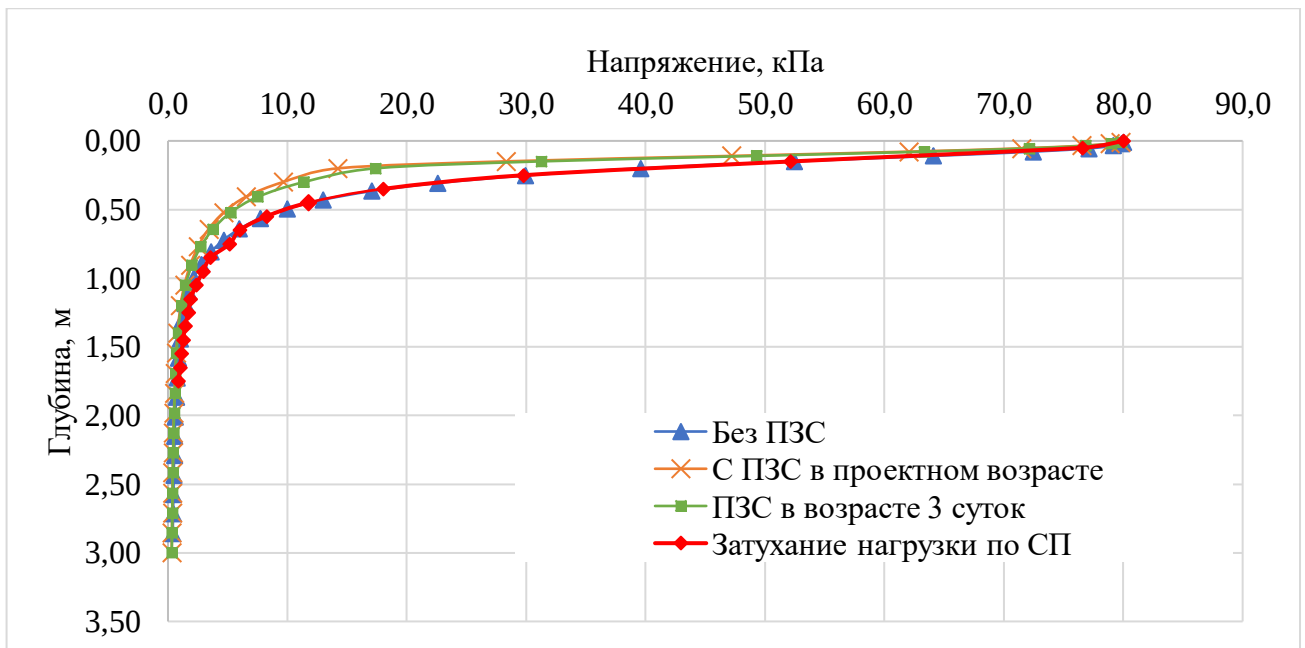


Рисунок 5 – Эпюры затухания напряжений при различных коэффициентах α_i

Анализ результатов расчета показывает, что значения коэффициента затухания напряжений, представленный в СП 22.13330 хорошо согласуется для типовой конструкции пути, однако, при применении ПЗС из закрепленных материалов видно более быстрое затухание напряжений на глубине до 1,0 м.

При полученных моделированием величинах коэффициентов затухания напряжений был проведен повторный расчет по формуле (1), по результатам которого модуль деформации по верху ПЗС на 3 суток составил 146,9 МПа, что расходится с экспериментальными данными на 0,23 %, что позволяет применить данную модель для расчета рекомендуемых толщин ПЗС.

Для определения коэффициентов затухания напряжений была проведена серия расчетов из 45 вариантов с варьированием модулей деформации нижележащего слоя грунта и материала ПЗС, а также его толщины.

В качестве критерия назначения рекомендуемой толщины ПЗС было выбрано ее наименьшее значение, обеспечивающее требуемое значение модуля деформации по верху ПЗС, что позволит сократить затраты на материалы, а также оптимизировать затраты времени на распределение вяжущих материалов и уплотнение слоя ПЗС. При этом, для обеспечения уплотнения ПЗС в один слой его максимальная толщина должна составлять не более 30 см. Рекомендуемые толщины ПЗС приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Рекомендуемые толщины ПЗС по условию деформативности для закрепленного грунта

Требуемый модуль деформации по верху ПЗС, МПа	Толщина ПЗС при модуле деформации ниже лежащих грунтов земляного полотна при марке материала по прочности не ниже М40, см				
	50 и выше	40	30	20	10
120		25		30	—*
80				25	30
60		20			
50		0			
* — не применимо в связи с необходимой толщиной ПЗС больше 30 см.					

Для оценки влияния ПЗС на напряжения в элементах верхнего строения пути (в первую очередь, в балластном слое) были проведены измерения вертикальных перемещений рельса на двух опытных участках пути на ЭК с ПЗС и наличием подшпальных прокладок, по результатам которых модуль упругости пути составил 81,0 и 94,9 МПа. Для участков ПЗС были вычтены перемещения подшпальных прокладок и повторно рассчитаны модули упругости пути, которые составили 122,1 и 152,3 МПа.

Для четырех полученных значений модуля упругости пути по методике расчета пути на прочность были рассчитаны напряжения, возникающие в балластном слое от вагонов с осевой нагрузкой 23,5 и 25 тс по результатам которых на участках без подшпальных прокладок напряжения в балласте выросли на величину от 9 до 13 % с максимальным значением в 0,26 МПа, что обеспечивает практически двухкратный запас по допускаемым напряжениям в балласте. Однако, стоит отметить, что применение подшпальных прокладок позволяет обеспечить расчетный оптимальный модуль упругости пути для особогрузонапряженных линий по условию минимальной стоимости жизненного цикла, равный 80 МПа, в связи с чем их применение рекомендуется при устройстве ПЗС из закрепленных материалов.

В разделе 6 приведена оценка технико-экономической эффективности устройства ПЗС по методу холодного ресайклинга. По результатам замеров

времени производства работ по устройству ПЗС на Красноярской железной дороге, а также с применением существующих норм на выполнение ремонтов верхнего строения пути был разработан технологический процесс капитального ремонта с устройством подбалластного защитного слоя методом холодного ресайклинга. Согласно расчетам трудозатраты по устройству ПЗС составили 19,91 чел-ч, что в 4 раза меньше, чем с применением щебнеочистительных машин РМ-80 и СЧУ-800 и в 58 раз меньше при машинном комплексе АХМ 800-Р. Выработка при устройстве ПЗС по методу холодного ресайклинга составила 111 м/ч, что в 1,2 раза выше технологии с применением машин РМ-80 и СЧУ-800 и в 2,7 раз машинного комплекса АХМ 800-Р.

По времени производства работ и анализу трудозатрат была рассчитана удельная стоимость работ на 1 км по устройству ПЗС для обеспечения модуля деформации не менее 80 МПа при модуле деформации нижележащих слоев грунта 30 МПа, представленная на рисунке 6.

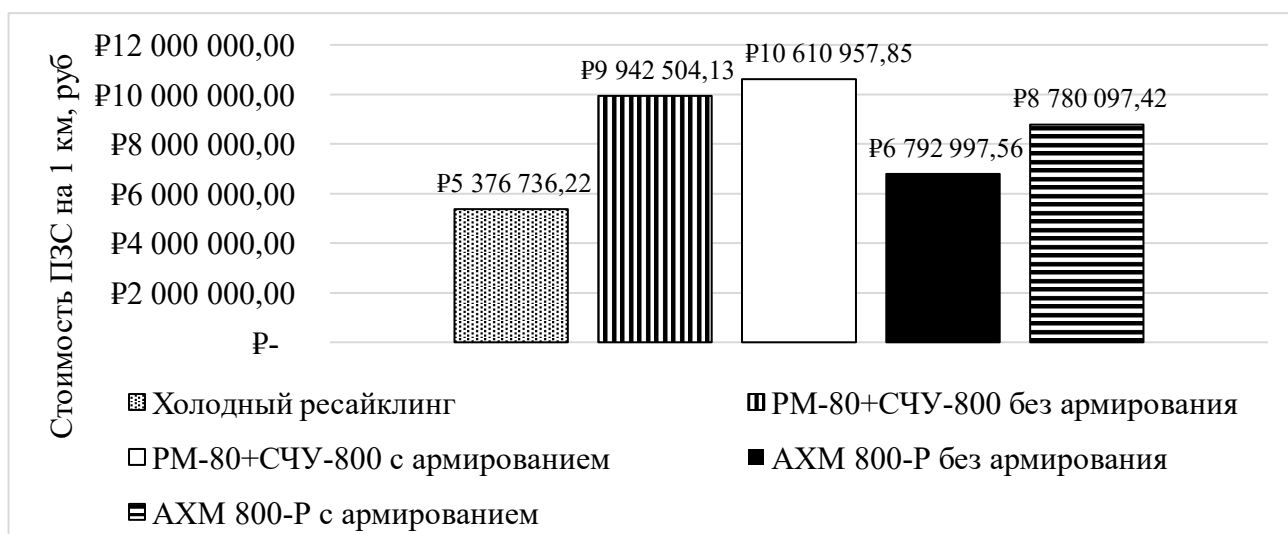


Рисунок 6 – Сравнение стоимостей работ по укладке ПЗС

Удельная стоимость ПЗС по предлагаемой технологии на 1 км ж.д. пути составляет 5 376 736,22 руб., что на 84–97 % дешевле стоимости технологии с применением машин РМ-80 и СЧУ-800 и на 26–63 % дешевле стоимости работы машинного комплекса АХМ-800Р.

С учетом вышеизложенного, рассматриваемая технология устройства ПЗС является более экономичной, производительной, а также выполняется с

наименьшими трудозатратами, по сравнению с аналогичными способами устройства ПЗС, в связи с чем рекомендуется дальнейшее тиражирование приведенной технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Проведен анализ методов и технологии закрепления крупнообломочных грунтов с оценкой применяемых вяжущих материалов, необходимых контролируемых параметров при подборе состава добавок и контроля качества после устройства, на основании которых была составлена программа лабораторных испытаний и выбран состав вяжущих материалов для закрепления материала старогодного балласта.

2) Получены зависимости прочности на сжатие и раскол и деформативности материала ПЗС из старогодных балластных материалов в зависимости от процентного содержания портландцемента и полимерно-минеральных добавок.

3) Проведены стендовые лабораторные испытания ПЗС, по результатам которых была доказана возможность обеспечения им необходимых деформативных характеристик.

4) Разработана и апробирована на ЭК ВНИИЖТа технология устройства ПЗС методом холодного ресайклинга, проведены полигонные испытания конструкции, доказывающие ее техническую эффективность, выполнен хронометраж операций по устройству ПЗС, на основании которых даны рекомендации по повышению производительности технологии.

5) Внедрена опытная технология устройства ПЗС методом холодного ресайклинга на перегоне Заозерная–Камала Красноярской железной дороги, по результатам которой внесены дополнительные рекомендации по повышению темпов и качества выполнения работ.

6) Разработана и апробирована методика определения приведенного модуля деформации по верху ПЗС, позволяющая определять необходимую толщину ПЗС и даны рекомендации по назначению толщины ПЗС по условию деформативности в зависимости от нормативного модуля деформации по верху ПЗС, модуля

деформации нижележащих слоев грунта, а также марки материала ПЗС по прочности.

7) Получены зависимости напряжений, возникающие в элементах ВСП от ПЗС с повышенными значениями модуля деформации и даны рекомендации по его снижению до оптимальных значений.

8) Разработан технологический процесс капитального ремонта пути с устройством ПЗС методом холодного ресайклинга, по результатам которого были рассчитаны суммарные трудозатраты и общее время выполнения работ. Технико-экономическое сравнение предложенного варианта с альтернативными технологиями с применением щебнеочистительных машин РМ-80 и СЧУ-800, а также машинного комплекса АХМ 800-Р показало его эффективность.

9) Рекомендуются расширение полигона укладки ПЗС по технологии холодного ресайклинга.

10) Перспективой дальнейшей разработки темы является уточнение приведенных требований, а также разработка нормативно-технической документации по применению ПЗС из старогодных балластных материалов, обработанных вяжущим.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) в рецензируемых научных изданиях

Ашпиз, Е. С. Применение технологии холодного ресайклинга для устройства подбалластных защитных слоев / Е. С. Ашпиз, К. А. Дорошенко // Путь и путевое хозяйство. – 2024. – № 11. – С. 4-7. – EDN WOMZOO.

Дорошенко, К. А. Лабораторные исследования материала подбалластного защитного слоя с применением вяжущих материалов / К. А. Дорошенко, Е. С. Ашпиз, В. А. Коростелев // Мир транспорта. – 2023. – Т. 21, № 6(109). – С. 34-39. – DOI 10.30932/1992-3252-2023-21-6-4. – EDN BDJNDQ.

б) патенты на изобретение

Евразийский патент на изобретение No 046540, МПК E01C 3/04 (2006.01), МПК E01C 21/00 (2006.01), МПК E01B 27/00 (2006.01), МПК E01B 27/08 (2006.01),

E01B 27/11 (2006.01), E01B 27/20 (2006.01) Способ реконструкции железнодорожного пути с формированием подбалластного защитного слоя: № 202390811: заявл. 06.04.2023: опубл. 25.03.2024 / Ашпиз Е.С., Дорошенко К.А., Загитов Э.Д., Коростелев В.А. Заявитель: ОАО «Российские железные дороги». – 9 с.: 4 ил

в) в других изданиях и материалах конференций

Ашпиз, Е. С. Лабораторные испытания материала подбалластного защитного слоя с применением вяжущих материалов / Е. С. Ашпиз, К. А. Дорошенко // TRANSOILCOLD 2023: Материалы 6-го Международного Симпозиума по строительному инжинирингу грунтовых сооружений на транспорте в холодных регионах, Москва, 02–05 октября 2023 года / Под общей редакцией Т.В. Шепитько. – Москва: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2023. – С. 41-44. – EDN YDDTKL.

Дорошенко Кирилл Андреевич

**РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К ЗАЩИТНОМУ СЛОЮ ОСНОВНОЙ
ПЛОЩАДКИ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ИЗ ДРЕНИРУЮЩИХ
ГРУНТОВ, ОБРАБОТАННЫХ ВЯЖУЩИМ**

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 10.06.2025 г.

Формат 60×90/16

Усл. печ. л. – 1,5.

Заказ № 701 от 10.06.2025 г.

Тираж 80 экз.

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, РУТ (МИИТ)