

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи



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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Ашпиз Евгений Самуилович

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Анализ методов усиления земляного полотна	11
1.1 Устройство подбалластных защитных слоев из щебеночно-песчано-гравийных смесей.....	11
1.2 Анализ применения вяжущих материалов для усиления земляного полотна	13
1.2.1 Общие положения	13
1.2.2 Укрепление местных крупнообломочных грунтов	17
1.2.3 Основные характеристики закрепленных грунтов	20
1.2.4 Применение добавок к цементогрунтовому слою	30
1.2.5 Технология устройства слоев из закрепленных грунтов	37
1.3 Выводы по разделу 1.....	41
2 Лабораторные испытания материала подбалластного защитного слоя	44
2.1 Постановка задачи эксперимента	44
2.2 Подбор состава вяжущих материалов и полимерных добавок	51
2.2.1 Модификация гранулометрического состава исходной смеси	51
2.2.2 Определение процентного содержания портландцемента и полимерного стабилизатора.....	59
2.3 Стендовые испытания модели подбалластного защитного слоя из старогодных балластных материалов, обработанных вяжущими материалами и полимерными стабилизаторами.....	68
2.3.1 Методика проведения испытаний	68
2.3.2 Результаты испытаний.....	69
2.4 Выводы по разделу 2.....	71
3 Устройство подбалластного защитного слоя на Экспериментальном кольце	73
3.1 Постановка задачи.....	73

3.2 Выбор опытных участков	74
3.3 Подготовительный этап	77
3.3.1 Подготовка основной площадки земляного полотна	77
3.3.2 Определение модуля деформации по подошве ПЗС	78
3.3.3 Анализ гранулометрического состава старогоднего балласта	79
3.3.4 Подбор состава добавок для ПЗС	82
3.4 Технология устройства подбалластного защитного слоя из старогодних балластных материалов	83
3.4.1 Конструкция ПЗС	83
3.4.2 Технологическая цепочка машин для устройства ПЗС	84
3.4.3 Контроль качества выполнения работ	88
3.4.4 Определение производительности выполнения работ	91
3.5 Проведение статических штамповых испытаний подбалластного защитного слоя	93
3.5.1 Методика испытаний	93
3.5.2 Результаты штамповых испытаний	94
3.6 Анализ состояния участков пути после наработки тоннажа	98
3.7 Выводы по разделу 3	103
4 Устройство подбалластного защитного слоя в условиях действующей особогрузонапряженной линии	106
4.1 Постановка задачи	106
4.2 Характеристика участка	107
4.3 Проектирование подбалластного защитного слоя	107
4.4 Укладка подбалластного защитного слоя	112
4.5 Выводы по разделу 4	119
5 Разработка требований к подбалластному защитному слою из старогодних балластных материалов с применением вяжущих	121
5.1 Постановка задачи	121

5.2 Назначение рекомендуемых толщин подбалластного защитного слоя из закрепленного материала по условию деформативности.....	122
5.2.1 Разработка методики назначения толщины подбалластного защитного слоя.....	122
5.2.1.1 Расчет приведенного модуля деформации	122
5.2.1.2 Разработка расчетной модели.....	127
5.2.1.3 Валидация расчетной модели	134
5.2.2 Расчет коэффициентов затухания напряжений.....	136
5.3 Оценка напряжений в элементах верхнего строения пути	141
5.4 Выводы по разделу 5.....	148
6 Оценка технико-экономической эффективности устройства подбалластного защитного слоя методом холодного ресайклинга	149
6.1 Расчет трудозатрат на выполнение работ по капитальному ремонту железнодорожного пути с устройством ПЗС.....	149
6.2 Сравнение технико-экономических показателей различных технологий устройства ПЗС	153
6.3 Выводы по разделу 6.....	159
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	160
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	162
Приложение А Результаты расчета коэффициента затухания напряжений	181
Приложение Б Ведомость затрат труда на проведение 1 км капитального ремонта пути с устройством ПЗС.....	184

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В связи с задачами транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [1] 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 [2].

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 истощением несущей способности грунтов, вызывает в последние годы по данным Управления пути Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» [3] 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 [4].

В работе [5] 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 допустимого напряжения на основной площадке $[\sigma_{\text{доп}}] = 80 \text{ кПа}$ [6]. 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 % [7, 8]. 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 % [9].

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 [10], на участках особогрузонапряженных линий планируется усилить до 6,4 тыс. км рабочей зоны земляного полотна из общей их протяженности в 16 тыс. км. Как показано в работе [4] основным способом для ее усиления является устройство подбалластных защитных слоев (далее ПЗС) из щебеночно-песчано-гравийных смесей, регламентируемое на железных дорогах ОАО «РЖД» Инструкцией [11]. Данный способ усиления основной площадки земляного полотна железнодорожного пути подтвердил свою эффективность как в нашей стране [12, 13], так и за рубежом [14], но его широкое внедрение сдерживается низкой производительностью при производстве работ по капитальному ремонту и реконструкции 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 [4–7, 15–17], Л.С. Блажко [18, 19], В.В. Виноградов [6, 20, 21], П.И. Дыдышко [22–25], П.В. Иванов [26], М.С. Каримов [27, 28], А.В. Козлов [29, 30], А.Ф. Колос [31–34], Г.Г. Коншин [35, 36], А.Л. Ланис [37–41], Л.С. Лapidус [42], М.В. Окост [43–45], И.В. Прокудин [46], Г.М. Шахунянц [47–50], а за рубежом необходимо отметить труды Е.Т. Selig [51–55], D. Li [52–55], C. Esveld [56], L. Yang [57, 58].

Вопросами закрепления грунтов вяжущими материалами занимались в основном ученые для автомобильных дорог В.М. Безрук [59–65], А.К. Бируля [66, 67], И.М. Грушко [68, 69], И.Л. Гурячков [60, 70], В.А. Кейльман [71–73], Ф.С. Климашов [74], А.П. Кузнецов [75–79], Луканина Т.М. [60, 80, 81], В.М. Могилевич [82, 83], П.А. Ребиндер [84], А.О. Салль [77, 85, 86], А.К. Славущкий [87–89], Р.П. Щербакова [82, 83, 90], A. Nabiba [91], K. Raja [92], H. Solihu [93].

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 старогоднего балласта без закрепления;
- провести подбор вяжущих и полимерных добавок для материала ПЗС из старогодних балластных материалов;
- провести стендовые лабораторные испытания модели ПЗС для подтверждения обеспечения требуемого модуля деформации;
- разработать технологию создания ПЗС из старогодних балластных материалов с обработкой вяжущими и провести укладку ПЗС по предлагаемой технологии с испытаниями получаемых деформативных характеристик слоя;
- разработать требования на ПЗС из старогодних 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 старогодних балластных материалов.
3. Предложена методика расчета модуля деформации по верху ПЗС и на его основе даны рекомендации по выбору толщины ПЗС из закрепленных старогодних балластных материалов
4. Доказана техническая и экономическая эффективность применения закрепленных вяжущими старогодних 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 старогодных балластных материалов позволит сократить затраты на закупку и доставку кондиционных материалов на место производства работ, а также исключить необходимость вырезки и вывоза старогодных 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 проведения 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» (Москва, РУТ (МИИТ), 2025 г.).

1 Анализ методов усиления земляного полотна

1.1 Устройство подбалластных защитных слоев

из щебеночно-песчано-гравийных смесей

Одним из эффективных способов усиления основной площадки земляного полотна является устройство подбалластного защитного слоя из щебеночно-песчано-гравийной смеси (далее – ЩПГС), который выполняет следующие функции [11]:

- распределение и снижение напряжений от поездной нагрузки на грунты земляного полотна с целью обеспечения их несущей способности;
- отвод атмосферной воды от основной площадки земляного полотна;
- разделительную, не допуская взаимного проникновения и перемешивания частиц балластной призмы и грунтов земляного полотна;
- защиту от промерзания пучинистых грунтов земляного полотна;
- виброзащитную, обеспечивая эффективное гашение колебаний от поездов.

Кроме того, подбалластный защитный слой должен иметь достаточное уплотнение, обеспечивая его работу без остаточных деформаций.

В настоящий момент в ОАО «РЖД» имеется положительный опыт применения подбалластного защитного слоя на экспериментальном участке «Торбино–Боровенка» [12], на котором по данным эксплуатирующей организации в сопоставительных условиях с контрольными участками без защитного слоя получено снижение объема выправочных работ более чем в два раза [13].

Однако, данная технология имеет ряд недостатков, ограничивающих ее применение: высокая стоимость эксплуатации и малый парк машин по сооружению защитного слоя [94], низкий темп производства работ (до 70 м/ч [19]), необходимость технологической цепочки дополнительных машин (составов-цистерн для поддержания оптимальной влажности, составов для материалов ЩПГС и вывоза вырезанного грунта), большой объем рабочей силы, задействованной на устройстве защитного слоя. Также стоит отметить

необходимость вырезки исходного грунта земляного полотна на глубину до 1 м для его замены на ЩПГС.

Для сокращения объемов вырезки грунта (уменьшения толщины защитного слоя) применяют армирование защитного слоя плоскими и объемными георешетками. В работе [16] проводилось сравнение трех конструкций: насыпь без защитного слоя, с защитным слоем толщиной 0,4 м и с защитным слоем толщиной 0,2 м с армированием плоской георешеткой. По результатам испытаний модуль деформации, полученный при штамповых испытаниях, по верху защитного слоя в варианте с георешеткой в 2,5 раз больше варианта без защитного слоя и в 1,5 раза больше варианта с защитным слоем без армирования, при этом осадка в процессе циклических испытаний на испытательной базе в 500 тысяч циклов меньше в 2,5 и 5 раз соответственно.

Схожие результаты были получены в работе [95] методом конечно-элементного моделирования – при сравнении конструкции защитного слоя толщиной 0,4 м и защитного слоя толщиной 0,25 м с армированием плоской гексагональной решеткой, модуль деформации армированного защитного слоя выше в 1,35 раз. При этом, армированный защитный слой позволяет сократить затраты на его устройство на 1,5 млн рублей на 1 км железнодорожного пути за счет уменьшения его толщины без потери в деформативных характеристиках.

В статье зарубежных авторов [96] аналогично отмечается эффект применения георешеток в части уменьшения осадки в процессе циклического нагружения, повышения стабильности железнодорожного пути и, следовательно, сокращения затрат на текущее содержание пути.

Однако, применение георешеток полностью не решает проблемы, которая связана с необходимостью замены грунта насыпи на ЩПГС, что требует вырезки и вывоза грунта насыпи, доставки ЩПГС на участок производства работ, поддержание ее оптимальных свойств в процессе укладки.

Альтернативой замены грунта насыпи на привозной материал подбалластного защитного слоя является применение в качестве материала защитного слоя накопленной толщи старогодних балластных материалов. При

данном способе устройства защитный слой можно получить путем переработки загрязненного щебня, вырезанного при проведении работ по глубокой очистке балластного слоя. Данная технология позволит решить проблемы с необходимостью транспортировки материалов, но, при этом, она имеет свои недостатки – согласно техническим требованиям [97], зерновой состав материала защитного слоя должен быть в определенном диапазоне и, в случае его несоответствия требованиям, смесь необходимо обогащать требуемыми фракциями материала, что повлечет за собой дополнительный расход ЩПГС. Также, по результатам испытаний подбалластного защитного слоя, изготовленного из продуктов вырезки старого балласта [98], исходная смесь не позволяет для особогрузонапряженных, скоростных и высокоскоростных линий достичь требуемых согласно [11] характеристик по модулю деформации при штамповых испытаниях.

По этим причинам предлагается рассмотреть альтернативную технологию устройства защитного слоя посредством закрепления слоя накопленной толщи балластных материалов вяжущими материалами и стабилизаторами, тем самым повышая физико-механические характеристики, что позволит сократить время выполнения работ за счет исключения операций вывоза толщи балластных материалов, а также сокращения толщины самого защитного слоя.

1.2 Анализ применения вяжущих материалов для усиления земляного полотна

1.2.1 Общие положения

Вяжущие материалы нашли широкое применение в автодорожном и аэродромном строительстве в качестве средства для улучшения физико-механических свойств грунтов основания и рабочей зоны земляного полотна. Разработкой составов с неорганическими и органическими вяжущими занимались многие исследователи, начиная с 1920-х годов [99].

Технология закрепления грунтов получила свое развитие в связи с нехваткой кондиционных материалов для строительства и реконструкции дорожных одежд, необходимости их транспортировки до места производства работ. В связи с этим, рядом исследователей было предложено рассмотреть возможность улучшения характеристик местных грунтов, тем самым сокращая затраты на стоимость и время производства работ.

Одной из важнейших задач, которую решают при укреплении грунтов, является придание высокой и длительной прочности. Существуют два основных требования к укрепленному грунту: необходимость обеспечения после окончания процесса твердения такой устойчивой и необратимой связности, которая не дает возникать ненормативным деформациям в продольном и поперечном направлении, а также обеспечение длительного сопротивления неблагоприятным погодным условиям (при увлажнении, промерзании и т.д.) [59].

Применение данной технологии согласно исследованиям [93] позволяет:

- уменьшить толщину конструктивного слоя;
- сократить расход материалов и время на производство и доставку материалов;
- применять отходы производства вместо их утилизации.

В качестве исходных материалов для закрепления служат такие грунты, как крупнообломочные, песчаные и глинистые грунты. В отдельных случаях могут быть использованы малопрочные скальные грунты, при условии их раздробления на частицы разных размеров [60].

Требуемые свойства к получаемому материалу могут быть различны. В соответствии с этим могут применяться различные вяжущие материалы и способы закрепления грунтов. По способам закрепления грунтов можно выделить следующие основные виды [59]:

- укрепление неорганическими вяжущими материалами;
- укрепление органическими вяжущими материалами;
- укрепление синтетическими полимерами;

- укрепление комплексными добавками (комбинирование нескольких методов закрепления);

- термическое укрепление;

- электрохимическое укрепление;

- уплотнение.

Самыми распространенными вяжущими материалами для закрепления грунтов являются:

- портландцементы, шлакопортландцементы и другие виды цемента;

- известь гашеная и негашеная;

- битумные эмульсии;

- различные виды синтетических смол.

Сами грунты в зависимости от гранулометрического состава разделяют на три категории (рисунок 1.1) [59]:

- пригодные;

- условно непригодные;

- непригодные.

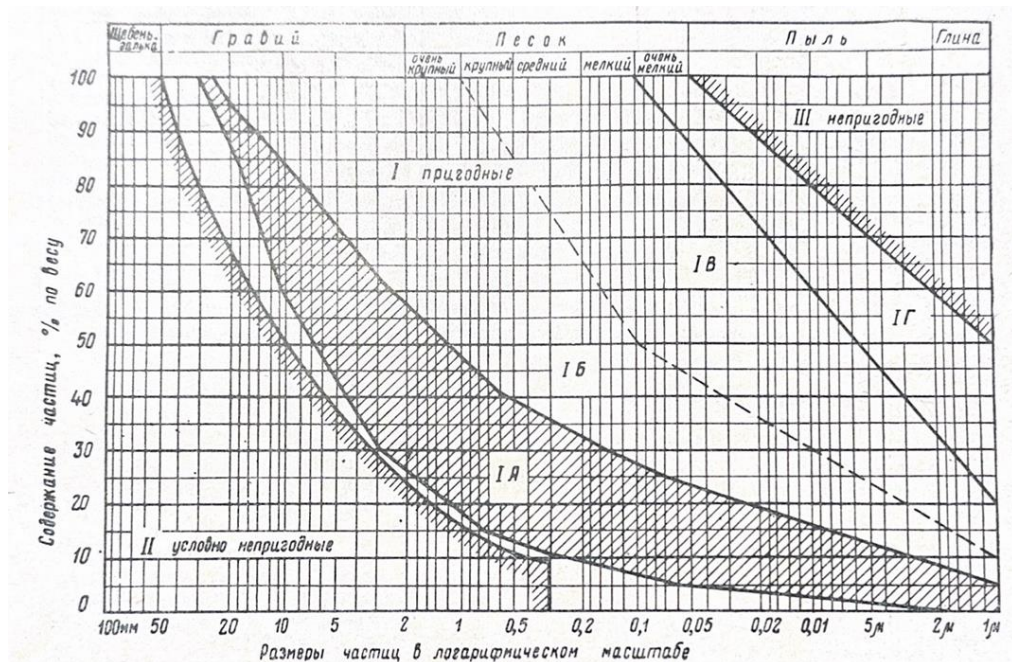


Рисунок 1.1 – Классификация грунтов по степени их пригодности для укрепления вяжущими материалами [59]

Первая группа включает в себя крупнообломочные и мелкообломочные грунты с подобранным оптимальным гранулометрическим составом или в естественном виде, песчаные, пылеватые, супесчаные, суглинистые грунты. Особенно выделяется группа IA, которая включает крупнообломочные и мелкообломочные грунты, за счет того, что эти грунты легко поддаются обработке, перемешиванию и уплотнению, а также имеют наибольшие характеристики прочности.

К условно непригодным грунтам относятся крупнообломочные каменные породы. Их непригодность обуславливается неоптимальным гранулометрическим составом, а также большим содержанием крупных фракций, что может приводить к поломкам рабочих органов машин и механизмов.

К непригодным для укрепления грунтам относят жирные высокопластичные глины, так как они требуют больших затрат вяжущих материалов, что делает процесс укрепления грунтов экономически нецелесообразным по сравнению с доставкой кондиционных материалов на место производства работ.

Аналогично и вяжущие материалы можно условно разделить на три группы:

- различные виды цементов, синтетические смолы;
- гашеная и негашеная известь;
- жидкие битумы и битумные эмульсии.

Приведенные вяжущие классифицируются на основе зависимости их процентного содержания на свойства получаемого материала. Так, например, при использовании цементов, прочность и долговечность закрепляемого грунта будет пропорционально возрастать в широком диапазоне (до нескольких десятков процентов содержания в смеси). Отличная ситуация наблюдается при применении известей – в этом случае свойства материала возрастают до определенного предела, после чего, либо не изменяются, либо ухудшаются, при этом абсолютное значение прочности получаемого материала будет ниже, чем при использовании цементов. При использовании битумов наблюдается определенный оптимум, ниже и выше которого свойства материалов значительно снижаются. Свойства получаемого

материала находятся в одном диапазоне с цементированным грунтом, однако, они больше подвержены влиянию температуры и условий нагружения [59].

С учетом вышеизложенного, для закрепления накопленной толщи старогодных балластных материалов наиболее перспективными вяжущими по условиям создания прочного и долговечного слоя, является применение портландцементов.

1.2.2 Укрепление местных крупнообломочных грунтов

Развитие технологии закрепления местных каменных материалов, представленных щебеночно-песчано-гравийными, щебеночно-песчаными и песчано-гравийными смесями, было обусловлено необходимостью создания долговечных слоев дорожной одежды без использования привозных материалов ввиду удаленности мест производства работ от расположения ближайших карьеров или мест приготовления грунтовых смесей. Первые исследования по расширению полигона использования местных материалов были начаты в 30-х годах XX века учеными из Союздорнии [100]. В дальнейшем исследования Л.К. Бируля, В.А. Кейльмана, А.К. Славущкого, И.М. Грушко, Ф.С. Климашова, В.Н. Макаренкова, В.К. Шильникова, А.П. Кузнецова и других позволили разработать сферы применения, технологические схемы, методы расчетов при использовании местных каменных материалов [66, 69, 71, 73, 75, 76, 78,].

Применяемые местные каменные материалы согласно классификации В.А. Кейльмана [71] разделяются на три группы: кондиционные, применяемые без укрепления, условно-кондиционные, применяемые после их укрепления различными гранулометрическими добавками и некондиционные, применяемые только после их обработки вяжущими.

Одним из определяющих факторов при оценке пригодности смеси является ее гранулометрический состав. По данным [89], оптимальная смесь состоит из различных по крупности частиц, при этом крупные частицы составляют скелет массива, а мелкие частицы играют роль заполнителя, уменьшая коэффициент пористости.

В работах Н.Н. Иванова [101] были выведены предельные кривые смесей с гранулометрическим оптимальным составом, приведенные на рисунке 1.2.

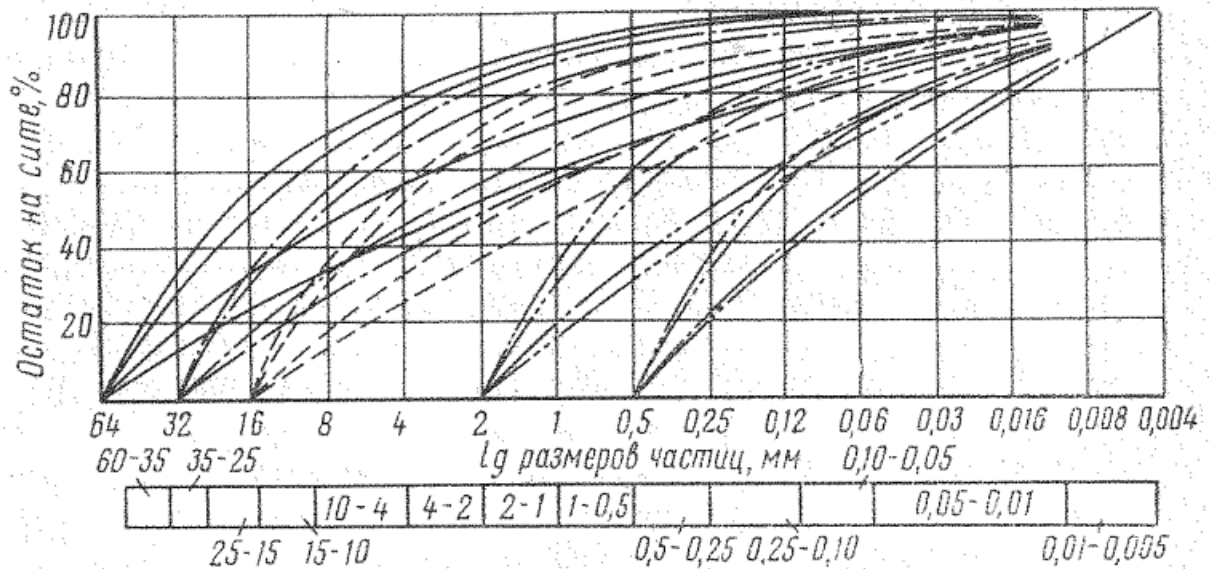


Рисунок 1.2 – Предельные кривые оптимальных грунтовых смесей [101]

Согласно [101], смеси, лежащие в этих диапазонах, обладают требуемой плотностью и коэффициентом пористости. Достижение требуемого коэффициента пористости является одним из важных условий для обеспечения водонепроницаемости закрепленного слоя, что ограничивает переувлажнение нижележащих слоев грунта в дождливые периоды.

В работах [102–104] доказано, что некондиционные (малопрочные) материалы, под которыми понимаются гравийные и щебеночные материалы, в которых содержится или образуется в процессе эксплуатации большое количество мелких и пылеватых частиц, возможно применять для дорожных одежд, при условии их обработки органическими и неорганическими вяжущими.

В 1956–1957 году на трассе Ленинград–Киев было уложено дорожное покрытие из местных гравийных грунтов, обработанных органическим вяжущим. При этом, в условиях интенсивного движения, дорожное покрытие прослужило 13 лет – до 1970 года. Аналогичные результаты были получены при эксплуатации трасс Москва–Ленинград, Выборг–Ленинград–Таллин и других [85]. За период с

1959 по 1963 год суммарно было построено 56,4 км дорожного основания из песчано-гравийного и щебеночно-песчаного материалов, укрепленных цементом [105].

Также положительный опыт был получен на опытном участке в Каракалпакской АССР, где был уложен опытный участок длиной 240 м с покрытием из щебеночной смеси, обработанной цементом. На протяжении двух лет наблюдения за экспериментом, дорожное покрытие показывало непрерывный прирост прочности, несмотря на превышение расчетных нагрузок и расчетной интенсивности движения. По окончании эксперимента, состояние покрытия оценивалось как хорошее, дефектов обнаружено не было. Стоит отметить, что существенно не изменился и гранулометрический состав смеси [106].

М.С. Каримовым в 1957 году был уложен опытный участок защитного слоя основной площадки земляного полотна железнодорожной насыпи на экспериментальном кольце ЦНИИ МПС из слоев песка и щебня из балластных лож и балластных углублений, закрепленных портландцементом [27]. По анализу периодических наблюдений за участком в период 1958–1961 годов можно сделать вывод, что даже несмотря на нарушение технологии укладки смеси (были получены низкие значения прочности ввиду недостаточной влажности грунта при производстве работ по закреплению слоя), на участке во время осмотров не были обнаружены признаки деформаций. Нивелировка контрольных точек также подтвердила отсутствие деформаций основной площадки. В дополнение к вышеизложенному, автор отмечает стабильность показаний влажности грунта на глубину до 1 м ниже подошвы цементогрунтового слоя и водонепроницаемость самого слоя.

В связи с увеличением объемов укладки дорожных покрытий и оснований из местных материалов с обработкой вяжущими, остро встал вопрос контроля качества производства работ, предварительной оценки физико-механических характеристик получаемой смеси, подбора содержания добавок для расчетов и проектирования дорожных одежд. Данный факт поспособствовал развитию

методов лабораторных испытаний исходного материала (щебень, гравий, песок), вяжущих и получаемого закрепленного грунта.

1.2.3 Основные характеристики закрепленных грунтов

Основными контролируемыми параметрами при проектировании слоя закрепленного грунта являются:

- оптимальная влажность;
- плотность;
- прочность при сжатии;
- прочность при расколе или прочность при изгибе;
- модуль упругости.

Определение оптимальной влажности для крупнообломочных грунтов является достаточно сложной задачей, ввиду невозможности применения метода стандартного уплотнения по ГОСТ 22733 [107]. В работе В.М. Безрука оценивалось влияние влажности закрепленного грунта на его прочность. По данным [59], уменьшение влажности на 3–4 % относительно оптимальной, несущественно сказывается на прочности грунта. По результатам испытаний [59, 108], оптимальная влажность закрепленного грунта приблизительно на 1–2 % ниже, чем полученная по методикам нормативных документов.

В работе [75] проводились испытания крупнообломочных грунтов при 70, 100, 130 и 150 % от оптимальной влажности, определенной по методике [109]. По результатам испытаний можно сделать вывод, что увеличение влажности на 30 % сравнительно оптимальной дает прирост по прочности при расколе до 45 %. При этом, дальнейший рост влажности показывает уменьшение плотности и ухудшение прочности смеси, причем особенно сильно это проявляется с увеличением процентного содержания цемента.

По результатам данных испытаний была выведена эмпирическая формула по определению оптимальной влажности W_o , %, крупнообломочных грунтов, укрепленных цементом:

$$W_o = W_o'k(1 - p) + nW_{ц}, \quad (1.1)$$

где W_o' – оптимальная влажность частиц размером менее 5 %;

k – эмпирический коэффициент, характеризующий материал по гранулометрическому и петрографическому составу, который принимается 1,0; 1,10; 1,20 для крупнообломочных смесей изверженных, смешанных и карбонатных пород и 0,85; 0,90 для песков;

p – содержание в смеси частиц размером крупнее 5 мм, в долях от единицы;

n – содержание цемента, %;

$W_{ц}$ – нормальная густота цементного теста, которая для портландцемента составляет 0,25–0,30, в долях от единицы.

По результатам исследования можно сделать вывод, что для создания прочного и надежного закрепленного слоя крупнообломочных материалов необходимо увеличивать его влажность на 30 %, что в абсолютных значениях составляет приблизительно 2 % воды от массы грунта. При этом, при уменьшении влажности на 2 % относительно оптимальной, прочность цементобломочного материала может снижаться до 50 % ввиду недостаточного количества воды для нормальной гидратации цемента.

Немаловажную роль составляет и плотность получаемого материала. По исследованиям [78], прочность грунта при оптимальной влажности зависит от давления уплотнения. При уменьшении уплотняющего давления с 15 МПа, что соответствует нагрузке от тяжелого уплотняющего катка, в 10 раз, прочность цементогрунта падает в 1,5–2,5 раза. При давлении в 3 МПа материал достигает коэффициента уплотнения 0,96–0,97, однако его прочность остается ниже на 35–50 %, чем при уплотнении давлением 15 МПа. Стоит отметить, что повышение давления уплотнения выше 15 МПа может оказать негативный эффект на прочность закрепляемого слоя при применении слабых горных пород ввиду разрушения крупных частиц и нарушения структурных связей. По данным [82], прочность слоя при опытной застройке автомобильных дорог оказывается на 10–70 % меньше прочности лабораторных образцов с тем же составом грунта и

добавок цемента в зависимости от применяемых типов машин и степени уплотнения. В работе [83] было установлено, что плотность грунта при строительстве автодорог обычно составляет от 0,95 до 0,98 от плотности лабораторных образцов.

Одним из способов увеличения плотности и, как следствие, прочности получаемого слоя, является оптимизация гранулометрического состава грунта. Критерием оптимальности гранулометрического состава является плотность упаковки его зерен. В данном случае, основная задача оптимизации гранулометрического состава заключается в подборе такого состава и соотношения заполнителя с крупной фракцией, обеспечивающей максимальную плотность упаковки зерен [110].

С целью подбора оптимального гранулометрического состава используются математические модели абсолютно плотных смесей, такие как модели Фуллера, Боломея, Дингера-Функе, Гуммеля и др. [111].

Интегральная функция распределения Фуллера, предложенная в 1907 г. имеет вид

$$A_i = 100 \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^n, \quad (1.2)$$

где A_i – проход частиц, % через условное сито размером d_i , мм;

$d_{\max}$ – наибольший размер зерна в смеси, мм;

n – коэффициент распределения, в общем виде принимается равным 0,5.

В 1920-х года Боломеем было предложено уравнение смеси заполнителя для тяжелых бетонов

$$A_i = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d_i}{d_{\max}}}, \quad (1.3)$$

где A_i – проход частиц, % через условное сито размером d_i , мм;

$d_{\max}$ – наибольший размер зерна в смеси, мм;

A – коэффициент, зависящий от материала крупного заполнителя и типа подвижности смеси (10 для щебенистых и малопластичных смесей, 12 для пластичных смесей с гравием, 14 для пластичных смесей с щебнем).

В то же время дорожные строители в США применяли уравнение Тэлбот–Ричарда (Гуммеля), которое является модификацией уравнения Фуллера

$$A_i = 100 \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^m, \quad (1.4)$$

где A_i – проход частиц, % через условное сито размером d_i , мм;

$d_{\max}$ – наибольший размер зерна в смеси, мм;

m – коэффициент распределения, в общем виде принимается равным от 0,46 до 0,52.

В данном уравнении был уточнен показатель степени m , который в уравнении Фуллера мог принимать значение от 0,1 до 1, при показателе степени m , равном 0,5, получается уравнение Фуллера.

Приведенные уравнения оптимальных кривых гранулометрического состава могут давать только приближенные значения, исходя из того, что данные математические модели описывают оптимальную кривую гранулометрического состава для сыпучих сред со сферическими частицами, соответственно, не учитывают формы частиц, встречающихся в реальных смесях.

Для учета влияния формы частицы было предложено использовать коэффициент формы зерна K_ϕ , определяемый по формуле

$$K_\phi = \frac{\Phi_{\text{сф}}}{\Phi_{\text{ч}}}, \quad (1.5)$$

где $\Phi_{\text{сф}}$ – площадь поверхности эквивалентной сферы, мм²;

$\Phi_{\text{ч}}$ – площадь поверхности частицы, мм²;

На основе данного коэффициента было выведено уравнение описания оптимальной кривой гранулометрического состава по Функу-Дингеру, которое выглядит следующим образом

$$A_i = 100 \left(\alpha + (1 - \alpha) \frac{d_i^n - d_{\min}^n}{d_{\max}^n - d_{\min}^n} \right), \quad (1.6)$$

где A_i – проход частиц, % через условное сито размером d_i , мм;

$d_{\max}$ – наибольший размер зерна в смеси, мм;

d_{min} – наименьший размер зерна в смеси, мм;

n – коэффициент распределения;

$$\alpha = 1 - K_{\phi}.$$

Согласно исследованиям [112], значение коэффициента α для реальных смесей находится в пределах от 0,08 до 0,14, а наиболее точные результаты получаются при использовании коэффициента распределения n равного 0,5.

В работе [113] с использованием приведенных уравнений были определены плотности упаковок полидисперсных сфер и суммарная удельная поверхность частиц. Результаты расчетов приведены на рисунке 1.3.

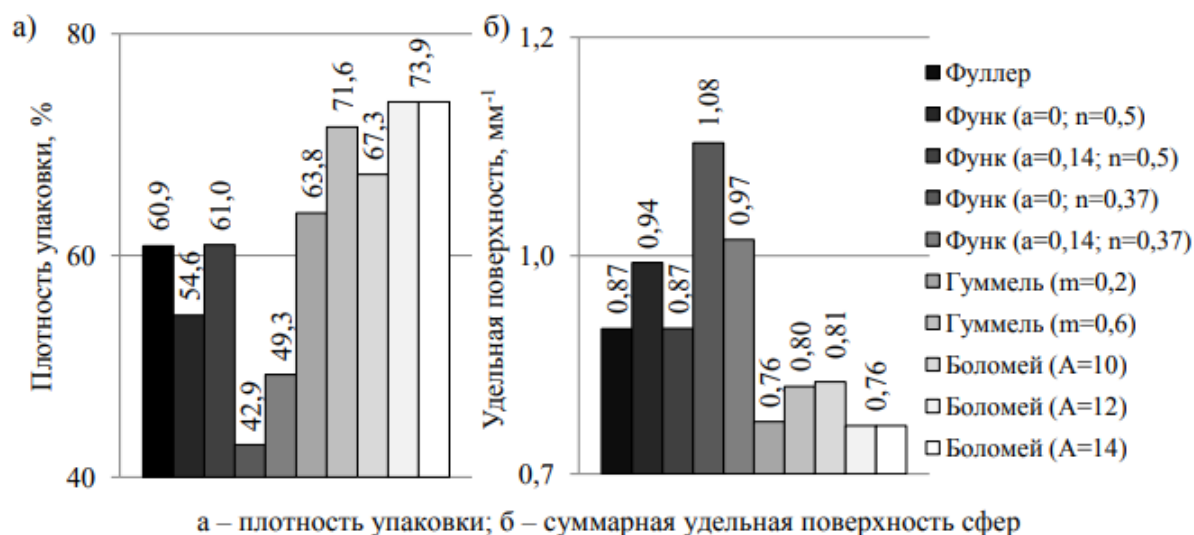


Рисунок 1.3 – Результаты расчета по моделям «идеального» гранулометрического состава [113]

Как видно из результатов расчета, наибольшую плотность материала получается достичь при использовании модели Боломея с эмпирическим коэффициентом A равным 14, при этом по модели Функа-Дингера достигается наибольшая удельная площадь частиц.

В работе [114] показано, что за счет применения данных моделей удалось оптимизацией гранулометрического состава и добиться сокращения расхода цемента на образцах бетона на 11 % без снижения характеристик по прочности и водонепроницаемости. Подвижность самой смеси не изменилась, а морозостойкость образцов увеличилась в 2 раза.

Наиболее часто встречающимся методом оценки свойств закрепляемой смеси является ее прочность на сжатие. Данный момент получил свое распространение из-за простоты проведения испытания и отсутствия необходимости проектирования и изготовления сложной оснастки.

Вместе с этим, А.П. Кузнецовым в работе [76] было предложено оценивать качество укрепленной смеси по прочности на растяжение при изгибе и модулю упругости, так как основная часть деформаций конструкций закрепленных грунтовых слоев происходила из-за действия ненормативных растягивающих напряжений. Определять прочность при растяжении предполагалось на образцах-балочках размерами 10x10x40 см. Однако, в виду сложности изготовления образцов было принято решение перейти на испытания образцов-цилиндров на раскол по боковой поверхности (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Схема испытаний на растяжение при расколе

В работе [115] одной из первых была представлена схема испытаний материалов цементов и грунтоцементов на раскалывание. Одно из преимуществ данного метода состоит в том, что к испытаниям пригодны образцы любого соотношения длины к диаметру при учете переводного коэффициента, выведенного И.Н. Ахвердовым [116].

При этом была получена корреляционная зависимость между прочностью на растяжение при изгибе и прочностью на растяжение на раскол для материалов с прочностью на раскол от 0,2 до 1,0 МПа по формуле

$$R_u = 1,95R_p - 0,5, \quad (1.7)$$

где R_u – прочность на растяжение при изгибе, МПа;

R_p – прочность на растяжение при расколе, МПа.

На рисунке 1.5 представлены результаты испытаний по определению корреляционной зависимости между прочностью на изгиб и прочностью на раскол.

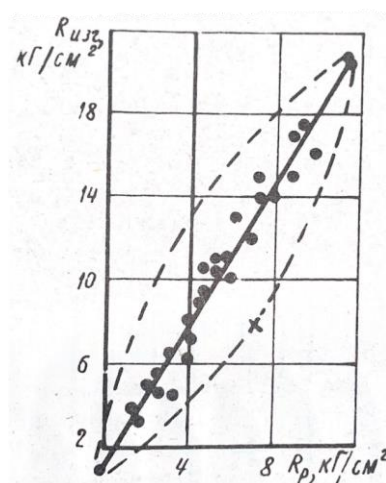


Рисунок 1.5 – Корреляционная зависимость между прочностью на изгиб и прочностью на раскол [76]

Вывод данной зависимости помог заметно упростить определение модуля упругости, который может быть найден по формуле

$$E = 6700 R_u, \quad (1.8)$$

где E – модуль упругости, МПа;

R_u – прочность на растяжение при изгибе, МПа.

При этом, по результатам многочисленных исследований, в работе [75] А.П. Кузнецовым были выведены зависимости между прочностью на сжатие и прочностью на изгиб и раскол в различном возрасте образцов, представленные в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Корреляционные зависимости образцов крупнообломочных материалов [75]

Функциональная зависимость	Корреляционная связь	Количество опытов	Доверительная вероятность	Коэффициент корреляции	Ошибка коэффициента корреляции	Надежность определения коэффициента корреляции	Доверительная надежность	Формула связи
$R_{28} = f(R_7)$	Прочность при сжатии в возрасте 28 суток R_{28} с прочностью при сжатии в возрасте 7 суток R_7	23	0,95	0,98	0,008	114	0,02	$R_{28} = 1,5 R_7$
$R_p = f(R_{28})$	Прочность при расколе R_p и прочность при сжатии R_{28} образцов цилиндров	28	0,95	0,82	0,060	13,4	0,12	$R_p = 0,09 R_{28} + 1,5$
$R_{и} = f(R_{28})$	Прочность при изгибе и прочность при сжатии	30	0,95	0,82	0,060	13,7	0,12	$R_{и} = 0,18 R_{28} + 1,9$
$C = f(R_{и})$	Сопротивление сцеплению C и прочность при изгибе $R_{и}$	16	0,95	0,99	0,006	16,7	0,01	$C = 0,7 R_{и} + 0,2$
$R_{28} = f(R_{28}^p)$	Прочность при сжатии цилиндров и прочность на сжатие после испытания на раскол R_{28}^p	30	0,95	0,90	0,035	25,7	0,06	$R_{28} = 1,44 R_{28}^p - 3,9$

Автор также отмечает, что все соотношения между прочностными показателями представляют собой почти линейные зависимости, причем, данные соотношения не зависят от процентного содержания цемента, гранулометрического и петрографического состава, а также от прочности материала горной породы.

Различные исследования [27, 77, 117] также показали зависимость модуля упругости укрепленного цементом слоя от гранулометрического и петрографического состава. При этом, большое значение при определении модуля упругости отдается и методу испытаний. В работе [75] указывается на увеличение модуля упругости у закрепленного крупнообломочного грунта в 10–40 раз по сравнению с тем же необработанным материалом. Однако, деформативность грунтоцементных смесей оказывается во много раз выше, чем у бетона вследствие наличия не только кристаллических, но и коагуляционных связей. Образование же только кристаллических связей будет невозможно по причине малого процента содержания цемента. В связи с этим уменьшаются температурные и усадочные напряжения, что положительно отражается на работоспособности конструкции.

Уменьшенные температурные деформации способствуют повышенному сопротивлению образованию трещин. В работах [118, 119] доказана зависимость коэффициента линейного расширения от происхождения материала, следовательно, линейные расширения цементного камня оказываются в 2,2 раза выше, чем у бетонов с заполнителем из твердых пород и в 2,5–3 раза больше, чем у бетонов с заполнителем из известняковых пород. При этом установлено, что увеличение процентного содержания цемента будет приводить к увеличенным температурным деформациям, в связи с чем, целесообразно укреплять крупнообломочные грунты малыми дозировками цемента. Оценить трещиностойкость закрепленного грунта можно по соотношению прочности на раскол или изгиб к прочности на сжатие. Считается, что чем меньше $R_{сж}/R_p$, тем более трещиностойкая смесь.

В работе [75] приведено условие трещиностойкости материала, выражаемое формулой

$$K_T = \frac{\varepsilon_n C_y \gamma}{Q \alpha_t}, \quad (1.9)$$

где ε_n – предельная относительная деформация растяжения;

C_y – удельная теплоемкость материала, ккал/(кг °С);

γ – объемная масса материала, кг/м³;

Q – тепловыделение цемента, ккал/м³;

α_t – коэффициент предельного расширения.

Увеличение величины K_T приводит к уменьшению вероятности образования трещин в материале.

Еще одним фактором, влияющим на прочностные характеристики закрепляемого слоя, являются окружающие условия при его укладке. Одними из самых значимых технологических факторов являются время от затворения смеси до окончания ее уплотнения и температура окружающей среды при ее укладке. Исследованиями [59, 88, 75] установлено, что при повышении температуры окружающей среды с 20 до 40 °С, оптимальное время от начала увлажнения до окончания уплотнения сокращается в 6 раз – с 3 до 0,5 ч. При этом прочность получаемого слоя оказывается ниже в среднем на 20 %.

Одним из главных недостатков применения технологии закрепления крупнообломочных грунтов цементами является повышенная жесткость получаемых конструкций, большой начальный прирост прочности при начале затвердевания и неравномерное температурное расширение, что ведет к образованию трещин в конструкции. По данным [78, 105], быстрый набор прочности ведет к образованию трещин из-за больших внутренних напряжений, в то же время В.М. Безрук в работе [60] отмечает, что главной причиной трещинообразования является потеря влаги в закрепляемом слое.

В связи с вышеизложенным, актуальными стали вопросы применения различных добавок для снижения отрицательных свойств цементогрунтов.

1.2.4 Применение добавок к цементогрунтовому слою

Применение комплексного метода закрепления грунтов обуславливалось необходимостью улучшения характеристик получаемой смеси в зависимости от требуемых условий эксплуатации ввиду невозможности или экономической нецелесообразности применения однокомпонентной стабилизации. Основными функциями применения добавок являлись улучшение водно-физических свойств (снижение деформаций морозного пучения, изменение оптимальной влажности, повышение водонепроницаемости слоя) и повышение несущей способности грунтов (прочностные и деформационные характеристики) [120].

Одной из первых применяемых для цементогрунта добавкой стала битумная эмульсия. В работах [75, 110] по результатам испытаний доказано, что добавление битумной эмульсии в закрепляемый слой уменьшает его скорость набора прочности на 20–50 %, что уменьшает внутренние напряжения в процессе твердения и уменьшает образование температурных трещин. Автор отмечает уменьшение водопоглощения слоя в 1,5–4 раза при добавках 1–1,5 % битумной эмульсии от общей массы смеси, а также увеличение деформативности в 3–3,5 раза по сравнению со смесью без добавок, что объясняется наличием как жестких, так и эластичных связей в грунте за счет того, что битумная эмульсия адсорбируется на частицах покрывая их не сплошной оболочкой, а прерывистой сеткой.

В исследованиях специалистов из Союздорнии [61–63] было установлено, что применение в цементогрунтовых конструкциях добавок извести, едкого натрия или солей, легкорастворимых в воде, в количестве приблизительно 1–1,5 % от массы грунта позволяет выполнить ряд следующих операций:

- создать оптимальные условия для взаимодействия частиц грунта с продуктами гидролиза цемента, тем самым получая слой грунта с повышенными характеристиками прочности и морозостойкости;

- расширить область применимых цементов для закрепления грунтов;
- увеличить время строительного сезона за счет возможности проведения работ в период пониженных и отрицательных температур, а также возможности стабилизации переувлажненных грунтов;
- оптимизировать расход вяжущих материалов до 30 % [60, 121].

В настоящее время распространилось применение стабилизаторов грунта как комплексной добавки, включающей суперпластификаторы, гидрофобизаторы, сложноэфирные группы и ионогенные комплексы [122], задача которых состоит в придании закрепляемому грунту повышенной прочности, водостойкости и водонепроницаемости, морозостойкости и трещиностойкости.

Из применяемых на данный момент стабилизаторов можно выделить такие стабилизаторы иностранного производства, как Perma-Zume, Roadbond, NanoStab, Polybond, SPP, а также отечественного производства – ANT, Никофлок, Полистаб, Дортех.

Стабилизатор «ANT» представляет собой комплексный органический препарат в виде водного раствора, который, за счет своего состава обеспечивает окислительно-восстановительные реакции воды в грунте и ионный обмен с поглощающим комплексом, тем самым, выполняя их коагуляцию. В работе [123] авторами были проведены испытания по определению влияния данного стабилизатора на продукты отсева дробления каменных материалов. По результатам испытаний установлено, что применение стабилизатора «ANT» в количестве 0,007 % от массы грунта, увеличивает отношение предела прочности на сжатие после испытаний на морозостойкость к пределу прочности на сжатие после водопоглощения на 30 %, при этом, авторами также отмечается, что коэффициент морозостойкости (отношение прочности грунта на сжатие после испытаний на морозостойкость к прочности грунта в нормальных условиях) в среднем составляет 0,76.

Стабилизатор NanoStab также является водной добавкой, предназначенной для применения в песчаных, супесчаных и крупнообломочных грунтах [122]. Приблизительный расход материала стабилизатора выше, чем у стабилизатора «ANT» и, согласно [124] составляет от 0,4 до 0,7 % от массы грунта.

Еще одним представителем стабилизаторов грунта в жидкой форме является швейцарская добавка Polybond. По результатам испытаний образцов [125], обработанных ей в количестве 0,02 % от массы грунта для супесчаного грунта с добавлением песчано-гравийной смеси, наблюдается увеличение плотности образцов на 7 %, увеличение прочности на сжатие в водонасыщенном состоянии на 52 % и прочности на изгиб на 100 %.

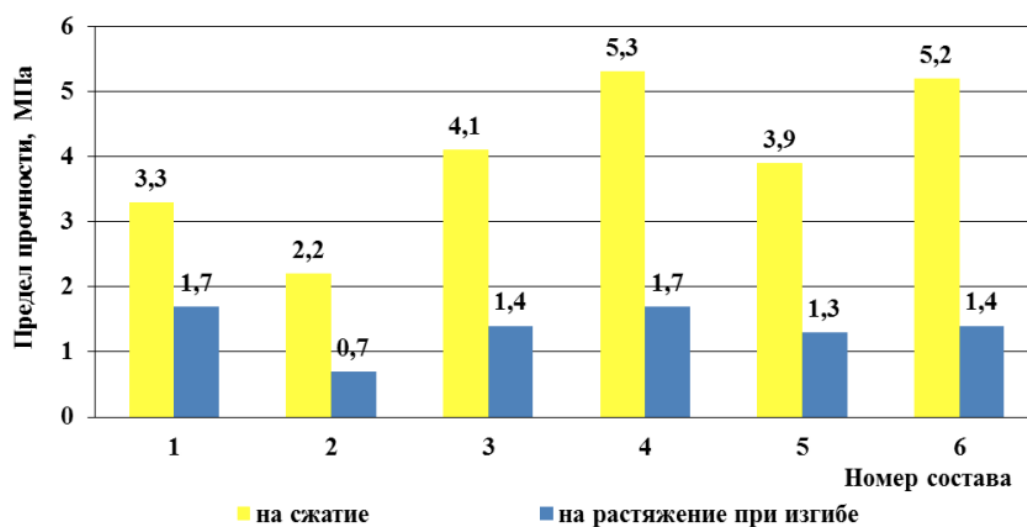
Для оценки влияния различных стабилизаторов на характеристики грунта в работе [126] были проведены испытания шести различных добавок с портландцементом в количестве, регламентированном соответствующими техническими условиями на конкретный стабилизатор. Рецепт смеси укрепленного грунта представлен в таблице 1.2, а результаты испытаний на рисунке 1.6.

Таблица 1.2 – Рецепт смеси укрепленного грунта

Стабилизирующая добавка	Массовая доля добавки	Массовая доля портландцемента
Дорзин	0,0017	6
Дорстаб	1	7
NanoStab	0,68	7
Никофлок	1	10
Дорцем	0,39	6,5
Акропол	0,13	7

По результатам испытаний видно, что наилучшие характеристики дает добавка «Никофлок», однако, это можно объяснить наибольшим расходом цемента и стабилизатора среди всех представленных составов. К примеру,

использование добавки «Акропол» позволяет достичь близких значений при заметно меньшем расходе материала.



1 – Дорзин; 2 – Дорстаб; 3 – NanoStab; 4 – Никофлок; 5 – Дорцем; 6 - Акропол

Рисунок 1.6 – Прочностные характеристики укрепленного грунта с использованием стабилизаторов [126]

Также в работе [127] проводилось сравнение стабилизирующих добавок «Nanostab», «ANT» и «Никофлок» Рецептура смесей представлена в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Рецептура смесей, укрепленных добавками «Nanostab», «ANT» и «Никофлок»

Номер состава	Стабилизирующая добавка	Содержание добавки, % от массы цемента	Содержание портландцемента, % от массы грунта
1	–	–	4
2	ANT	0,3	4
3	NanoStab	8,4	4
4	Никофлок	10	4
5	–	–	3
6	ANT	0,3	3
7	NanoStab	8,4	3
8	Никофлок	10	3

Согласно результатам испытаний, введение стабилизирующей добавки «ANT» позволяет увеличить предел прочности на сжатие на 23 %, а предел прочности на изгиб на 42 %. Добавление стабилизатора «NanoStab» увеличивает на 37 % и на 46 % предел прочности на сжатие и изгиб соответственно. Результаты испытаний представлены на рисунках 1.7 и 1.8.

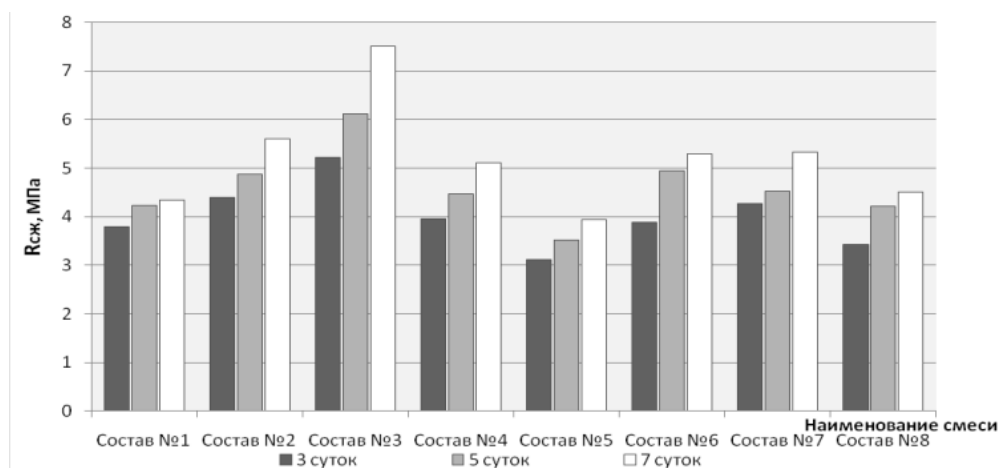


Рисунок 1.7 – Результаты определения прочности на сжатие [127]

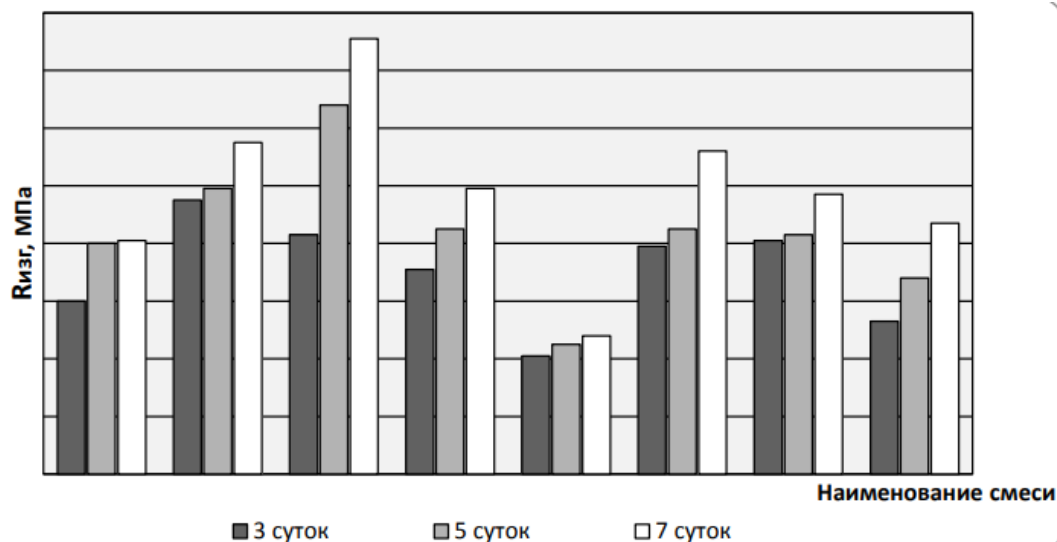


Рисунок 1.8 – Результаты определения прочности на изгиб [127]

Стоит отметить, что получившие близкие и превышающие относительно стабилизатора «Никофлок» значения по прочности добавки «NanoStab», «ANT» и «Акропол» имеют один существенный недостаток, свойственный всем стабилизаторам, поставляемым в жидкой форме. Согласно [124, 125]

после закрепления требуемого слоя грунта, дальнейшие работы по укладке вышележащих слоев можно начинать только через 48–72 ч, что повлечет за собой дополнительные издержки, связанные с простоем машин и механизмов на участке производства работ. В связи с этим стоит рассмотреть применение порошковых стабилизаторов по причине возможности выполнять дальнейшие работы сразу после уплотнения смеси [128]. Применение порошковых стабилизаторов позволит оптимизировать время на устройство подбалластных защитных слоев за счет возможности сразу после их уплотнения начать балластировку железнодорожного пути или укладку рельсошпальной решетки.

Одним из таких порошковых стабилизаторов является полимерно-минеральная композиция (далее – ПМК) «Никофлок». «Никофлок» относится к группе редиспергируемых полимерных порошков (РПП), которые придают материалам на минеральной основе большую ударную прочность, снижают хрупкость материала и увеличивают стойкость к агрессивным средам, замедляет сроки схватывания. Химический состав стабилизатора «Никофлок» представлен следующими компонентами: активированный кремнезем – 40 %, соли кальция – 15 %, соли натрия – 15 %, полимеры на основе лигнинов – 30 % [129]. Приблизительный расход добавки составляет от 4 до 10 % от массы цемента [128].

В работе [130] проводились испытания щебеночно-песчаной смеси с добавками портландцемента марки ЦЕМ И/А-П 32,5Н СС совместно с ПМК «Никофлок», а также битумной эмульсии ЭБК-3. По результатам испытаний на прочность при сжатии и водонасыщение, представленных на рисунке 1.9, видно, что применение ПМК «Никофлок» позволяет оптимизировать содержание битумной эмульсии или полностью исключить ее из рецептуры смеси без потери в прочностных характеристиках. Стоит отметить, что все полученные смеси имеют достаточно малое водопоглощение, не имеют свойства набухать от воздействия воды и имеют удовлетворительный коэффициент водостойкости. При этом свойства всех

смесей превышают требования нормативных документов [131]: по прочности в 2,2–6,2 раза, по водонасыщению в 1,44–2,17 раз, по коэффициенту водостойкости в 1,38–2 раза. Анализ результатов испытаний показывает, что применение стабилизатора «Никофлок» позволит сократить относительно исходной щебеночно-песчаной смеси с 3,5 % портландцемента и 4,2 % битумной эмульсии расход цемента на 1 % и расход битумной эмульсии на 3,2–4,2 %.

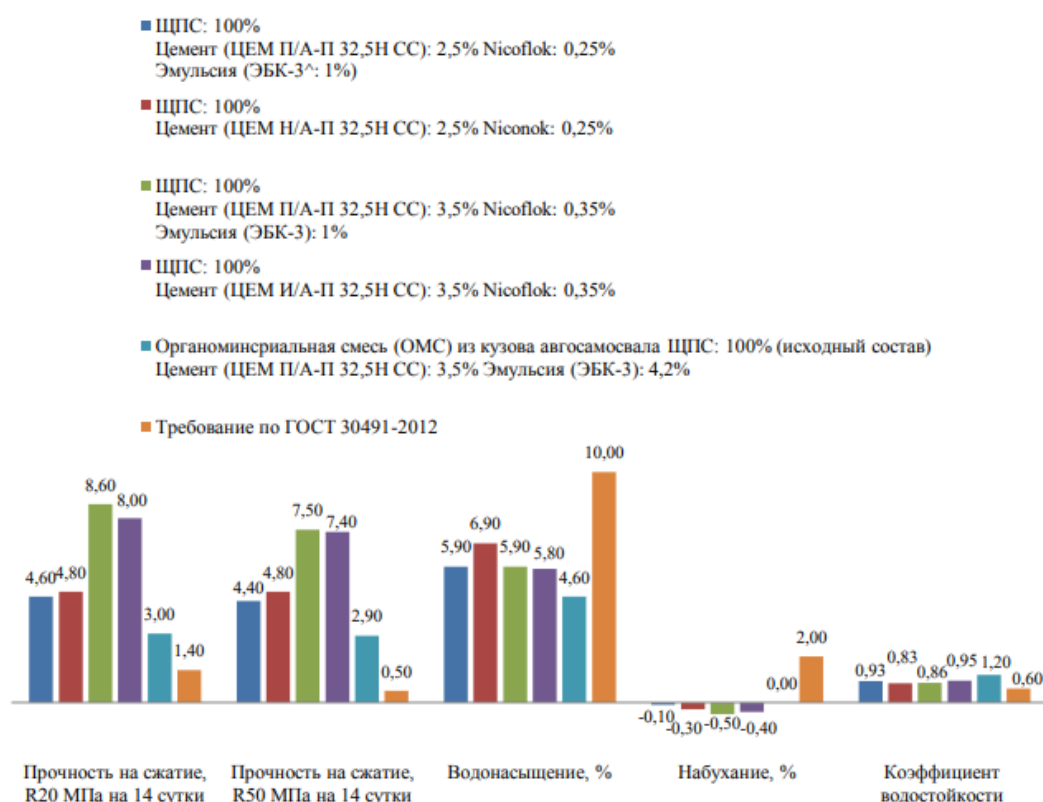


Рисунок 1.9 – Результаты испытаний по подбору рецептуры закреплённой смеси [130]

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что применение добавок к закреплённому грунту обеспечивает возможность улучшения свойств получаемой конструкции для повышения её долговечности или для оптимизации расхода основных вяжущих материалов. Применение стабилизаторов грунта уменьшает водопоглощение смеси, увеличивает коэффициент водостойкости и морозостойкости, увеличивает прочностные характеристики на сжатие и изгиб, а также уменьшает требуемый расход воды.

1.2.5 Технология устройства слоев из закрепленных грунтов

В процессе развития применения закрепления грунтов было выделено три основных технологии производства работ:

- приготовление смеси из местных или привозных грунтов в стационарных или полустационарных смесительных установках с дальнейшей ее транспортировкой на место производства работ;
- приготовление и укладка смеси на месте производства работ с применением однопроходных многороторных грунтосмесителей;
- приготовление и укладка смеси на месте производства работ с использованием многопроходных линейных машин (дорожных фрез) [60].

Каждая из приведенных технологий отличается своими достоинствами и недостатками, однако, на практике отдают предпочтение второму и третьему способу, как наиболее эффективным в части использования местных грунтов (отсутствие затрат на транспортировку).

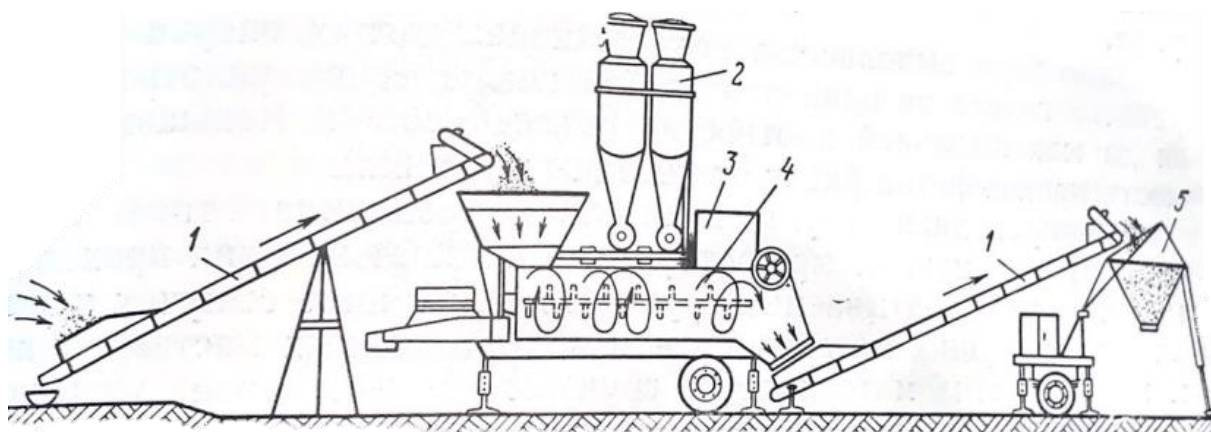
Развитие технологии приготовления смесей в специальных смесительных установках было обусловлено началом применения в качестве местных материалов для закрепления крупнообломочных грунтов и отсеков дробления горных пород с применением комплексных добавок. Смесительные установки, обычно, располагают в притрассовых карьерах. Их применение обусловлено следующим рядом преимуществ:

- размельчение и перемешивание грунта требует меньших механических затрат в сравнении с грунтом земляного полотна;
- точная дозировка вяжущих материалов и добавок;
- меньшая зависимость от условий окружающей среды;
- обеспечение заданной толщины слоя за счет дозировки объема грунта.

Наиболее эффективной считается работа смесительной установки при возможности ее быстрой сборки-разборки и перемещения к новому месту производству работ. Данное условие позволяет компенсировать затраты,

связанные с транспортировкой смеси к месту укладки (расстояние до объекта в среднем 2–4 км).

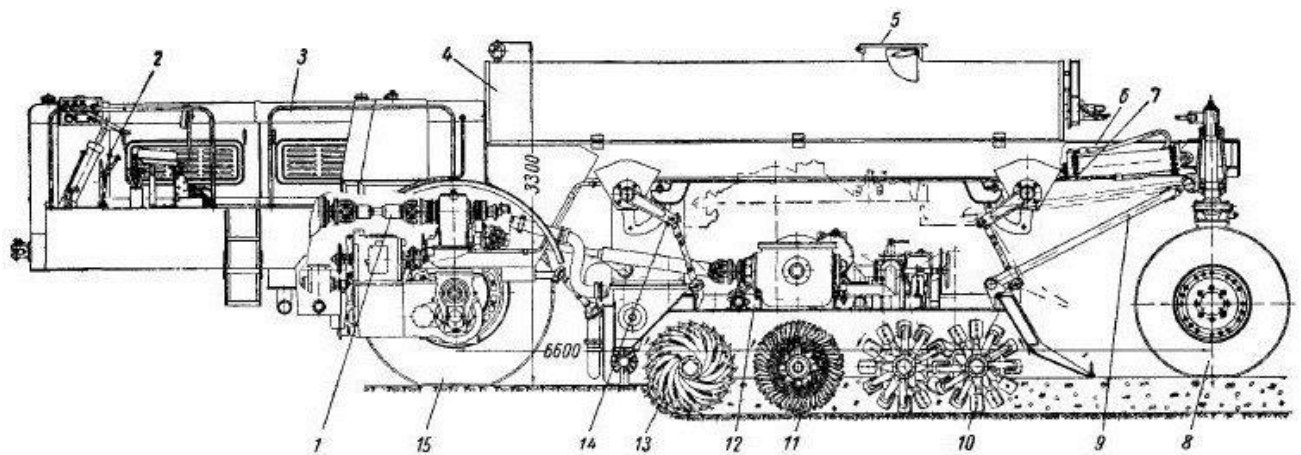
Принципиальная схема смесительной установки представлена на рисунке 1.10.



1 – транспортеры; 2 – емкости и дозаторы добавок; 3 – пульт управления; 4 – смеситель;
5 – накопительный бункер

Рисунок 1.10 – Схема смесительной установки

Наибольшую производительность обеспечивает технология производства работ с использованием однопроходных грунтосмесительных машин. Оптимизация времени работы ведущей машины обеспечивает более эффективное использование остальной технологической цепочки машин. Благодаря выполнению всех работ за одну операцию, за исключением уплотнения слоя грунта, качество получаемой смеси меньше подвержено влиянию окружающей среды. Одним из примеров грунтосмесительных машин является машина Д-391 (рисунок 1.11), которая имеет четыре ротора и за один проход измельчает грунт на глубину до 25 см, выполняет дозировку сыпучих и жидких вяжущих материалов, воды, различных добавок, а также обеспечивает равномерное перемешивание смеси, ее укладку обратно на земляное полотно и первичное уплотнение слоя. Машина работает в комплексе с подвозящими к ней материалы машинами – цементовозами, водовозами, битумовозами. Принцип работы грунтосмесительной представлен на рисунке 1.12.



- 1 – карданный вал привода рабочих органов; 2 – рычаги управления тягачом;
 3 – двигатель; 4 – цистерна; 5 – люк цистерны; 6 – основная рама; 7 – гидравлический цилиндр для подъема задней части рамы рабочих органов; 8 – задние управляемые колеса;
 9 – механизм подъема задней части рамы рабочих органов; 10 – двухвальная мешалка;
 11 – фреза с гибкими лопатками; 12 – механизм привода рабочих органов; 13 – рыхлитель с жесткими лопатками; 14 – механизм подъема передней части рабочих органов;
 15 – передние ведущие колеса

Рисунок 1.11 – Самоходная грунтосмесительная машина Д-391

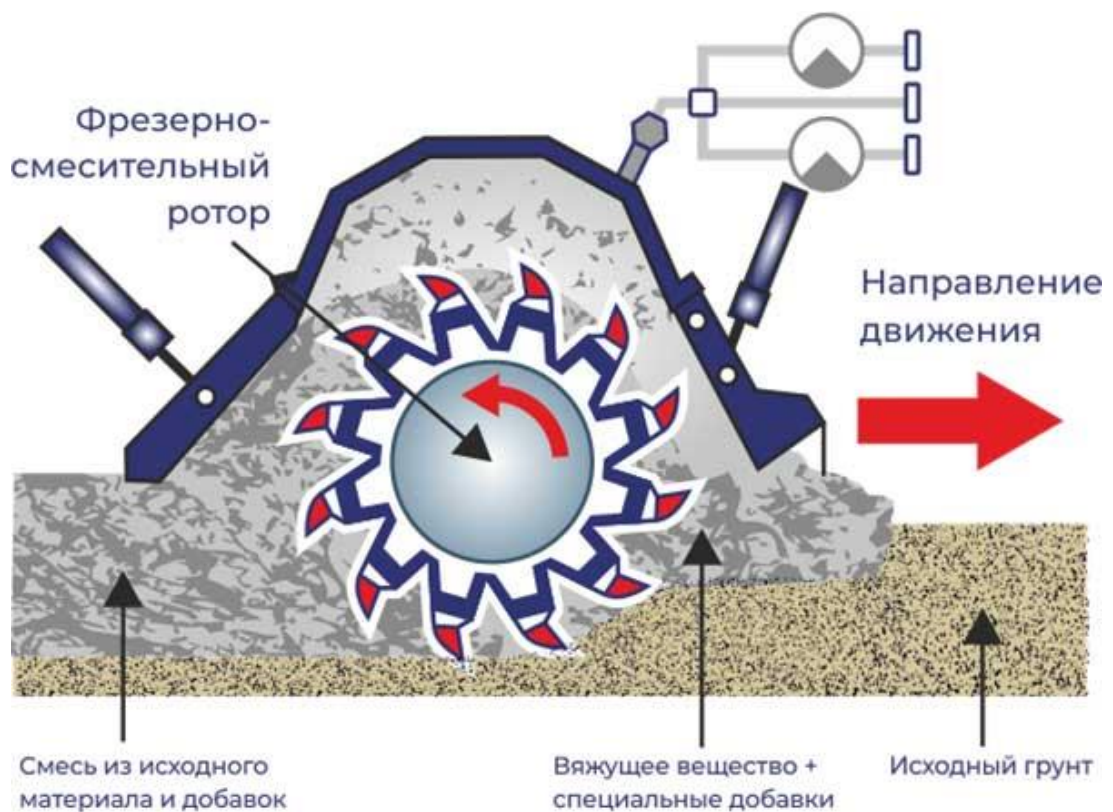


Рисунок 1.12 – Принцип работы грунтосмесительной машины

При малых объемах работ в качестве ведущей машины используют дорожные фрезы. К достоинствам их применения можно отнести невысокую стоимость проведения работ. Фреза снабжена специальными спиралевидными лопатками, кирковщиком для разработки плотных грунтов и битумным насосом для дозировки вяжущих материалов. Главным недостатком данной технологии является невозможность устройства грунтоцементного слоя за один рабочий проход машины, что провоцирует простои вспомогательных машин (катки, автогрейдеры, распределители вяжущих материалов) [64].

Технологическая цепочка при устройстве слоя закрепленного грунта выглядит следующим образом (рисунок 1.13) [60, 65]:

а) грунтосмесительная машина размельчает грунт с одновременной непрерывной дозировкой вяжущими материалами и добавками;

б) смесь грунта с добавлением вяжущих материалов и других компонентов смешивается с водой из бака грунтосмесительной машины и укладывается ровным слоем;

в) готовый слой сразу после укладки уплотняют катками до максимальной плотности;

г) при необходимости, поверхность грунта разравнивается автогрейдером и повторно уплотняется катками;

д) после окончательного уплотнения проводят дальнейшие работы в необходимых объемах (укладка верхних слоев грунтов, рельсошпальной решетки и т.д.).



Рисунок 1.13 – Технологическая схема устройства закреплённого слоя

В связи с большими объемами укладки, ПЗС и необходимостью обеспечения высокой производительности в технологические «окна» наиболее перспективной технологией для усиления основной площадки земляного полотна железнодорожного пути является технология с применением однопроходных грунтосмесительных машин (ресайклеров).

1.3 Выводы по разделу 1

По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1) Устройство ПЗС из ЩПГС является эффективным решением для повышения несущей способности основной площадки земляного полотна, однако, применение этой конструкции сдерживается такими факторами, как низкий темп производства работ, высокая стоимость эксплуатации машин по сооружению ПЗС и их малый парк, необходимость вырезки исходного грунта земляного полотна на глубину до 1 м для замены его на ЩПГС.

На участках пути с низкими модулями деформации для уменьшения толщины ПЗС до 2 раз применяют его армирование плоскими и объемными георешетками, но это все равно не исключает операции вырезки исходного грунта.

2) Перспективным решением для минимизации необходимой вырезки исходного грунта является применение в качестве материала для ПЗС

накопленной толщии старогодных балластных материалов, однако, по результатам проведенных испытаний [98], данный материал для особогрузонапряженных и скоростных линий не может обеспечить требуемые деформативные характеристики. Повышения деформативных характеристик местных материалов можно достичь их закреплением вяжущими материалами.

3) При выборе вяжущего для закрепления старогодных балластных материалов необходимо учитывать, следующее:

- влажность, плотность, гранулометрический и петрографический состав оказывают большое влияние на прочностные характеристики грунта при его закреплении;

- оценку свойств получаемой смеси необходимо проводить не только по прочности на сжатие, но и по прочности на изгиб или раскол;

- при необходимости повысить прочностные характеристики грунтов, а также показатели водостойкости, и морозостойкости и трещиностойкости, целесообразно применять полимерные добавки для цементогрунтовых смесей – стабилизаторы грунта;

- наиболее перспективной технологией усиления основной площадки земляного полотна с применением вяжущих является использование однопроходных грунтосмесительных машин.

С учетом приведенных выводов, перспективным является исследование возможности создания ПЗС для усиления основной площадки земляного полотна из накопленной толщии старогодных балластных материалов с требуемыми прочностными и деформационными характеристиками путем его закрепления вяжущими и полимерными добавками, а также оценка эффективности данного решения.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- провести подбор вяжущих и добавок для материала ПЗС из старогодных балластных материалов;

- провести стендовые лабораторные испытания модели ПЗС для подтверждения обеспечения требуемого модуля деформации;
- провести укладку ПЗС по предлагаемой технологии и первичные испытания для оценки получаемых деформативных характеристик слоя;
- разработать требования к ПЗС из старогодных балластных материалов, обработанных вяжущим;
- оценить экономическую эффективность предлагаемой технологии на основании анализа затрат труда, машин и материалов необходимых для производства работ.

2 Лабораторные испытания материала подбалластного защитного слоя

2.1 Постановка задачи эксперимента

Задачей проведения лабораторных испытаний является создание материала и конструкции ПЗС из старогодних балластных материалов, обеспечивающих требуемые характеристики по деформативности для особогрузонапряженных и скоростных линий, а именно значения модуля деформации по верху ПЗС не менее 80 МПа [11]. Согласно исследований [98], проведенных при типичном для эксплуатируемого пути ОАО «РЖД» модуле деформации в уровне основной площадки $E_{оп} = 30$ МПа, при устройстве ПЗС из старогодних балластных материалов, максимальное значение модуля деформации по верху защитного слоя удавалось достичь не выше значения 55 МПа. В данной работе поставлена задача за счет закрепления этого материала вяжущими добиться повышения модуля до нормативной величины не менее 80 МПа при толщине защитного слоя по технологическим условиям не более 30 см.

Исходя из поставленной задачи, можно назначить критерии деформационных и прочностных свойств материала ПЗС из старогоднего балласта, обработанного добавками портландцемента и полимерным стабилизатором, которые необходимо достичь в лабораторных испытаниях.

Согласно [132] на железных дорогах Германии модуль деформации материала для устройства ПЗС E составляет от 150 до 200 МПа, а помимо этого, в [133] приведено минимальное значение прочности на сжатие R_c , которое должно составлять не менее 1,0 МПа. Эти два параметра были взяты в данном исследовании за целевые при подборе материала ПЗС из старогоднего балласта с добавками.

Для оптимизации объема проводимых испытаний, они были разбиты на несколько этапов.

На первом предварительном этапе проводилось определение гранулометрического состава исходной смеси. Гранулометрический состав проверялся на соответствие требованиям Инструкции [11]. В случае, если он не удовлетворял поставленным требованиям, назначалась его модификация.

Для материала ПЗС с подобранным гранулометрическим составом определялась оптимальная влажность и максимальная плотность. При приведении гранулометрического состава смеси к нормативному, необходимо было определить модуль деформации незакрепленного материала ПЗС. Если модуль деформации материала ПЗС больше или равен 150 МПа, его закрепление не требуется. Если же значение модуля деформации материала окажется меньше 150 МПа, выполнялись испытания по подбору содержания портландцемента.

Исходя из исследований [59, 127], в качестве вяжущего материала был взят портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н Д0, а в качестве полимерного стабилизатора – добавка «Никофлок».

Подбор содержания портландцемента проводился по описанным выше критериям, а именно обеспечение модуля деформации материала ПЗС не менее 150 МПа и прочности на сжатие не менее 1,0 МПа.

При подборе количества портландцемента принято 3 варианта с варьированием его в материале ПЗС в пределах от 2 до 4 % от массы грунта. Для каждого состава было проведено две серии испытаний: в водонасыщенном и неводонасыщенном состоянии, имитируя укладку ПЗС в сухом и водонасыщенном состоянии.

В случае отрицательных результатах испытаний процентное содержание портландцемента увеличивалось с шагом в 1 % и с повторением испытания.

При удовлетворении свойств материала ПЗС приведенным критериям переходили к этапу по определению процентного содержания полимерного стабилизатора.

Подбор процентного содержания полимерного стабилизатора проводился его варьированием в пределах от 5 до 10 % от массы цемента в

материале ПЗС. Для оценки влияния полимерного стабилизатора на свойства материала ПЗС, дополнительно изготавливалась контрольная партия образцов без содержания полимерного стабилизатора. Оценка влияния полимерного стабилизатора включала в себя сравнение серий образцов с различным содержанием полимерного стабилизатора с контрольными по следующим параметрам:

- модуль деформации материала;
- прочность на сжатие в сухом и водонасыщенном состоянии;
- прочность на растяжение при расколе;
- водопоглощение и коэффициент водостойкости;
- темп набора материалом прочности;
- коэффициент жесткости.

С учетом необходимости оценки прочности образца в проектном возрасте 28 суток, а также определения темпов набора прочности, образцы на сжатие испытывались в возрасте 7, 14, 28 суток.

Влияние полимерного стабилизатора на трещиностойкость и долговечность материала ПЗС было оценено по прочности на растяжение при расколе и прочности на сжатие в водонасыщенном состоянии. В связи со сравнительным характером выделенных показателей, для сокращения общего количества испытаний был выбран один возраст образцов – 7 суток.

Дополнительно при обработке результатов испытаний находились параметры водопоглощения и коэффициент жесткости, представляющий собой отношение прочности на сжатие к прочности на растяжение при расколе, которые характеризовали хрупкость материала.

Окончательный состав добавок портландцемента и полимерных стабилизаторов выбирался, исходя из критериев обеспечения, требуемых модуля деформации и прочности на сжатие, а также технико-экономического сравнения (получение заданных свойств с наименьшими затратами материалов).

На выбранном составе добавок проводилась сборка модели ПЗС с заданной толщиной на основании с модулем деформации 30 МПа, что характерно для реальных условий на уровне основной площадки земляного полотна, имеющем место на эксплуатируемом пути.

Для проведения сравнения по модулю деформации по верху ПЗС собирались два вида моделей: один с закреплением только цементом и второй с добавками полимеров. При этом штамповые испытания на закрепленных с полимером моделях было принято проводить трижды: в возрасте 0, 3 и 7 суток.

Материал и конструкция ПЗС считались окончательно подобранными при условии обеспечения модуля деформации по верху ПЗС E_{v2} на 7 сутки не менее 80 МПа.

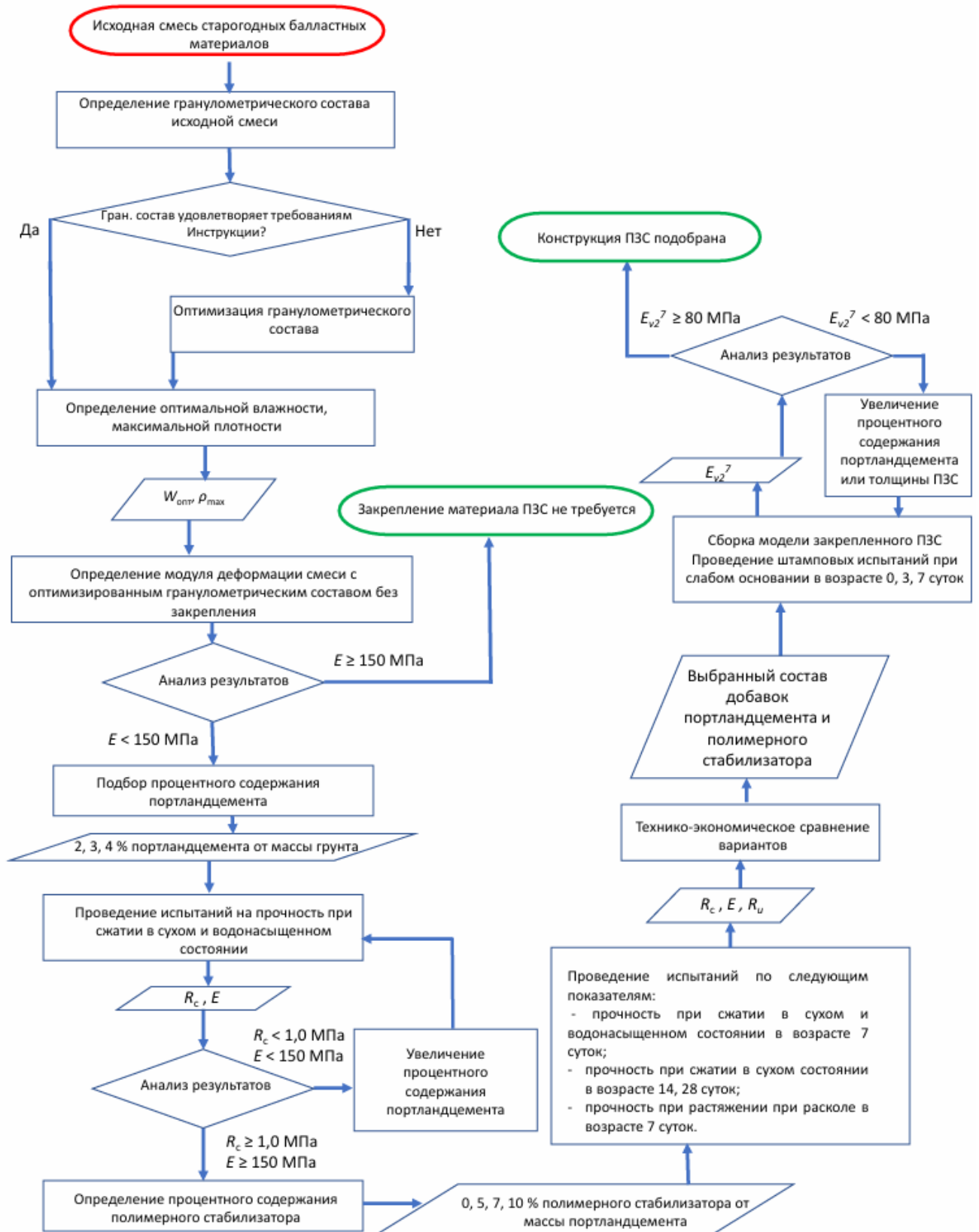
Последовательность проведения работ по подбору состава материала ПЗС представлена в таблице 2.1, а алгоритм на рисунке 2.1.

Таблица 2.1 – Последовательность проведения исследований

Показатель	Варьируемые параметры	Количество образцов на один состав	Критерий выбора для следующего этапа
Этап № 1 – Определение показателей исходной смеси			
Гранулометрический состав	–	Объединенная проба	–
Этап № 2 (при необходимости) – Модификация гранулометрического состава			
Гранулометрический состав	Процентное содержание фракций	Объединенная проба	Соответствие гранулометрического состава требованиям [11]
Оптимальная влажность, максимальная плотность модифицированной смеси	Процентное содержание воды	1	Максимальное значение плотности
Модуль деформации незакрепленного материала ПЗС	–	3	$E < 150 \text{ МПа}^*$
Этап № 3– Определение процентного содержания портландцемента			
Прочность на сжатие в возрасте 7 суток		3	$R_c \geq 1,0 \text{ МПа}$

Показатель	Варьируемые параметры	Количество образцов на один состав	Критерий выбора для следующего этапа
Прочность на сжатие в водонасыщенном состоянии в возрасте 7 суток	Процентное содержание портландцемента (2, 3, 4 % от массы грунта)	3	$E \geq 150$ МПа
Модуль деформации в возрасте 7 суток		3	
Модуль деформации в водонасыщенном состоянии в возрасте 7 суток	Процентное содержание портландцемента (2, 3, 4 % от массы грунта)	3	$E \geq 150$ МПа
Этап № 4 – Определение процентного содержания полимерного стабилизатора			
Прочность на сжатие в возрасте 7, 14, 28 суток	Процентное содержание полимерного стабилизатора (0, 5, 7, 10 % от массы портландцемента)	9	Технико-экономическое сравнение результатов испытаний
Прочность на растяжение при расколе в возрасте 7 суток		3	
Модуль деформации в возрасте 7, 14, 28 суток		9	
Модуль деформации в водонасыщенном состоянии в возрасте 7 суток		3	
Этап № 5 – Определение модуля деформации по верху ПЗС			
Штамповые испытания незакрепленной модели с модифицированным гранулометрическим составом исходной смеси на основании с модулем деформации 30 МПа	—	3	—**

Показатель	Варьируемые параметры	Количество образцов на один состав	Критерий выбора для следующего этапа
Штамповые испытания закрепленной модели с модифицированным гранулометрическим составом исходной смеси в возрасте 0, 3, 7 суток на основании с модулем деформации 30 МПа	—	1	$E_{v2} \geq 80$ МПа
* – при значении модуля деформации материала ПЗС больше или равно 150 МПа, применение технологии закрепления грунтов не требуется ввиду обеспечения требований к материалу ПЗС [132]; ** – проводится для сравнения с закрепленной моделью.			



R_c – прочность на сжатие; МПа, E – модуль деформации, МПа; $R_{\text{и}}$ – прочность на растяжение при расколе; E_{v2}^7 – модуль деформации по верху ПЗС на 7 суток

Рисунок 2.1 – Алгоритм подбора состава материала ПЗС

2.2 Подбор состава вяжущих материалов и полимерных добавок

2.2.1 Модификация гранулометрического состава исходной смеси

В качестве материала старогодного балласта была взята смесь с опытного полигона ООО «КБ «Тулажелдормаш», приготовленная из продуктов от вырезки старого балласта щебнеочистительными комплексами. На объединенной пробе старогодного балласта был определен гранулометрический состав, который представлен на рисунке 2.2.

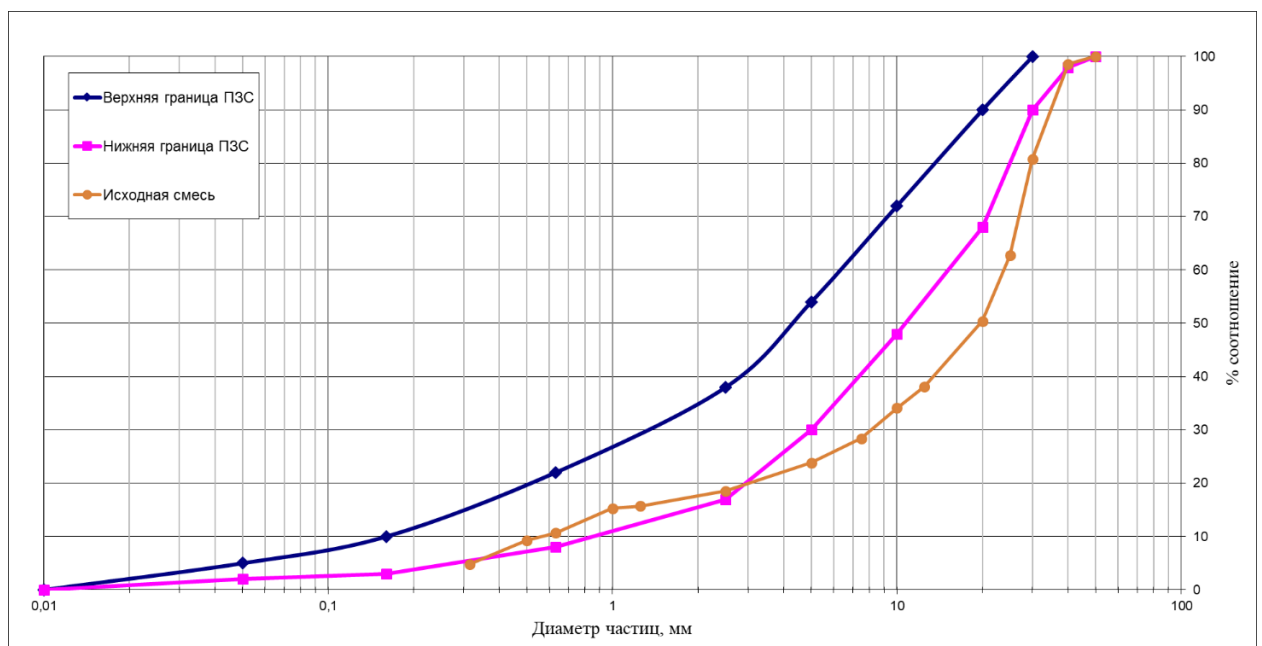


Рисунок 2.2 – Гранулометрический состав исходной смеси

По анализу гранулометрического состава исходной смеси видно его несоответствие требованиям Инструкции [11] ввиду недостатка фракций размером от 5 до 20 мм.

Помимо этого, в гранулометрическом составе исходной смеси присутствуют фракции частиц с размером от 30 мм и более, которые в соответствии с ГОСТ 7392 [134] входят в состав щебня I категории, соответственно, могут повторно использоваться в материале балластной призмы.

В связи с вышеизложенным было принято решение отсеять фракции частиц крупнее 30 мм и провести испытания по подбору состава добавок портландцемента и полимерного стабилизатора именно на нем.

Гранулометрический состав проверялся на соответствие требованиям Инструкции [11], таких как виброустойчивость, непучинистость и отсутствие суффозии материала защитного слоя между щебнем и грунтом земляного полотна.

Модифицированный гранулометрический состав представлен в таблице 2.2 и на рисунке 2.3.

Таблица 2.2 – Гранулометрический состав модифицированной смеси

Диаметр частиц	Частиц по массе, %
25	9
20	15
12,5	20
10	14
5	15
2,5	7
1,25	4
1	4
0,63	3
0,5	3
0,315	2
0,16	2
<0,16	2
Всего:	100

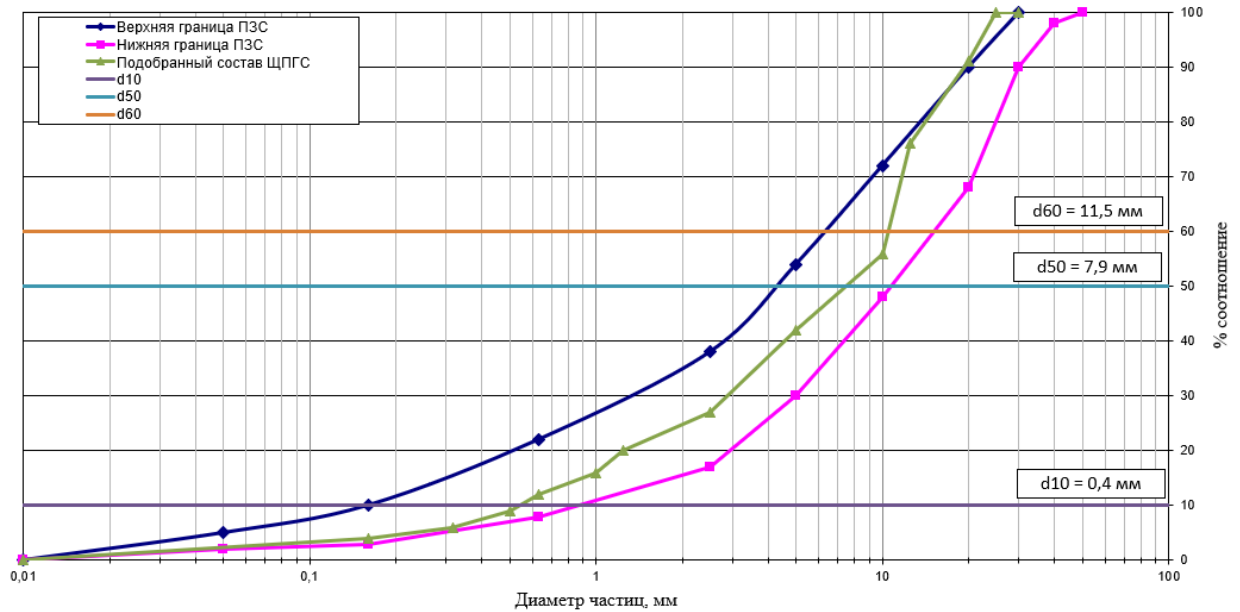


Рисунок 2.3 – Модифицированный гранулометрический состав исходной смеси

Из рисунка 2.4 видно, что данный состав практически соответствует требованиям Инструкции [11].

Необходимая виброустойчивость определяется показателем неоднородности материала ПЗС C_u и рассчитывается по формуле

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \geq 7, \quad (2.1)$$

где d_{60} – диаметр частиц, меньше которых по массе в ПЗС содержится 60 %, мм;

d_{10} – диаметр частиц, меньше которых по массе в ПЗС содержится 10 %, мм.

Проверка отсутствия суффозии частиц балласта, диаметр частиц, меньше которых в ПЗС содержится 50 % по массе (d_{50}), должен быть не менее 4 мм.

Также для непучинистости грунта количество частиц размером менее 0,1 мм должно быть менее 10 %.

Для определения d_{60} , d_{10} , d_{50} проведем соответствующие линии на графике гранулометрического состава (рисунок 2.3).

По графику получаем следующие значения:

$$d_{60} = 11,5 \text{ мм};$$

$$d_{10} = 0,4 \text{ мм};$$

$$d_{50} = 7,9 \text{ мм}.$$

По формуле (2.1) рассчитаем коэффициент неоднородности C_u :

$$C_u = \frac{11,5}{0,4} = 28,75 > 7.$$

По результатам расчетов получившийся коэффициент неоднородности удовлетворяет требованиям Инструкции [11].

Также выполняются условия по отсутствию суффозии частиц балласта ($d_{50} = 7,9 \text{ мм} > 4 \text{ мм}$) и недопущению деформаций морозного пучения (частиц размером менее 0,1 мм по массе менее 2 %).

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что модифицированная смесь соответствует требованиям Инструкции [11] за исключением верхней части гранулометрической кривой, что связано с отсевом фракций крупнее 30 мм.

В соответствии с приведенными в подразделе 2.1 последовательностью и алгоритму проведения испытаний необходимо определить ее модуль деформации в исходном состоянии и сравнить с нормативным [132] для принятия решения о необходимости ее закрепления.

Для решения поставленной задачи необходимо было собрать модель ПЗС в виде цилиндра толщиной 30 см с модифицированным гранулометрическим составом исходной смеси. Диаметр образца был выбран равным, исходя из условий обеспечения не менее 3 диаметров штампа, равного 300 мм, для недопущения влияния стенок трубы на результаты испытаний, и составил 900 мм. В качестве обоймы образца была принята стальная труба с внутренним диаметром 900 мм и толщиной стенок 4 мм.

Перед началом сборки модели необходимо было определить оптимальную влажность и максимальную плотность материала ПЗС.

Для определения оптимальной влажности отбирались пробы грунта массой (1300 ± 50) г, высушивались до постоянной массы при температуре (105 ± 2) °С, после чего в материал добавлялось определенное количество воды, начиная с 2 % от массы материалы. Проба грунта перемешивалась с водой до однородной массы и уплотнялась в форме ЛО-257 при нагрузке 24 т в течение 3 минут в соответствии с стандартизированной методикой [131]. После уплотнения образец выпрессовывался из формы, замерялся его диаметр, высота и масса. Плотность полученного образца вычислялась по формуле

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2.2)$$

где m – масса образца, г;

V – объем образца, см³.

В целях оптимизации операции сушки материала определялась фактическая влажность материала и далее он увлажнялся для дальнейших испытаний, начиная от полученного значения. Для определения фактической влажности материала ПЗС было взято 4 пробы массой (1300 ± 50) г и высушены до постоянной массы при температуре (105 ± 2) °С. Результаты испытаний приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты определения фактической влажности

№ пробы	Масса пробы начальная, г	Масса пробы конечная, г	Влажность, %	Средняя влажность, %
1	1293,4	1261,1	0,41	0,42
2	1293,4	1254,4	0,48	
3	1300,0	1254,5	0,40	
4	1306,4	1247,6	0,39	

После определения фактической влажности, имеющиеся пробы грунта, высушенные до конечной массы, были перемешаны с водой в количестве 2 %, 2,5 %, 3% и 3,5 % от массы грунта для определения ее оптимального значения.

Результаты испытаний представлены в таблице 2.4 По результатам испытаний был построен график уплотнения смеси (рисунок 2.4).

Таблица 2.4 – Результаты испытаний по определению максимальной плотности и оптимальной влажности смеси

№ пробы	Влажность пробы, %	Диаметр образца, мм	Масса образца, г	Высота образца, мм	Объем образца, мм ³	Плотность образца, г/см ³
1	2,0	101,1	1312,7	74,5	596,88	2,19
2	2,5	101,0	1319,2	72,5	592,07	2,23
3	3,0	100,9	1328,3	71,8	583,23	2,28
4	3,5	101,1	1340,7	74,7	598,49	2,24

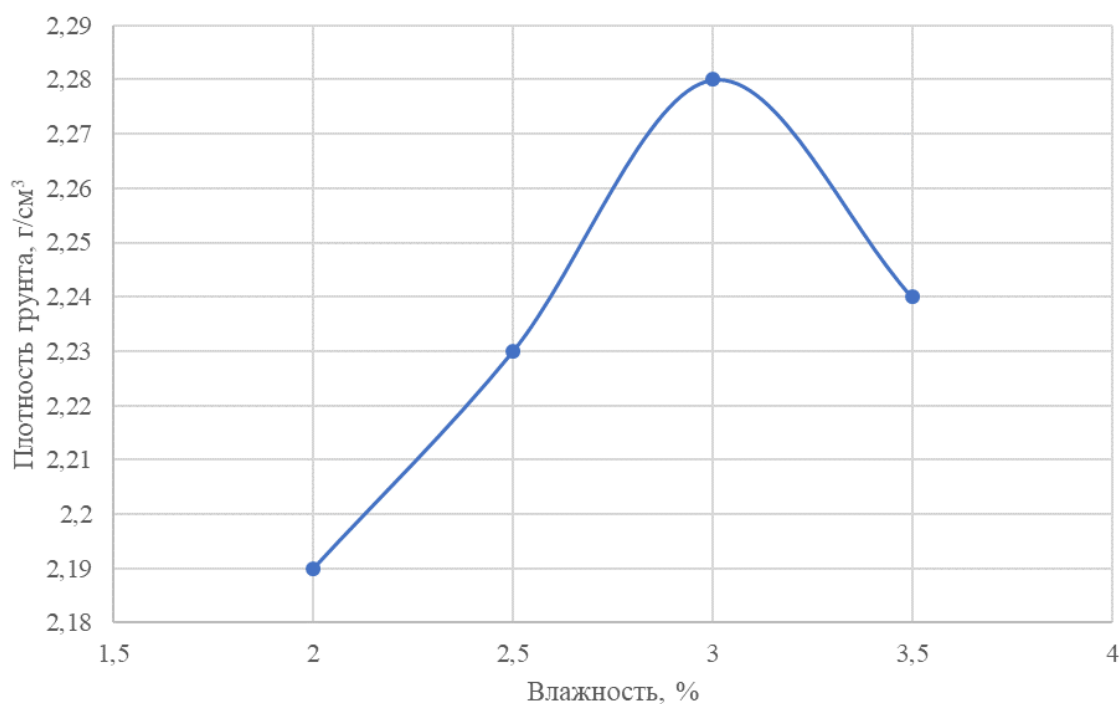


Рисунок 2.4 – График уплотнения грунта

Из рисунка 2.4 видно, что максимальная плотность смеси составляет 2,28 г/см³ при влажности в 3,0 %. Данные значения были приняты для сборки модели ПЗС.

Перед началом сборки на дно обоймы образца укладывался лист фанеры толщиной 10 мм. С учетом того, что по ранее проведенным испытаниям [98] модуль упругости листа фанеры составил 167 МПа, результаты штамповых

испытаний смеси на данном основании позволят оценить модуль деформации самой испытываемой смеси.

На стенки обоймы были нанесены риски начиная с поверхности листа фанеры с шагом в 5 см. Предварительно взвешенный грунт укладывался в обойму слоем приблизительно 8–10 см и уплотнялся 10 проходами виброплиты с дальнейшим доуплотнением отбойным молотком с трамбовочной насадкой. Контроль качества уплотнения производился путем сравнения плотности грунта в модели с плотностью элементарных образцов.

На уплотненную поверхность модели по центру устанавливался круглый штамп диаметром 300 мм. При необходимости поверхность под штампом выравнивалась слоем песка толщиной около 1 см.

К штампу присоединялась реперная установка с закрепленным индикатором часового типа ИЧ-25. Нагрузку на штамп прикладывали с помощью гидроцилиндра, установленного центрально относительно оси штампа. Перемещение штампа контролировалось датчиком перемещения, установленным на гидроцилиндре испытательной машины и с помощью индикатора часового типа. Общий вид модели ПЗС представлен на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 Вид собранной модели

Штамповые испытания выполнялись по методике, изложенной в Инструкции (Приложение В) [11]. Нагрузку на штамп прикладывали в пять ступеней с интервалом равным 0,1 МПа до достижения нагрузки 0,5 МПа. После достижения определенной ступени, нагрузку выдерживали постоянной на протяжении 1 мин. На каждой ступени фиксировали перемещение штампа. При достижении и выдержки нагрузки 0,5 МПа, производили разгрузку штампа в три ступени: до 50 %, 25 % от максимальной нагрузки и полную разгрузку. После разгрузки модель также выдерживалась 1 мин, после чего проводилось второе нагружение в четыре ступени с интервалом 0,1 МПа до достижения нагрузки 0,4 МПа.

После проведения испытания определялся модуль деформации, E_{vi} , МПа, отдельно для первой и второй ветви нагружения по формуле

$$E_{vi} = 1,5r \frac{1}{a_1 + a_2 \cdot \sigma_{imax}}, \quad (2.3)$$

где r – радиус штампа, мм;

σ_{imax} – максимальное среднее нормальное напряжение первичного или вторичного нагружения, МПа;

i – номер нагружения;

a_1 и a_2 – константы многочлена второй степени.

Результаты штамповых испытаний представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты штамповых испытаний модели с модифицированным гранулометрическим составом исходной смеси

№ модели	Плотность модели, г/см ³	E_{v1} , МПа	E_{v2} , МПа	E_{v2}/E_{v1}
1	2,19	73,46	74,50	1,01
2	2,21	78,36	77,19	0,99
3	2,21	81,35	77,05	0,95
Среднее значение	2,20	77,72	76,24	–

По результатам штамповых испытаний средний модуль деформации смеси по второй ветви нагружения составил 76,24 МПа, в связи с чем добиться модуля деформации по верху ПЗС из данного материала не представляется возможным, следовательно, применение вяжущих материалов для повышения прочностных и деформативных свойств материала является необходимым для его применения в конструкции ПЗС.

2.2.2 Определение процентного содержания портландцемента и полимерного стабилизатора

Подбор содержания добавок выполнялся путем изготовления элементарных образцов цилиндрической формы. Изготовление образцов осуществлялось запрессовкой пробы грунта с предварительным вибрационным воздействием, в форму ЛО-257 по ГОСТ 12801 [135], имеющую диаметр 101 мм и высоту 180 мм и предназначенную для испытаний закрепленных крупнообломочных грунтов (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Форма ЛО-257

Первоначально выполнялся подбор процентного содержания цемента. Для этого изготавливались элементарные стандартные [131] образцы, представляющие собой цилиндр высотой 60 мм и диаметром 101 мм. Материал ПЗС для образцов перемешивался с портландцементом марки ЦЕМ I 42,5Н Д0 в количестве 2, 3, 4 % от массы грунта и с водой до достижения оптимальной влажности. Далее, полученную смесь укладывали в форму, где подвергали вибрационному воздействию на вибростоле в течение 10–15 секунд для лучшего заполнения пустот, после чего, аналогично предыдущему этапу уплотняли на прессе статической нагрузкой 24 т в течение 3 минут. Суммарно было изготовлено 18 образцов – по 6 на каждое процентное содержание портландцемента. Образцы выдерживались для набора прочности в течение 7 суток. На седьмые сутки по 3 образца каждого состава (процентного содержания цемента) испытывали на сжатие по методике ГОСТ 10180 [136], а оставшиеся 3 помещали в воду до полного водонасыщения и аналогично испытывали на сжатие.

Также, для расчета модуля деформации материала ПЗС, при проведении испытаний фиксировались значения нагрузки и перемещения образца. Модуль деформации рассчитывался по формуле

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (2.4)$$

где $\Delta\sigma$ – интервал напряжений, на котором вычисляют модуль деформации, за который принимается от 30 до 70 % от разрушающего напряжения;

$\Delta\varepsilon$ – деформации образца, соответствующие интервалу $\Delta\sigma$.

Вид образца при испытаниях на сжатие представлен на рисунках 2.7, 2.8. Результаты испытаний представлены на рисунках 2.9–2.11.



Рисунок 2.7 – Вид образца при испытаниях на сжатие



Рисунок 2.8 – Вид образца после испытаний

Результаты испытаний приведены на рисунках 2.9–2.11.

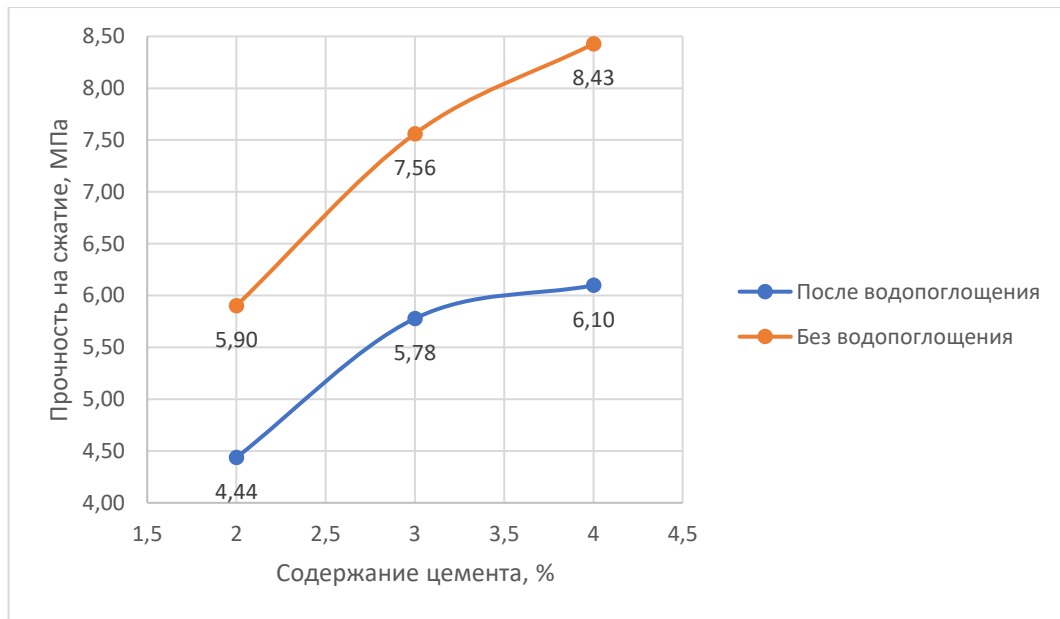


Рисунок 2.9 – Зависимость прочности на сжатие от процентного содержания цемента при модифицированном гранулометрическом составе исходной смеси

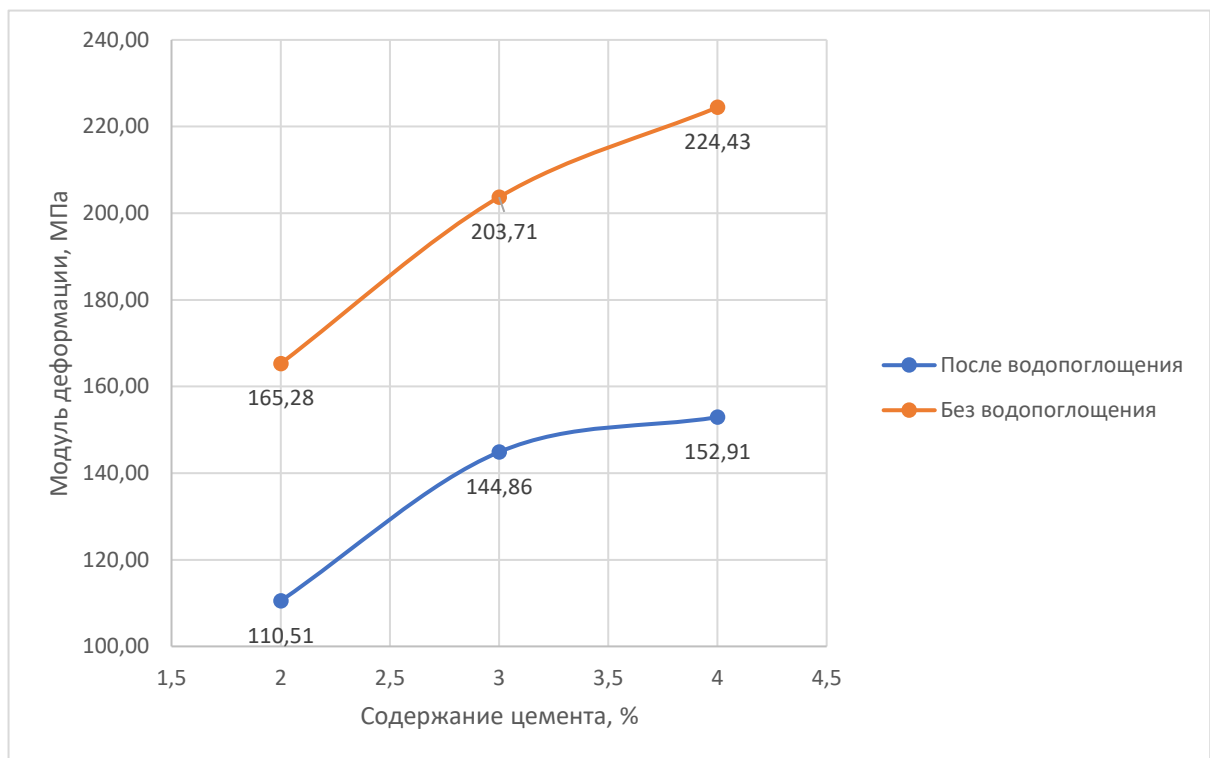


Рисунок 2.10 – Зависимость модуля деформации от процентного содержания цемента при модифицированном гранулометрическом составе исходной смеси

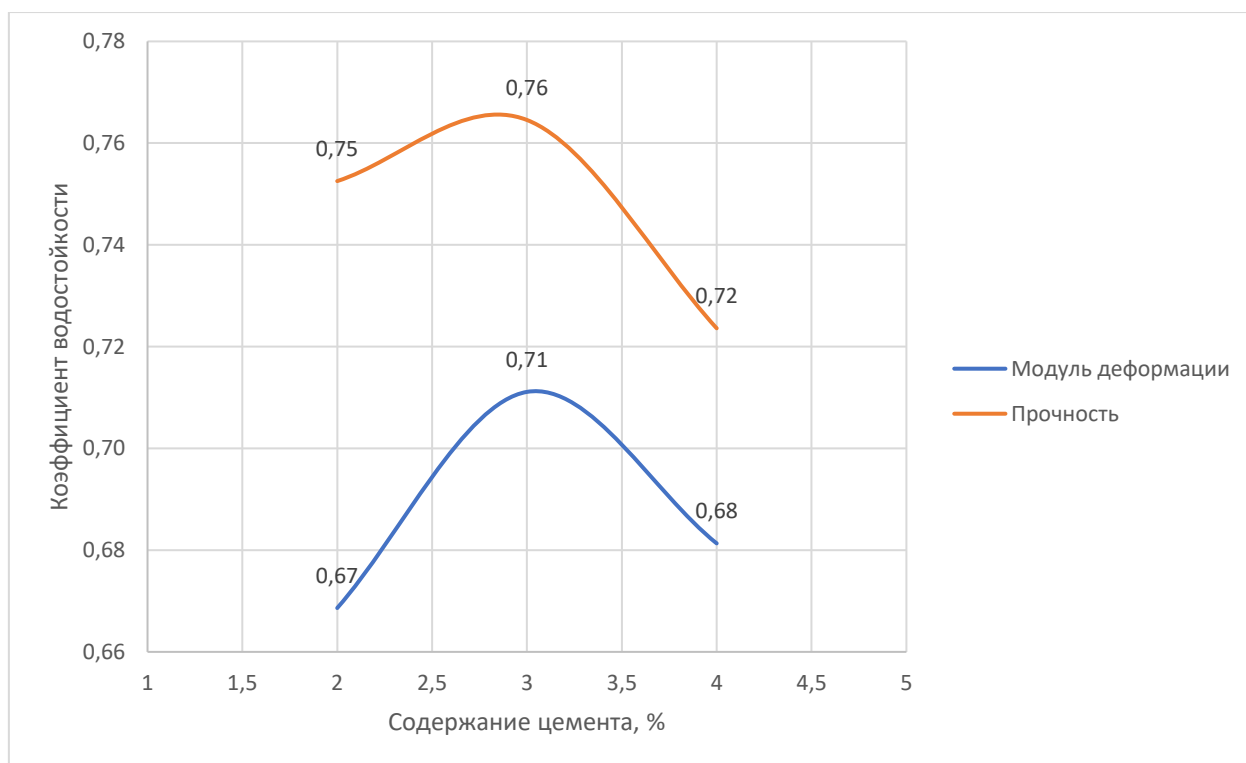


Рисунок 2.11 – Зависимость коэффициента водостойкости от процентного содержания цемента при модифицированном гранулометрическом составе исходной смеси

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 согласно [132], 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, с учетом данных, полученных в работах [126, 127], была выдвинута гипотеза, что применение полимерного стабилизатора должно привести модуль деформации смеси к нормативному.

Для исследования влияния стабилизатора на характеристики материала ПЗС изготавливались аналогичные образцы с подобранным составом цемента, а также с 5, 7 и 10 % содержания ПМК «Никофлок» от общей массы цемента (0,15, 0,21, 0,3 % от массы грунта) и испытывали по программе, представленной в таблице 2.1.

Для проверки выдвинутой гипотезы, а также определения рационального процентного содержания полимерного стабилизатора, были изготовлены несколько серий образцов с различным содержанием стабилизатора и определенным ранее содержанием портландцемента, а также контрольная серия образцов, содержащая только портландцемент.

Для комплексного сравнения свойств полученных материалов с учетом известного опыта [126, 127] были выбраны следующие показатели в соответствии с таблицей 2.1:

- модуль деформации материала;
- темп набора материалом прочности;
- водопоглощение и коэффициент водостойкости;
- прочность на сжатие в сухом и водонасыщенном состоянии;
- прочность на растяжение при расколе;
- коэффициент жесткости.

Показатели модуля деформации материала и прочности аналогично ранее проведенным исследованиям остаются основными критериями для выбора состава добавок.

Показатели коэффициента водостойкости, водопоглощения, прочности на растяжение при расколе и коэффициента жесткости являлись дополнительными критериями, обеспечивающими долговечность и трещиностойкость материала.

Для определения прочности материала, его модуля деформации, а также темпов набора прочности было изготовлено 36 образцов для испытаний на сжатие – 27 образца с добавкой «Никофлок» и 9 контрольных, содержащий только 3 % портландцемента. Образцы были испытаны на сжатие в возрасте 7, 14 и 28 суток. Результаты испытаний приведены на рисунке 2.12 и в таблице 2.6.

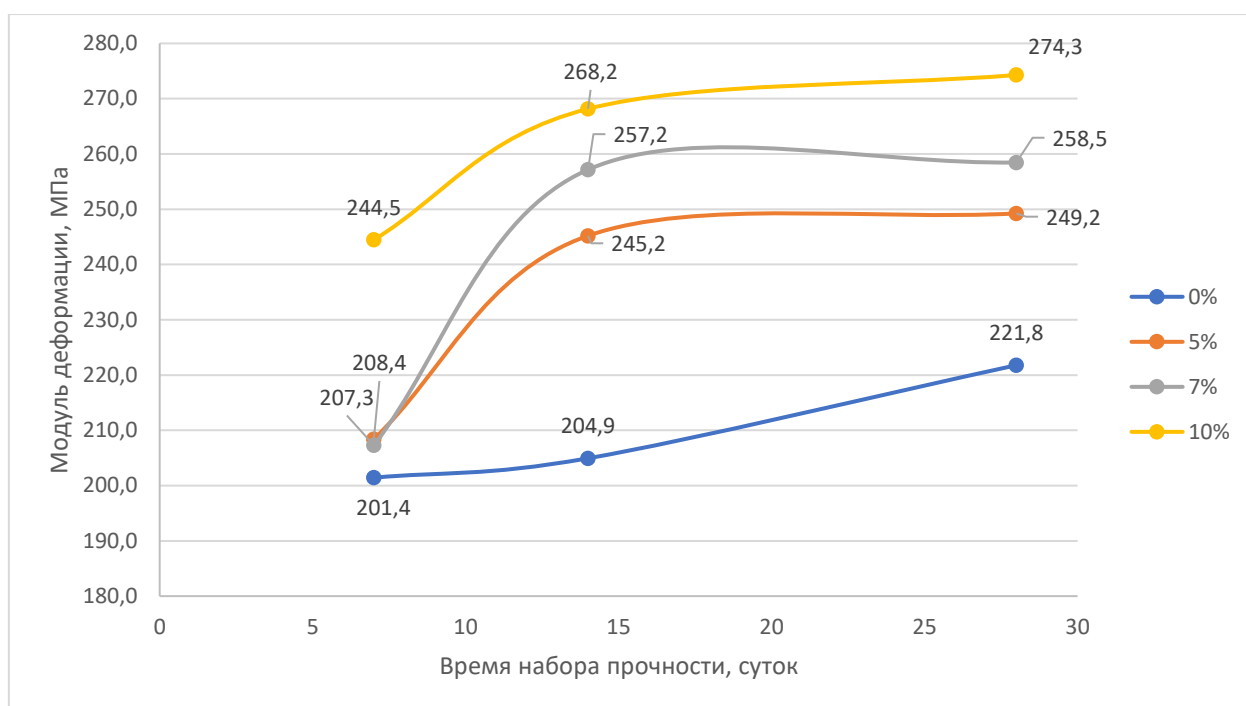


Рисунок 2.12 – Зависимость модуля деформации от процентного содержания полимерного стабилизатора

Таблица 2.6 – Зависимость прочности на сжатие от процентного содержания полимерного стабилизатора

Процентное содержание ПМК	Прочность на сжатие, МПа при времени набора прочности, суток		
	7	14	28
0	7,56	8,53	8,55
5	7,86	8,37	9,51
7	8,03	8,63	10,09
10	8,08	8,66	9,96

В целях проверки увеличения трещиностойкости и стойкости к воздействию воды были проведены испытания на прочность при расколе и прочность при сжатии после водопоглощения с определением модуля деформации материала.

Для испытаний прочности на раскол было изготовлено 12 образцов – по 3 для каждого состава с различным содержанием ПМК «Никофлок» (0 %, 5 %, 7 %, 10 %). Результаты испытаний представлены на рисунке 2.13.

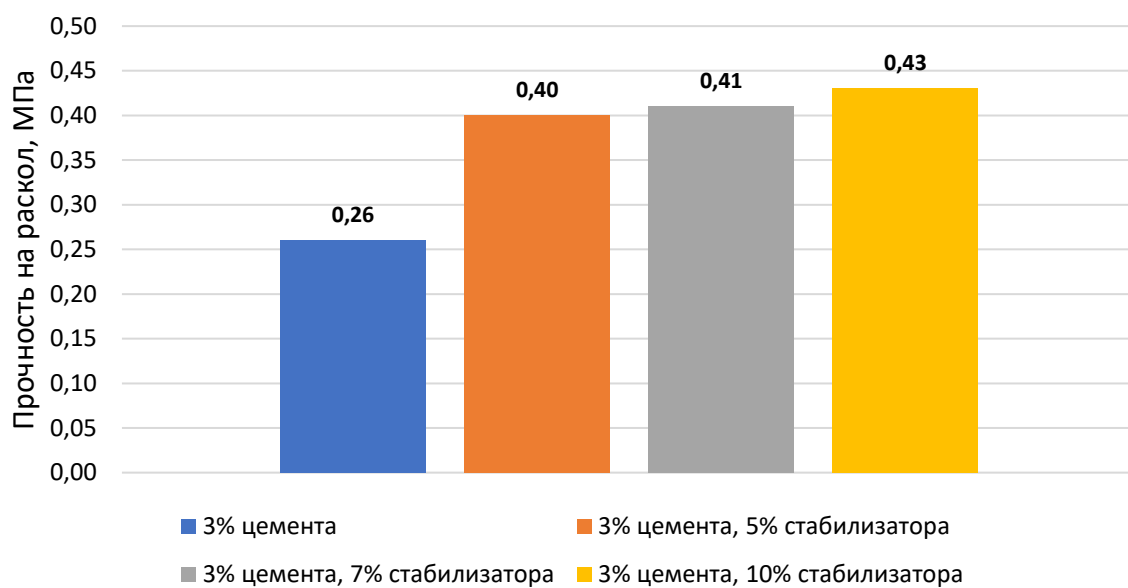


Рисунок 2.13 – Зависимость прочности на раскол от процентного содержания полимерного стабилизатора

Результаты испытаний по определению модуля деформации материала в сухом и водонасыщенном состоянии представлены на рисунке 2.14.

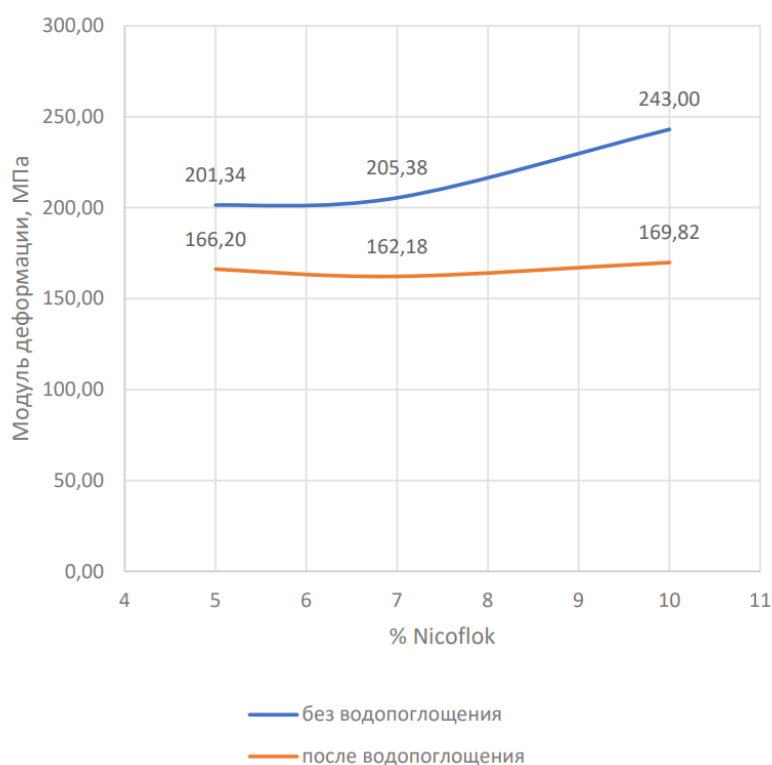


Рисунок 2.14 – Зависимость модуля деформации от процентного содержания стабилизатора в сухом и водонасыщенном состоянии

Помимо этого, по результатам проведенных испытаний был определен коэффициент жесткости, который представляет собой отношение прочности на сжатие к прочности на растяжение при расколе. Гистограмма с коэффициентами жесткости составов с 3 % цемента и 0, 5, 7, 10 % полимерного стабилизатора приведена на рисунке 2.15.

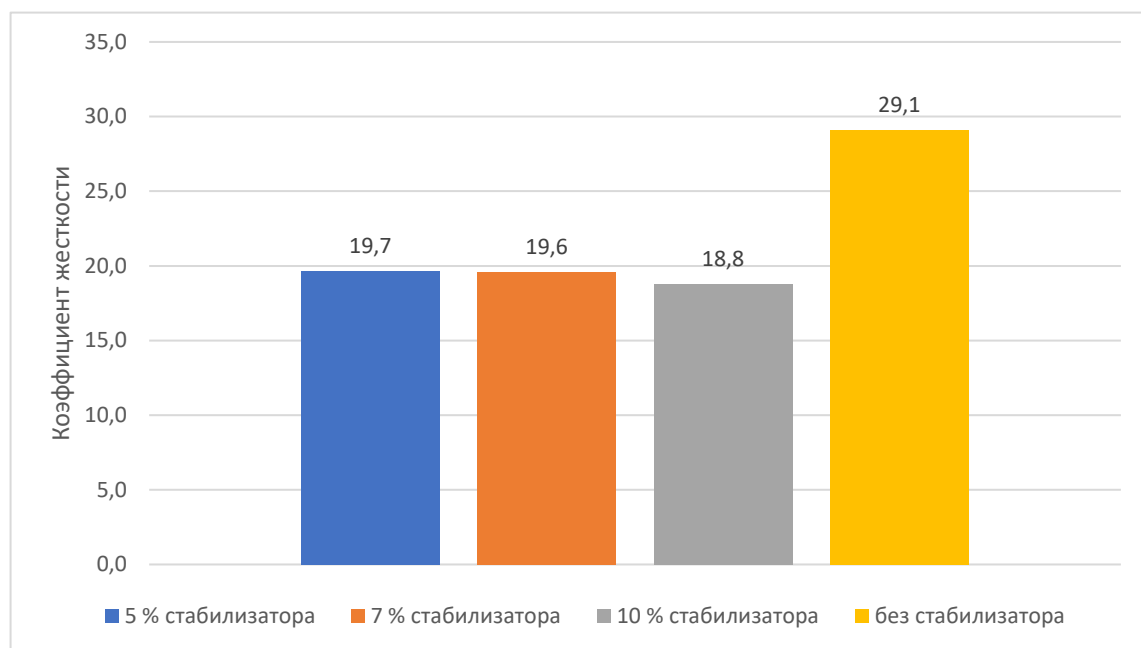


Рисунок 2.15 – Коэффициент жесткости смеси в зависимости от процентного содержания полимерного стабилизатора

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 процентного содержания не оказало большого влияния на его свойства.

При этом, стоит отметить, что добиться подобного увеличения свойств по модулю деформации материала, его прочности на сжатие и растяжение при расколе возможно за счет увеличения процентного содержания

портландцемента, однако, как показывают наблюдения, представленные в [60], повышение доли портландцемента в материале увеличивает прочность и модуль деформации, но также увеличивает и риск образования трещин за счет большей усадки при наборе прочности и хрупкости самого материала.

В связи вышеизложенным, для дальнейших испытаний был принят состав с 3 % добавками портландцемента от массы грунта и 5 % полимерного стабилизатора от массы цемента.

Также стоит отметить, что первоначально определенный критерий прочности на сжатие R_c , который должен составлять не менее 1,0 МПа является заниженным, с учетом того, что образцы, показавшие значение прочности на сжатие 7,86 МПа, имели значение модуля деформации в водонасыщенном состоянии 162,18 МПа, что всего на 8 % выше минимально допустимого. В связи с этим, данный критерий нуждается в пересмотре и должен составлять не менее 6,0 МПа, так как при данной прочности материала ПЗС достигался модуль деформации порядка 150 МПа.

2.3 Стендовые испытания модели подбалластного защитного слоя из старогодных балластных материалов, обработанных вяжущими материалами и полимерными стабилизаторами

2.3.1 Методика проведения испытаний

После подбора состава добавок для материала ПЗС были проведены стендовые испытания на модели подбалластного защитного слоя с применением вяжущих материалов для оценки статического модуля деформации конструкции с недостаточной прочностью и деформативностью грунтов основания.

Для выполнения поставленной задачи были собраны модели ПЗС с подобранным в предыдущем разделе гранулометрическим составом. Модели собирались толщиной 25 см на основании с модулем деформации 30 МПа двух

видов – контрольная без применения добавок портландцемента и модель с применением добавок портландцемента и полимерного стабилизатора.

Методика сборки модели вместе с добавками портландцемента и полимерных стабилизаторов была принята аналогичной представленным в пункте 2.2.1, однако перед укладкой слоя он был тщательно перемешан в смесителе гравитационного типа с 3 % портландцемента марки ЦЕМ I 42,5 Н Д0 и 0,15 % от массы грунта ПМК «Никофлок» (5 % от массы цемента) до достижения однородной массы. В смеситель также добавлялась вода для достижения оптимальной влажности смеси.

Суммарно было собрано четыре модели защитного слоя: три без применения вяжущих материалов (№ 1–3) для обеспечения статистической достоверности результатов испытаний, одна с добавками портландцемента и стабилизатора (№ 4) для сокращения требуемого объема балластного материала. Достоверность результатов испытаний закрепленной модели подтверждалась точным контролем дозировки добавок портландцемента и полимерного стабилизатора с точностью до 0,1 % по массе, тщательным перемешиванием состава до однородной массы и контролем плотности модели ПЗС, которая должна быть сравнима с значениями, полученными на незакрепленных моделях с разницей не более 2 %, что позволяет обеспечить воспроизводимость эксперимента. После сборки моделей по измерениям риск определялась плотность смеси.

Модель защитного слоя с применением вяжущих материалов испытывалась три раза – сразу после сборки и в возрасте трех и семи суток с момента окончания уплотнения для оценки набора прочности материала ПЗС.

Штамповые испытания выполнялись аналогично пункту 2.2.1.

2.3.2 Результаты испытаний

Результаты измерения плотности приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Определение плотности моделей

№ модели	Масса модели, кг	Толщина модели, см	Объем модели, см ³	Плотность модели, г/см ³
1	360,9	25,3	160951,6	2,24
2	360,9	25,6	162860,1	2,21
3	360,9	25,4	161587,8	2,23
4	367,26	25,7	163496,3	2,25

По данным таблицы 2.7 видно, что коэффициент уплотнения, принимаемый за отношение плотности элементарных образцов к плотности грунта в модели, составляет 0,97–0,99, что сходится с экспериментальными данными [82] и свидетельствует о качественно выполненном уплотнении.

Обработанные результаты в виде значений модулей деформации смеси без применения вяжущих материалов представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Результаты штамповых испытаний моделей без применения вяжущих материалов

№ модели	E_{v1} , МПа	E_{v2} , МПа	E_{v2}/E_{v1}
1	33,70	48,81	1,45
2	45,73	46,63	1,02
3	49,37	48,23	0,98
Среднее значение	42,93	47,89	1,15

Обработанные результаты модели с применением вяжущих материалов в виде значений модулей деформации смеси представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты штамповых испытаний модели с применением вяжущих материалов

Время набора прочности, суток	E_{v1} , МПа	E_{v2} , МПа	E_{v2}/E_{v1}
0	35,41	51,84	1,46
3	60,53	66,18	1,09
7	78,20	84,43	1,08

2.4 Выводы по разделу 2

По результатам испытаний, представленных в разделе 2 можно сделать следующие выводы:

1. Характеристик материала накопленной толщи старогонных балластных материалов в исходном состоянии (без закрепления вяжущими) недостаточно для обеспечения требуемого модуля деформации не менее 150 МПа, что ограничивает его применение в конструкции ПЗС.

2. Для обеспечения критерия по модулю деформации не менее 150 МПа достаточно добавки 4 % портландцемента от массы грунта, однако, прирост прочности в сравнении с показателями образцов с 3 % портландцемента составляет всего 6 %, в связи с чем, рекомендуется принять состав с 3 % портландцемента от массы материала для снижения риска возникновения усадочных трещин и снижения хрупкости материала. При этом добиться требуемых характеристик материала возможно путем добавки в него полимерных стабилизаторов.

3. Применение полимерных стабилизаторов придает получаемому материалу следующие свойства:

- увеличение модуля деформации на 12,4–23,6 %;
- увеличение прочности на сжатие на 11–18 %;
- увеличение прочности на раскол на 58–65 %;
- увеличение коэффициента водостойкости на 13 %;
- уменьшение коэффициента жесткости на 32–35 %.

Наиболее рациональным представляется применение добавки 5 % полимерного стабилизатора от массы портландцемента, с учетом того, что его дальнейшее увеличение не дает значительного прироста указанных показателей, следовательно, экономически нецелесообразно. Для сборки модели ПЗС рекомендуется состав с 3 % портландцемента от массы грунта и 5 % портландцемента от массы портландцемента.

4. Проведенные испытания показали необходимость корректировки минимально допустимого значения по прочности материала до 6,0 МПа для обеспечения минимально необходимого модуля деформации материала 150 МПа.

5. Для подтверждения возможности обеспечения модуля деформации по верху ПЗС не менее 80 МПа при слабом основании с модулем деформации 30 МПа была собрана модель с выбранным составом добавок портландцемента и полимерного стабилизатора, а также контрольные модели без их применения.

По результатам испытаний моделей без закрепления средний модуль деформации по верху составил 47,89 МПа, что хорошо согласуется с Инструкцией [11].

Закрепленная модель ПЗС сразу после уплотнения показала модуль деформации по верху равный 51,84 МПа, что показывает хорошую сходимость с предыдущими моделями и свидетельствует об идентичности их уплотнения и достоверности результатов испытаний.

По мере набора прочности закрепленной модели модуль деформации увеличивается в 1,28 раз на третьи сутки и в 1,63 раз спустя 7 суток набора прочности, при этом к 7 суткам требуемый модуль деформации 80 МПа обеспечивается.

6. Анализ проведенных испытаний позволяет сделать вывод о возможности применения материала накопленной толщи старогонных балластных материалов с их закреплением вяжущими и полимерными стабилизаторами в конструкции ПЗС.

7. Следующим этапом исследования целесообразно рассмотреть укладку ПЗС в условиях опытного полигона железнодорожного пути для отработки технологии производства с проведением подбора гранулометрического состава смеси, добавок портландцемента и полимерных стабилизаторов.

3 Устройство подбалластного защитного слоя на Экспериментальном кольце

3.1 Постановка задачи

С целью отработки технологии создания ПЗС из старогородних балластных материалов методом холодного ресайклинга грунтов (перемешивания грунта с добавками портландцемента и полимерных стабилизаторов), а также определения выработки используемых машин, на основе результатов лабораторных испытаний было принято решение об устройстве опытных конструкций на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» на станции Щербинка (Далее – ЭК).

В рамках поставленной цели было необходимо решить задачи по выбору участков для укладки, определению на них модуля деформации в уровне основной площадки земляного полотна, проанализировать гранулометрический состав накопленных балластных материалов, подобрать состав добавок для закрепления смеси ПЗС, провести опытную укладку конструкции ПЗС с оценкой качества и скорости выполнения работ с выработкой рекомендаций по их дальнейшему увеличению, а также провести первичный цикл исследований с оценкой эффекта в эксплуатации от устройства ПЗС.

Выбор участков производился по критерию наличия накопленной толщи балластных материалов на глубину не менее 0,5 м от верха основной площадки земляного полотна.

Далее на выбранных участках выполнялся анализ гранулометрического состава грунтов основной площадки и для него в лаборатории на образцах, отобранных с участка, проводился подбор добавок, что осуществлялось варьированием количества портландцемента в образцах при неизменном процентном содержании полимерного стабилизатора (5 % от массы цемента). За критерий подбора была принята прочность на сжатие в водонасыщенном

состоянии, которая должна быть сопоставима с результатами лабораторных испытаний образцов, представленных в предыдущем разделе и составлять не менее 6,0 МПа.

Контроль качества выполнения работ по устройству ПЗС на ЭК выполнялся по величине динамического модуля деформации E_{vd} . При этом было предложено за критерий качества уплотнения принять с учетом последующего набора прочности материала ПЗС значение E_{vd} , определенное на первые сутки после устройства слоя, равным 30 МПа (75 % от нормативного [11]).

Первичные исследования конструкции ПЗС включали в себя проведение штамповых испытаний на первые, седьмые и двадцать восьмые сутки. Штамповые испытания на первые сутки проводились для оценки первоначального модуля деформации по верху ПЗС, а также дополнительного контроля качества уплотнения с получением требуемого значения E_{v2} не менее 75 % от нормативного. По результатам испытаний, с учетом времени набора прочности цементом, на 28 сутки получалось окончательное значение модуля деформации по верху ПЗС.

3.2 Выбор опытных участков

По проведенным изысканиям были отобраны 3 участка: ПК 3+00–ПК 5+00, ПК 13+00–ПК 15+50, ПК 26+00–ПК31+00 второго Главного пути. С обеих сторон опытных участков также были запроектированы переходные участки длиной 15 м. После каждого участка были назначены контрольные участки с типовой конструкцией пути без устройства ПЗС длиной от 50 до 100 м. Схема расположения участков представлена на рисунке 3.1.

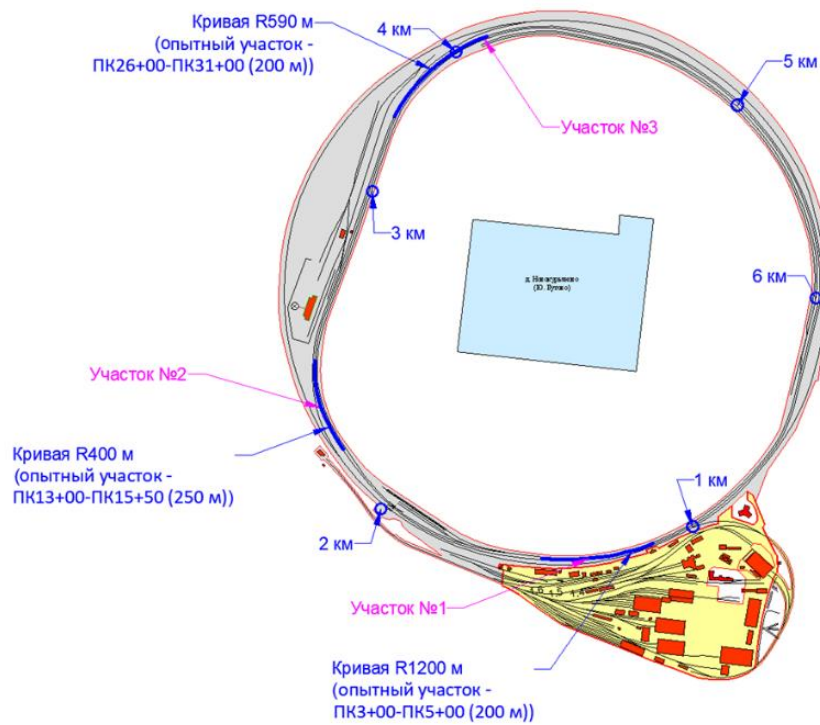


Рисунок 3.1 – Схема расположения участков на ЭК

Опытные участки были выбраны исходя из наличия накопленной толщи балластных материалов толщиной от 0,5 до 1,0 м ниже проектной отметки основной площадки земляного полотна. Для оценки необходимости укладки ПЗС на выбранных участках были проведены штамповые испытания на глубине 40 см ниже подошвы шпалы.

С учетом того, что нагрузка, передаваемая на грунт при штамповых испытаниях по стандартной методике [11] является сильно завышенной и не возникает в условиях реальной эксплуатации, была предложена методика проведения штамповых испытаний с максимальной нагрузкой 0,1 МПа, что является гораздо более близким значением к напряжениям, возникающим на основной площадке земляного полотна на сети железных дорог.

Нагрузку на штамп прикладывали с помощью домкрата со встроенным манометром (для контроля давления под штампом) в пять ступеней с интервалами, равными 0,02 МПа. Максимальная нагрузка на 5 ступени составляла 0,1 МПа. Изменение нагрузки от одной ступени до другой происходило в течение 1 мин. На каждой ступени выдерживали постоянную нагрузку в течение 1 мин.

Разгрузку штампа производили в три ступени: до 50 %, 25 % от максимальной нагрузки и далее полностью разгружали. После полной разгрузки выполняли второе нагружение в четыре ступени с аналогичными интервалами как при первом нагружении, но до предпоследней ступени первого нагружения (0,08 МПа), чтобы остаться в преднагруженном диапазоне.

После второго нагружения нагрузку снимали сразу до 0 без ступенчатой разгрузки. Полученные данные штамповых испытаний обрабатывались согласно Инструкции [11]. Результаты испытаний приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты штамповых испытаний на опытных участках

№ участка	Пикетаж	Модуль деформации по первичной ветке нагружения E_{v1} , МПа	Модуль деформации по вторичной ветке нагружения E_{v2} , МПа	E_{v2}/E_{v1}
1	ПК 3+00	10,9	94,2	8,64
1	ПК 5+00	10,7	126,9	11,86
2	ПК 13+50	9,6	55,9	5,82
2	ПК 15+55	31,7	129,4	4,08
3	ПК 26+65	19,9	129,2	6,49
3	ПК 30+50	14,9	111,7	7,50

Результаты штамповых испытаний показывают удовлетворительный модуль деформации земляного полотна на всех точках, кроме ПК 13+50. Низкие же модули деформации по первой ветке нагружения и, как следствие, большое отношение E_{v2}/E_{v1} можно объяснить разуплотнением слоя щебня при раскопке шпального ящика ввиду большого процента содержания крупных фракций.

С учетом результатов штамповых испытаний, на участках № 1 и 3 устройство ПЗС не требуется, однако было принято решение об укладке конструкции ПЗС с минимальной рекомендуемой толщиной 20 см [132] для

апробации технологии холодного ресайклинга и наработки опытных данных для возможной оптимизации технологического процесса.

На участке № 2 модуль деформации по верху основной площадки не удовлетворяет требованиям Инструкции [11], соответственно, на данном участке был назначен защитный слой толщиной 25 см, аналогично испытанной в разделе 2 модели ПЗС, для обеспечения модуля деформации по верху ПЗС не менее 80 МПа.

Для создания на ЭК опытных участков ПЗС из старогодних балластных материалов с портландцемента и полимерных стабилизаторов был разработан экспериментальный технологический процесс, включающий подготовительный и основной этап, и составлена программа исследований по оценке качества полученной конструкции.

3.3 Подготовительный этап

3.3.1 Подготовка основной площадки земляного полотна

Подготовка основной площадки земляного полотна заключалась в снятии существующей рельсошпальной решетки краном УК-25/25 (рисунок 3.2), срезке слоя балластной призмы на глубину 30 см с удалением геотекстиля (рисунок 3.3) и постановкой основной площадки до проектных отметок автогрейдерной техникой.



Рисунок 3.2 – Снятие рельсошпальной решетки



Рисунок 3.3 – Удаление слоя балластной призмы

С учетом того, что вырезка балластного слоя на опытных участках проводилась на глубину 30 см, а слой геотекстиля залегал на глубине 40 см, для его удаления проводилась первоначальная вырезка на глубину 40 см с накоплением щебня по обочине пути, изъятие геотекстиля, после чего, автогрейдером слой щебня толщиной в 10 см возвращался обратно.

3.3.2 Определение модуля деформации по подошве ПЗС

Для оценки влияния ПЗС на модуль деформации по его верху, на опытных участках были проведены штамповые испытания на уровне 20–25 см ниже основной площадки земляного полотна (по подошве ПЗС).

Методика проведения испытаний была принята аналогичной подразделу 3.1.

В таблице 3.2 приведены результаты штамповых испытаний по основанию ПЗС до его укладки.

Таблица 3.2 – Результаты штамповых испытаний по основанию ПЗС на опытных участках

Номер участка	Расположение	E_{v1} , МПа	E_{v2} , МПа	E_{v2}/E_{v1}
1	Начало участка	81,19	107,14	1,32
	Середина участка	76,09	101,12	1,33
	Конец участка	71,92	111,11	1,54
	Среднее по участку	76,40	106,46	1,39
2	Начало участка	35,16	60,81	1,73
	Середина участка	43,15	63,38	1,47
	Конец участка	34,09	63,83	1,87
	Среднее по участку	37,47	62,67	1,67
3	Начало участка	85,14	102,27	1,20
	Середина участка	79,95	112,50	1,41
	Конец участка	82,03	105,88	1,29
	Среднее по участку	82,37	106,88	1,30

По результатам штамповых испытаний среднее значение модуля деформации второй ветви нагружения для первого участка составило 106,46 МПа, для второго участка – 62,67 МПа, а для третьего участка – 106,88 МПа. Отношение E_{v2}/E_{v1} на всех участках менее 2,2, что в соответствии с Инструкцией [11] характеризует достаточное уплотнение основания ПЗС.

3.3.3 Анализ гранулометрического состава старогоднего балласта

После вырезки балласта для проведения подбора состава добавок портландцемента и стабилизатора, с опытных участков были отобраны пробы грунта на глубине до 25 см от верха основной площадки. Перед проведением испытаний по подбору состава добавок был определен гранулометрический состав отобранных проб. Проведение анализа гранулометрии проб балластных материалов показало, что в данном грунте практически полностью

отсутствуют загрязнители ввиду отсутствия эксплуатационной наработки на данном пути после проведенного капитального ремонта. На основании полученных данных было принято решение модифицировать гранулометрический состав материала. Исходя из того, что отсев крупных фракций в условиях реальной эксплуатации является трудозатратной и дорогостоящей операцией, применение данного способа представляется нецелесообразным. В связи с этим модификацию гранулометрического состава проводили путем добавления фракций с размером частиц от 0 до 10 мм. За критерий было принято максимально возможное нахождение гранулометрической кривой материала в границах требований к ПЗС согласно Инструкции [11], а также обеспечение показателя диаметр частиц, меньше которых по массе в ПЗС содержится 10 % d_{10} аналогично подобранному в предыдущем разделе (0,4 мм).

Для достижения приведенных критериев материал ПЗС модифицированный смесью ЩПС С7 по ГОСТ 25607 [137] в объеме 30 % от массы накопленной толщи балластных материалов. Исходный и модифицированный гранулометрический состав представлены на рисунке 3.4.

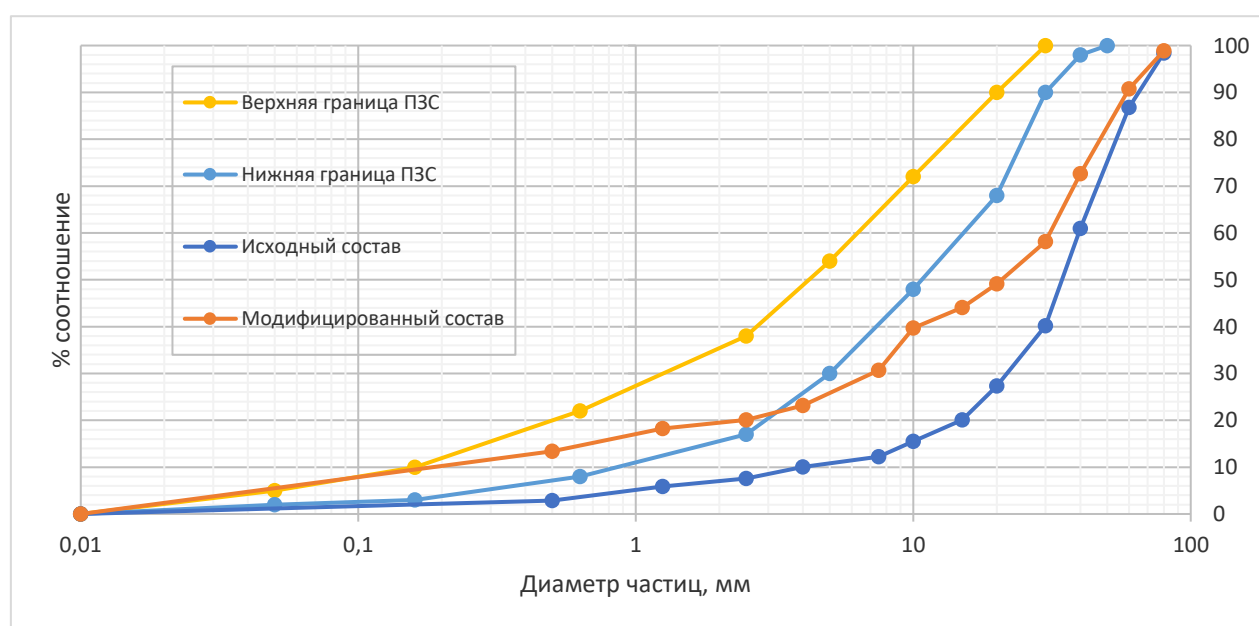


Рисунок 3.4 – Исходный и модифицированный состав смеси

Исходя из плотности материала старогодного балласта (загрязненный щебень) равной $2,0\text{--}2,10 \text{ т/м}^3$ [138] и плотности материала ПЗС, полученной в разделе 2, равной $2,25 \text{ т/м}^3$, были найдены требуемые объемы завоза ЩПС, а также толщина необходимой дополнительной вырезки для выхода на проектные отметки. Толщина необходимой вырезки и объем завозимой ЩПС представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Толщина необходимой вырезки и объем завозимой ЩПС

Участок устройства ПЗС*	Глубина дополнительной вырезки, см	Объем завозимой смеси, м^3
ПК2+85–ПК5+15 (230 м)	3	89
ПК12+85–ПК15+65 (280 м)	4	141
ПК25+85–ПК31+15 (230 м)	3	103
* – длина с учетом переходных участков.		

По результатам расчетов была проведена дополнительная вырезка старогодного балласта автогрейдером, после чего смесь ЩПС С7 была завезена на опытные участки в требуемом количестве с использованием самосвальной техники и равномерно распределена по основной площадке земляного полотна (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Подготовленная основная площадка земляного полотна перед устройством ПЗС

3.3.4 Подбор состава добавок для ПЗС

Для модифицированного гранулометрического состава был проведен подбор состава портландцемента на основе испытаний на одноосное сжатие. Для выполнения этой цели были изготовлены аналогичные представленным в разделе 2 образцы-цилиндры. Суммарно было изготовлено 9 образцов с различным содержанием цемента ЦЕМ I 42,5Н (3, 3,5, 4 % от массы грунта). Количество стабилизатора во всех образцах было принято 0,15 % от массы грунта, так как по результатам испытаний, проведенных ранее, дальнейшее увеличение процентного содержания стабилизатора не оказывает значительное влияние на прочность и долговечность получаемого материала. Образцы испытывались в возрасте 7 суток. Результаты испытаний представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты испытаний по подбору содержания цемента

№ образца	Содержание цемента, %	Прочность на сжатие, МПа	Среднее значение прочности на сжатие, МПа
1	3	8,8	8,2
2	3	8,1	
3	3	7,7	
4	3,5	9,0	9,5
5	3,5	9,4	
6	3,5	10,1	
7	4	12,8	12,5
8	4	13,4	
9	4	11,2	

По анализу результатов испытаний и сравнению с ранее выполненными видно, что добавления 3 % цемента удовлетворяет критерию не менее 6,0 МПа, что и было выбрано для проведения работ по устройству ПЗС. Дополнительно стоит отметить хорошую сходимость по результатам испытаний с 3 % цемента, полученными в разделе 2 и при подборе состава материала ПЗС для устройства опытного участка. Расхождение в значении прочности составляет 4,33 %.

3.4 Технология устройства подбалластного защитного слоя из старогородных балластных материалов

3.4.1 Конструкция ПЗС

Ширина ПЗС со стороны междупутья составляла 2,05 м (исходя из междупутья 4100 мм), с полевой стороны – 0,5 м от бровки основания балластной призмы (на ширину 0,5 м обочины земляного полотна).

При устройстве ПЗС обеспечивался поперечный уклон в уровне ОПЗП величиной не менее 4 % для отвода поверхностных вод в сторону водоотводных сооружений (лотков или канав).

Участки без устройства ПЗС сопрягались в продольном направлении с участками с ПЗС переходными участками. Длина переходных участков составляла 15 м. Изменение жесткости обеспечивалось различным процентным добавлением вяжущих (цемента) по его длине – постепенным увеличением процентного соотношения от начала отвода до проектного процентного соотношения к его концу.

3.4.2 Технологическая цепочка машин для устройства ПЗС

За основу для разработки технологического процесса создания ПЗС из старогородних материалов с закреплением вяжущими с добавкой полимерных стабилизаторов был принята технология холодного рейсаклинга, используемая при строительстве и реконструкции автомобильных дорог

Разработанный технологический процесс устройства ПЗС после подготовки основной площадки земляного полотна включал выполнение следующих работ:

- распределение вяжущего материала, в качестве которого используется цемент и полимерный стабилизатор с применением распределителя;
- перемешивание подготовленного основания с предварительно распределенным цементом и полимерным стабилизатором на расчетную глубину. Данная работа осуществляется с использованием ресайклера;
- уплотнение кулачковым катком в 2 прохода по одному следу;
- профилирование уложенного ПЗС до проектных отметок с использованием грейдера;
- окончательное уплотнение ПЗС гладковальцовым катком в 2 прохода по одному следу.

Работы по устройству ПЗС выполнялись последовательно на захватках в следующие периоды:

- на участке № 3 в кривой радиусом 590 м на ПК25+85–ПК31+15 (230 м) – 22 октября 2023 г.;

- на участке № 2 в кривой радиусом 397 м на ПК12+85–ПК15+65 (280 м)
– 23 октября 2023 г.;

- на участке № 1 в кривой радиусом 1200 м на ПК2+85–ПК5+15 (230 м)
– 23 октября 2023 г.

Вяжущие материалы и полимерный стабилизатор «Никофлок» перед проходом ресайклера распределялся на подготовленное основание с помощью распределителя вяжущего TS 12 на базе КАМАЗ с стандартным бункером для вяжущего вместимостью 12 м³. Загрузка распределителя вяжущими материалами проводилась из автоцементовозов. Работа распределителя вяжущего показана на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Работа распределителя вяжущего

В качестве ведущей машины был принят ресайклер WR200, предназначенный для холодного ресайклинга старогодного балластного слоя, перемешивания компонентов для получения однородной смеси ПЗС с шириной рабочего органа 2,0 м. Приготовленную смесь ресайклер укладывал с учетом высотных отметок и уклонов для последующего уплотнения.

Ресайклер регенерировал старогодний балластный слой в одном направлении с рабочей скоростью 15 м/мин. Скорость обратного (холостого)

хода составляла 18–25 м/мин. Процесс работы ресайклера показан на рисунке 3.7.



Рисунок 3.7 – Процесс работы ресайклера

После начала работы ресайклера с интервалом 4–5 м по регенерируемой полосе (между колес ресайклера) с аналогичной скоростью двигался вибрационный кулачковый каток Sakai SV512T (рисунок 3.8) с шириной вальца 2,1 м (масса катка – 10,9 т, мощность 90,5 кВт, частота вибрации 36,7 Гц, амплитуда 2 мм) для предварительного уплотнения разрыхлительной смеси и расклинцовки крупнообломочного грунта.



Рисунок 3.8 -Работа вибрационного катка с кулачковым вальцом

Режим работы катка и количество проходов были приняты, исходя из условия уплотнения крупнообломочных грунтов, учитывая их специфику уплотнения (сближение частиц и их взаимное заклинивание с возникновением в местах контактов частиц силы трения и силы сцепления). Вместе с тем, каток подготавливал сфрезерованный слой под последующее профилирование автогрейдером (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Работа автогрейдера

Окончательное уплотнение ПЗС осуществлялось гладковальцовым катком Ammann ASC 150D массой 10,2 т на валец и шириной уплотнения 2,2 м (частота 29/35 Гц, амплитуда 2,0 / 1,0 мм) в 2 прохода по одному следу.



Рисунок 3.10 – Работа вибрационного катка с гладким вальцом

3.4.3 Контроль качества выполнения работ

Контроль качества уплотнения осуществлялся путем проведения испытаний на определение динамического модуля деформации грунта E_{vd} , МПа, прибором ZFG 3.0 по левой и правой рельсовой нити через каждые 25 м (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – Определение динамического модуля деформации

Результаты испытаний по определению динамического модуля деформации по верху ПЗС представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Динамический модуль деформации по верху ПЗС

Участок	Место измерения	Нить	E_{vd} , МПа
1	ПК 3+00	Левая	63,38
		Правая	60,81
	ПК 3+25	Левая	44,91
		Правая	27,57
	ПК 3+50	Левая	36,59
		Правая	72,35
	ПК 3+75	Левая	88,24
		Правая	33,19
1	ПК 4+00	Левая	64,29
		Правая	90,00
	ПК 4+25	Левая	55,97
		Правая	36,70
	ПК 4+50	Левая	62,85
		Правая	79,51
	ПК 4+75	Левая	41,51
		Правая	37,56
	ПК 5+00	Левая	36,82

Участок	Место измерения	Нить	E_{vd} , МПа
		Правая	46,78
2	ПК 13+00	Правая	33,33
		Левая	46,68
	ПК 13+25	Правая	48,18
		Левая	61,98
	ПК 13+50	Правая	40,18
		Левая	37,44
	ПК 13+75	Правая	50,11
		Левая	68,60
	ПК 14+00	Правая	77,59
		Левая	63,38
	ПК 14+25	Правая	77,59
		Левая	42,86
	ПК 14+50	Правая	39,94
		Левая	78,13
	ПК 14+75	Правая	69,66
		Левая	57,84
	ПК 15+00	Правая	45,09
		Левая	69,88
	ПК 15+25	Правая	43,95
		Левая	38,14
	ПК 15+50	Правая	46,88
		Левая	47,57
3	ПК 26+00	Правая	41,06
		Левая	67,98
	ПК 26+25	Правая	38,86
		Левая	41,51
	ПК 26+50	Правая	34,4
		Левая	45,73
3	ПК 26+75	Правая	41,74

Участок	Место измерения	Нить	E_{vd} , МПа
	ПК 30+00	Левая	53,19
		Правая	47,67
	ПК 30+25	Левая	38,53
		Правая	39,82
	ПК 30+50	Левая	61,31
		Правая	51,96
	ПК 30+75	Левая	49,45
		Правая	41,67
	ПК 31+00	Левая	50,00
		Правая	37,31
		Левая	42,13
		Правая	

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, что удовлетворяет требованиям Инструкции [11] и поставленному критерию 30 МПа.

Стоит отметить, что на первой и второй группе опытных участков под правой и левой рельсовой нитью имеется разброс значений, что может свидетельствовать о неравномерном уплотнении ПЗС по длине участков. Данный факт можно объяснить тем, что участки №1, 2 укладывались при неблагоприятных погодных условиях при обильных осадках, что повлекло за собой неоднородность модуля деформации и занижение его значений на определенных сечениях.

3.4.4 Определение производительности выполнения работ

Для определения погонной выработки работ по устройству ПЗС, был выполнен хронометраж операций по устройству ПЗС длиной 230 м на участке № 1 (рисунок 3.12).

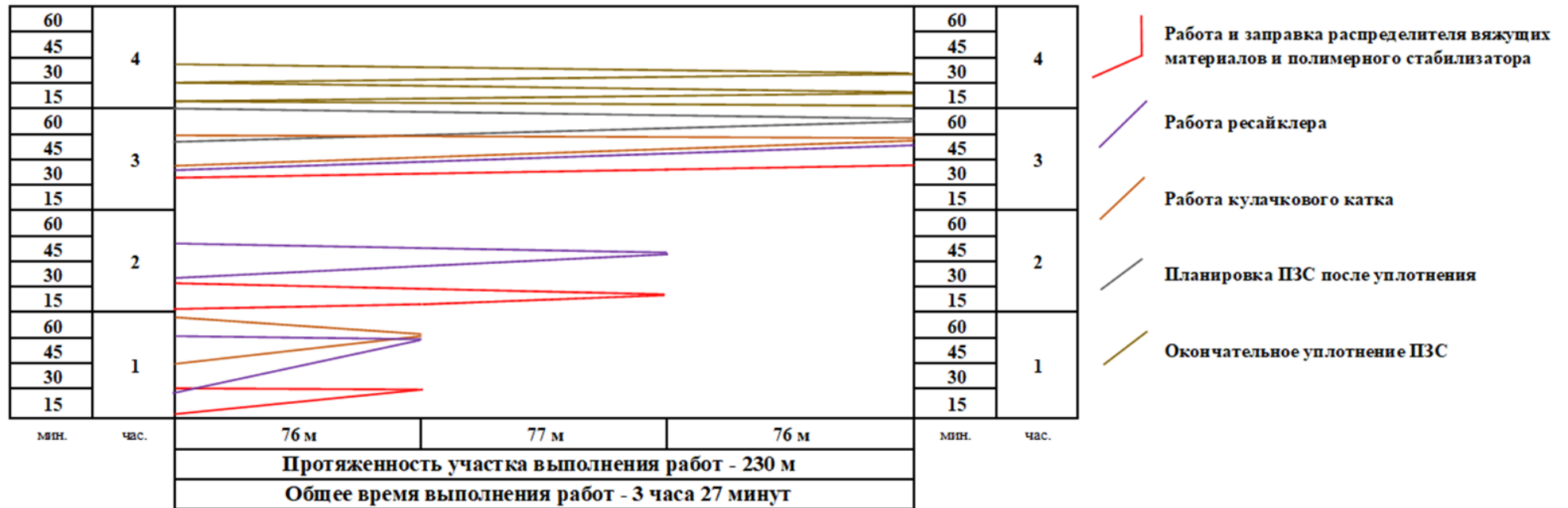


Рисунок 3.12 – Хронометраж операций по устройству ПЗС

По результатам замеров, ПЗС из накопленных балластных материалов толщиной 0,2 м и длиной 230 м (с учетом переходных участков) был сооружен за 207 минут, то есть, производительность работ по устройству ПЗС по данной технологии составила в среднем 67 м/ч. Стоит отметить, что основные потери времени из-за простоя машин (порядка 90 минут) были вызваны необходимостью дозаправки бункера распределителя вяжущего смесью цемента и полимерного стабилизатора.

Основными путями по повышению производительности работ по устройству ПЗС могут являться заблаговременное смешение цемента со стабилизатором и использование, как минимум, двух распределителей вяжущих для обеспечения их непрерывной работы на участке производства работ во время бункеровки одного из них. В случае невозможности смешения цемента со стабилизатором, другим вариантом также может являться применение отдельного распределителя под полимерный стабилизатор. Соблюдение данных рекомендаций дает возможность сократить время на устройство ПЗС на длине в 230 м до 117 минут, и, соответственно, повысить производительность работ до 118 м/ч, то есть, практически в 2 раза.

3.5 Проведение статических штамповых испытаний подбалластного защитного слоя

3.5.1 Методика испытаний

Статические штамповые испытания ПЗС проводились в начале, середине и конце опытных участков сразу после укладки ПЗС (по оси пути, по внутренней и внешней рельсовой нити) и на 7 и 28 сутки после укладки ПЗС (по внутренней рельсовой нити).

Штамповые испытания сразу после укладки и на 7 сутки после укладки (до устройства верхнего строения пути) проводились по трем точкам – по осям рельсовых нитей и оси пути, на 28 сутки – по внутренней рельсовой нити с учетом уложенной рельсошпальной решетки.

3.5.2 Результаты штамповых испытаний

В таблице 3.6 приведены результаты штамаповых испытаний по поверхности ПЗС сразу после укладки.

Таблица 3.6 – Результаты штамповых испытаний по поверхности ПЗС сразу после укладки

Участок	Привязка	Положение	E_{v1} , МПа	E_{v2} , МПа	E_{v2}/E_{v1}
1	Внутренняя нить	Начало ПЗС	78,45	233,04	2,97
	Ось пути		79,95	225,00	2,81
	Наружная нить		79,68	209,94	2,63
	Внутренняя нить	Середина ПЗС	55,57	153,63	2,76
	Ось пути		52,42	145,54	2,78
	Наружная нить		49,93	139,14	2,79
	Внутренняя нить	Конец ПЗС	43,63	105,02	2,41
	Ось пути		41,89	100,00	2,39
	Наружная нить		38,89	97,83	2,52
	Среднее по участку			57,82	156,57
2	Внутренняя нить	Начало ПЗС	25,57	60,59	2,37
	Ось пути		21,11	58,06	2,75
	Наружная нить		24,42	55,92	2,29
	Внутренняя нить	Середина ПЗС	27,02	64,29	2,38
	Ось пути		26,12	62,07	2,38
	Наружная нить		29,55	57,07	1,93
	Внутренняя нить	Конец ПЗС	22,60	59,21	2,62
	Ось пути		23,20	58,82	2,54
	Наружная нить		23,51	52,33	2,23
	Среднее по участку			24,79	58,71
3	Внутренняя нить	Начало ПЗС	139,38	180,72	1,30

	Ось пути		123,05	176,47	1,43
	Наружная нить		119,32	169,81	1,42
	Внутренняя нить	Середина ПЗС	130,17	178,73	1,37
	Ось пути		121,15	171,43	1,42
	Наружная нить		109,38	171,90	1,57
	Внутренняя нить	Конец ПЗС	135,52	177,58	1,31
	Ось пути		123,05	173,41	1,41
	Наружная нить		134,34	172,16	1,28
	Среднее по участку		126,15	174,69	1,38

По результатам статических штамповых испытаний по поверхности ПЗС после его укладки на первые сутки среднее значение модуля деформации второй ветви нагружения на первом участке составило 156,57 МПа, на втором участке – 58,71 МПа, а на третьем участке – 174,69 МПа.

Из полученных результатов следует отметить различные значения модуля деформации по длине первого участка, в начале опытного участка среднее значение модуля деформации второй ветви нагружения составило 222,66 МПа, а в конце 100,95 МПа. Отношение E_{v2}/E_{v1} на первом и втором участке составило более 2,2 для всех испытаний.

Аналогично результатам, полученным при измерении динамического модуля деформации по верху ПЗС, штамповые испытания также показывают неравномерность распределения модуля деформации грунта и большую разницу между первой и второй веткой нагружения, что объясняется некачественным уплотнением вследствие неоптимальной влажности грунта при укладке ПЗС.

Отношение E_{v2}/E_{v1} на третьем участке свидетельствует о достаточном уплотнении ПЗС на этапе строительства. Среднее значение E_{v2}/E_{v1} составило 1,38, что отвечает критериям Инструкции [11].

В таблице 3.7 приведены результаты штамповых испытаний по поверхности ПЗС после его укладки на седьмые и 28-е сутки.

Таблица 3.7 – Результаты штамповых испытаний по верху ПЗС на 7 и 28 сутки

Участок	Положение	7 сутки			28 сутки		
		E_{v1} , МПа	E_{v2} , МПа	E_{v2}/E_{v1}	E_{v1} , МПа	E_{v2} , МПа	E_{v2}/E_{v1}
1	Начало ПЗС	150,26	490,20	3,26	379,79	499,17	1,31
	Середина ПЗС	146,91	473,68	3,22	358,77	491,53	1,37
	Конец ПЗС	165,09	450,45	2,73	370,59	481,28	1,30
	Среднее	154,09	471,44	3,06	369,72	490,66	1,33
2	Начало ПЗС	212,72	550,46	2,59	416,89	559,01	1,34
	Середина ПЗС	200,48	473,61	2,36	374,47	491,72	1,31
	Конец ПЗС	201,41	490,65	2,44	395,73	498,81	1,26
	Среднее	204,87	504,91	2,46	395,70	516,51	1,31
3	Начало ПЗС	103,35	230,77	2,23	326,76	397,35	1,22
	Середина ПЗС	131,29	290,32	2,21	358,77	414,75	1,16
	Конец ПЗС	103,55	230,71	2,23	353,93	404,49	1,14
	Среднее	112,73	250,60	2,22	346,49	405,53	1,17

На седьмые сутки после укладки ПЗС среднее значение модуля деформации для первого участка составило 471,44 МПа, для второго участка 504,91 МПа, для третьего участка 250,60 МПа. Отношение E_{v2}/E_{v1} на седьмые сутки для первой и второй группы участков составило более 2,2, что можно связать с избыточным переувлажнением ПЗС на этапе строительства.

Среднее значение модуля деформации второй ветви нагружения на 28 сутки после укладки ПЗС для первого участка составило 490,66 МПа, для второго участка 516,51 МПа, а для третьего участка 405,53 МПа.

Отношение E_{v2}/E_{v1} на 28 сутки на всех группах опытных участков составило менее 2,2.

На рисунке 3.13 представлен график набора прочности ПЗС от укладки к 28-м суткам.

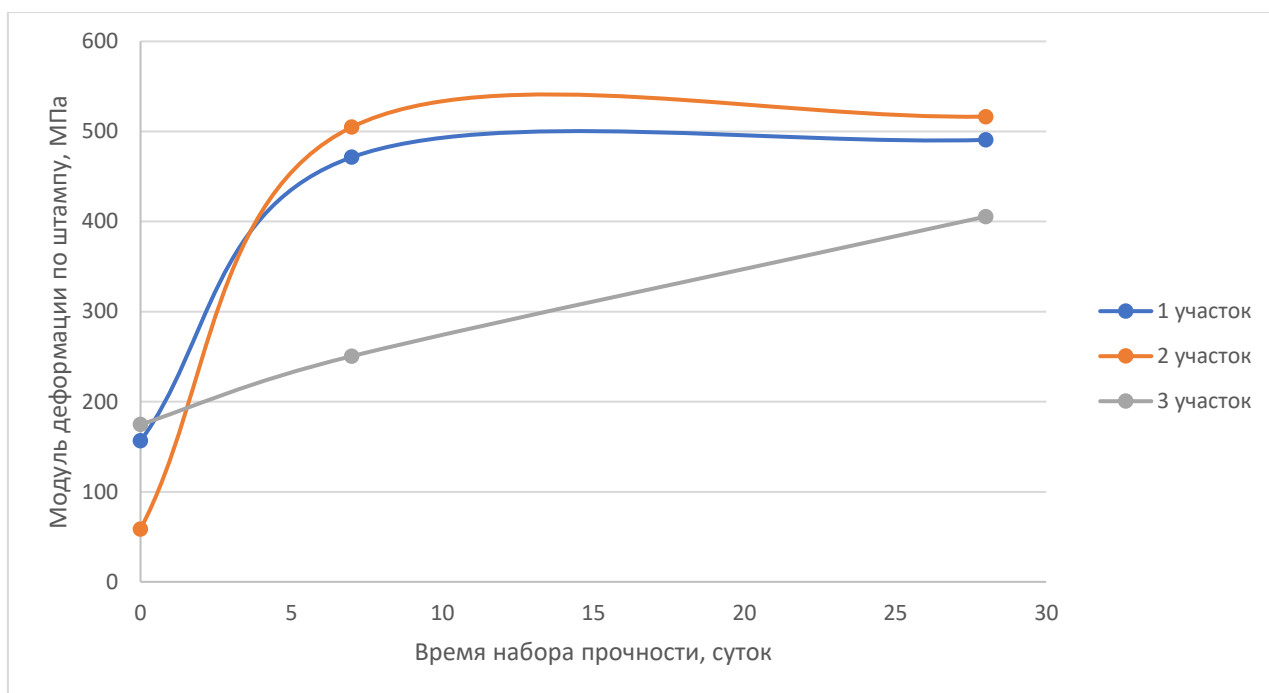


Рисунок 3.13 – График набора прочности ПЗС

Из рисунка 3.13 видно, что основной набор прочности на первом и втором участке произошел за первые 7 суток, в то время как на третьем участке ПЗС набирал прочность более равномерно в течение 28 суток.

Характер кривой набора прочности ПЗС на первом и втором участках является достаточно схожим с кривыми набора прочности элементарных цилиндрических образцов, что говорит о схожем процессе гидратации в этих двух случаях. Следовательно, несмотря на избыточную влажность грунта, дополнительная вода в материале не повлияла на набор прочности цемента, которая обратно пропорциональна водоцементному отношению [139]. Помимо этого, по данным [140] для гидратации цемента необходим определенный избыток воды (в 2–3 раза) в сравнении с тем количеством, которое непосредственно вступает в реакцию с цементом. Обратная ситуация наблюдалась на третьем участке, где ПЗС укладывался в сухую погоду и без добавления воды в процессе устройства. Большая часть воды осталась в материале заполнителя смеси грунта, что способствовало качественному уплотнению, однако сам процесс гидратации цемента замедлился.

При этом, конечный модуль деформации материала ПЗС на 28 сутки на всех участках оказался почти в 6 раз выше требуемого модуля деформации для особогрузонапряженных линий согласно Инструкции [11], что может быть объяснено большим количеством воды в слое ПЗС на участках 1 и 2, а также высоким значением модуля деформации основания.

3.6 Анализ состояния участков пути после наработки тоннажа

Открытие движения по опытным участкам с ПЗС и контрольным участкам состоялось 07.12.2023. В период с 07.12.2023 по 31.10.2024 по данным участкам осуществлялась опытная эксплуатация грузового поезда с осевыми нагрузками до 25 т/ось. За приведенный промежуток времени по участкам было пропущено 205 млн. т брутто. График наработки тоннажа приведен на рисунке 3.14.

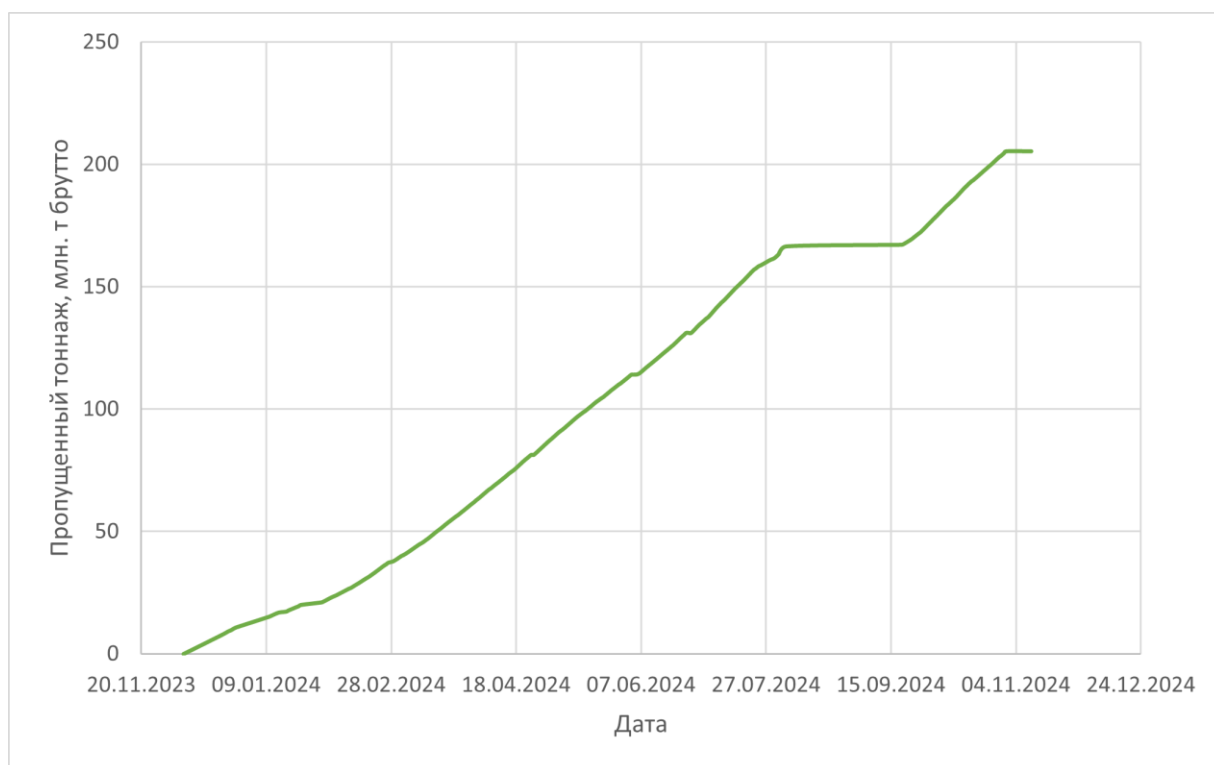


Рисунок 3.14 – График наработки тоннажа по II главному пути на ЭК

Перерыв в наработке тоннажа в период с августа по сентябрь был вызван устройством ПЗС для участка опытной стрелочной продукции.

В процессе наработки тоннажа осуществлялись периодические проходы мобильных средств диагностики с фиксацией параметров геометрии рельсовой колеи.

На рисунке 3.15 приведен график интенсивности накопления отступлений по геометрии рельсовой колеи в зависимости от наработки тоннажа для контрольных и опытных участков.

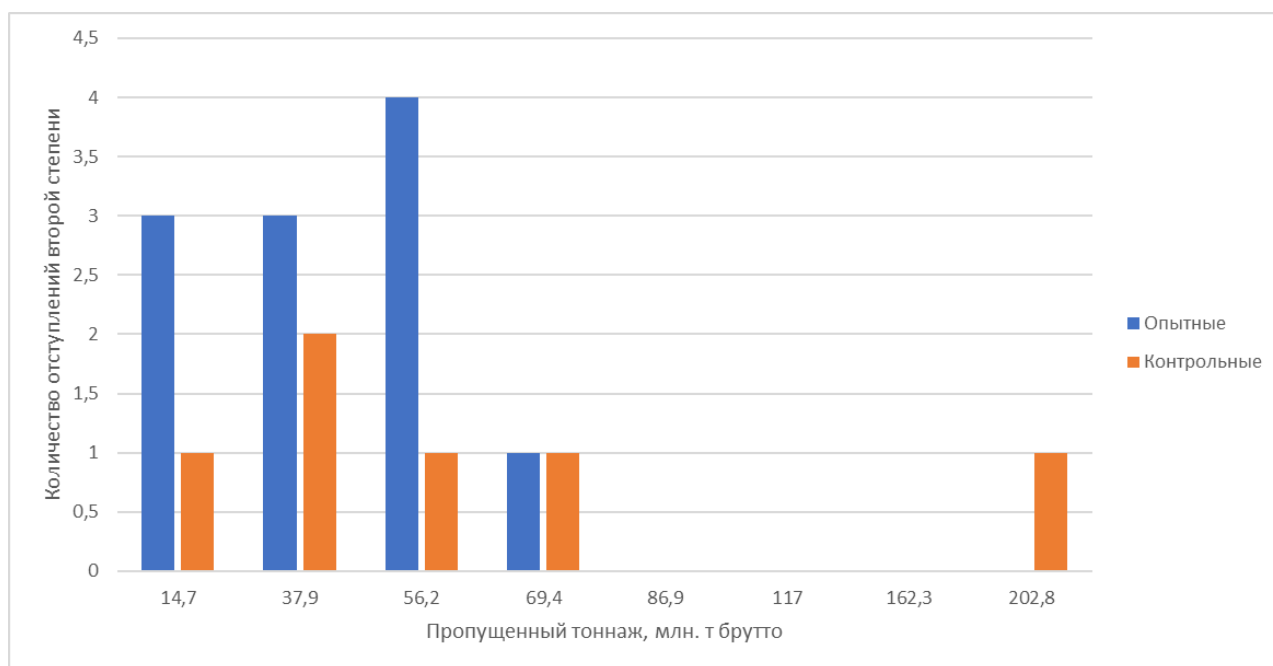


Рисунок 3.15 – Интенсивность накопления отступлений геометрии рельсовой колеи на контрольных и опытных участках

В период стабилизации балластной призмы на контрольных и опытных участках пути было отмечено возникновение отступлений по геометрии рельсовой колеи на опытных и контрольных участках железнодорожного пути, связанных с просадками, перекосами и отступлением по уровню.

В период до наработки 69,4 млн. т брутто пропущенного тоннажа на опытных участках было выявлено 4 отступления 2-ой степени (перекос пути), 3 на участке в кривой радиусом 1200 м и 1 на участке в кривой радиусом 589 м.

После наработки 80 млн. т брутто на всех участках была выполнена послеосадочная выправка пути, в результате чего были устранены все отступления по геометрии рельсовой колеи.

При дальнейшей наработке тоннажа в период с 80 до 203 млн. т брутто пропущенного тоннажа отступлений по геометрии рельсовой колеи на опытных участках не было выявлено, что свидетельствует о стабильном положении пути. При этом на контрольном участке в кривой радиусом 589 м после наработки 160 млн. т брутто был выявлен перекося 2-ой степени.

Также стоит отметить, что длины контрольных участков были значительно меньше опытных, соответственно, приведенное на 1 км количество отступлений на контрольных участках будет больше, чем на опытных.

Помимо этого, было проведено наблюдение за остаточными деформациями железнодорожного пути на опытных участках по данным геодезической съемки через каждые 5 м по левой и правой рельсовой нити. В процессе наблюдений было выполнено 4 серии измерений по всем участкам, в исходном состоянии после укладки, 18.03.2024 после пропуска 60 млн. т брутто, 31.05.2024 после пропуска 105 млн. т брутто и 18.06.2024 после пропуска 120 млн. т брутто. Результаты измерений в виде значений абсолютных отметок головок рельсов по левой и правой рельсовым нитям представлены на рисунках 3.16–3.21.

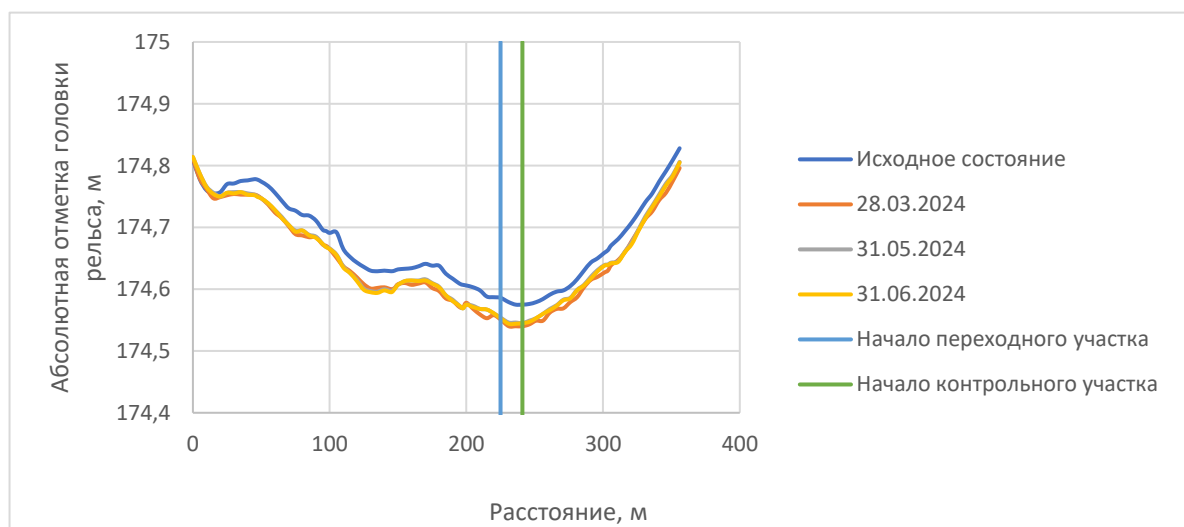


Рисунок 3.16 – Изменение абсолютных отметок головок рельса по левой рельсовой нити на первом участке

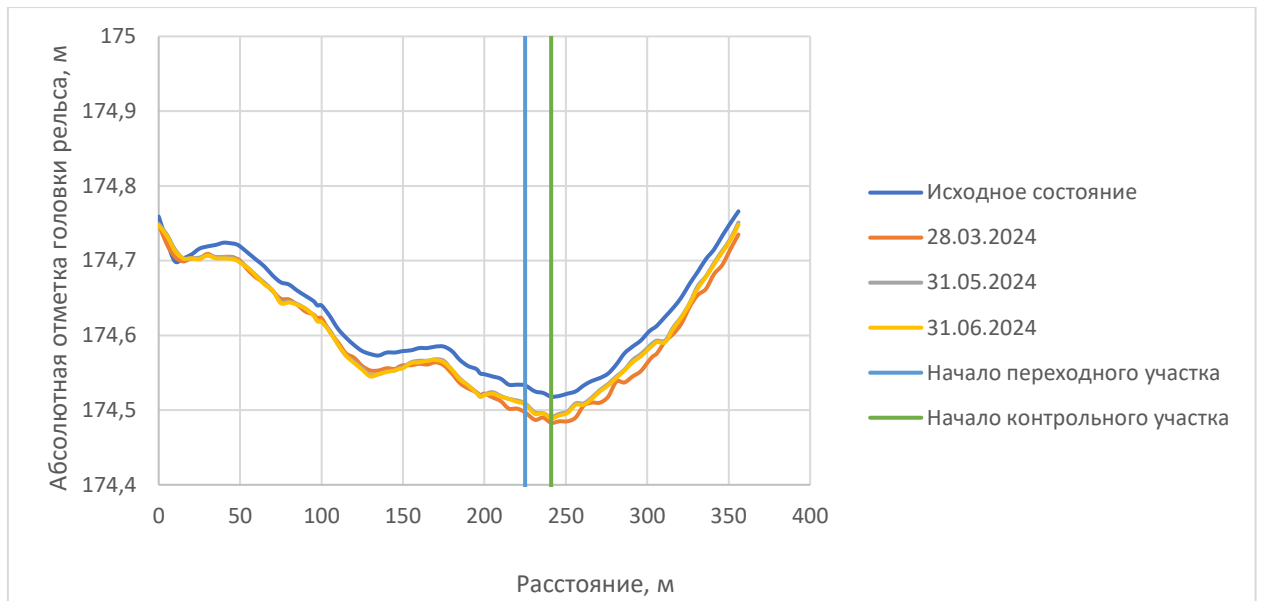


Рисунок 3.17 – Изменение абсолютных отметок головок рельса по правой рельсовой нити на первом участке

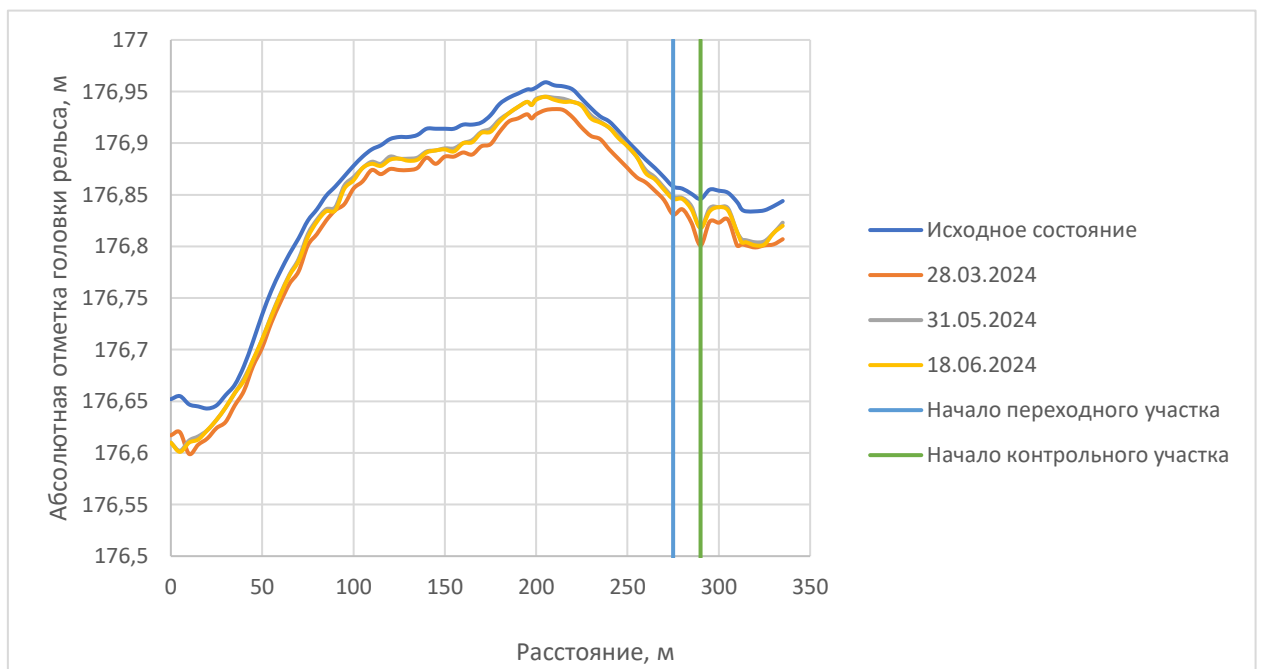


Рисунок 3.18 – Изменение абсолютных отметок головок рельса по левой рельсовой нити на втором участке

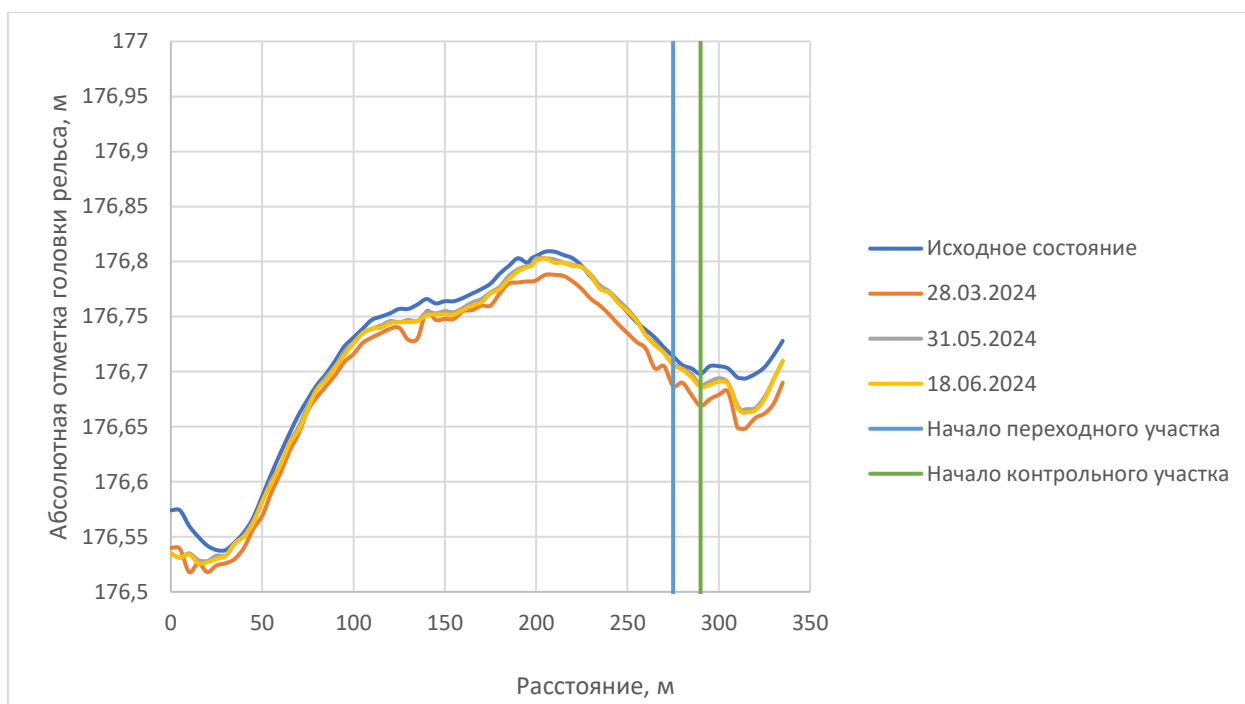


Рисунок 3.19 – Изменение абсолютных отметок головок рельса по правой рельсовой нити на втором участке

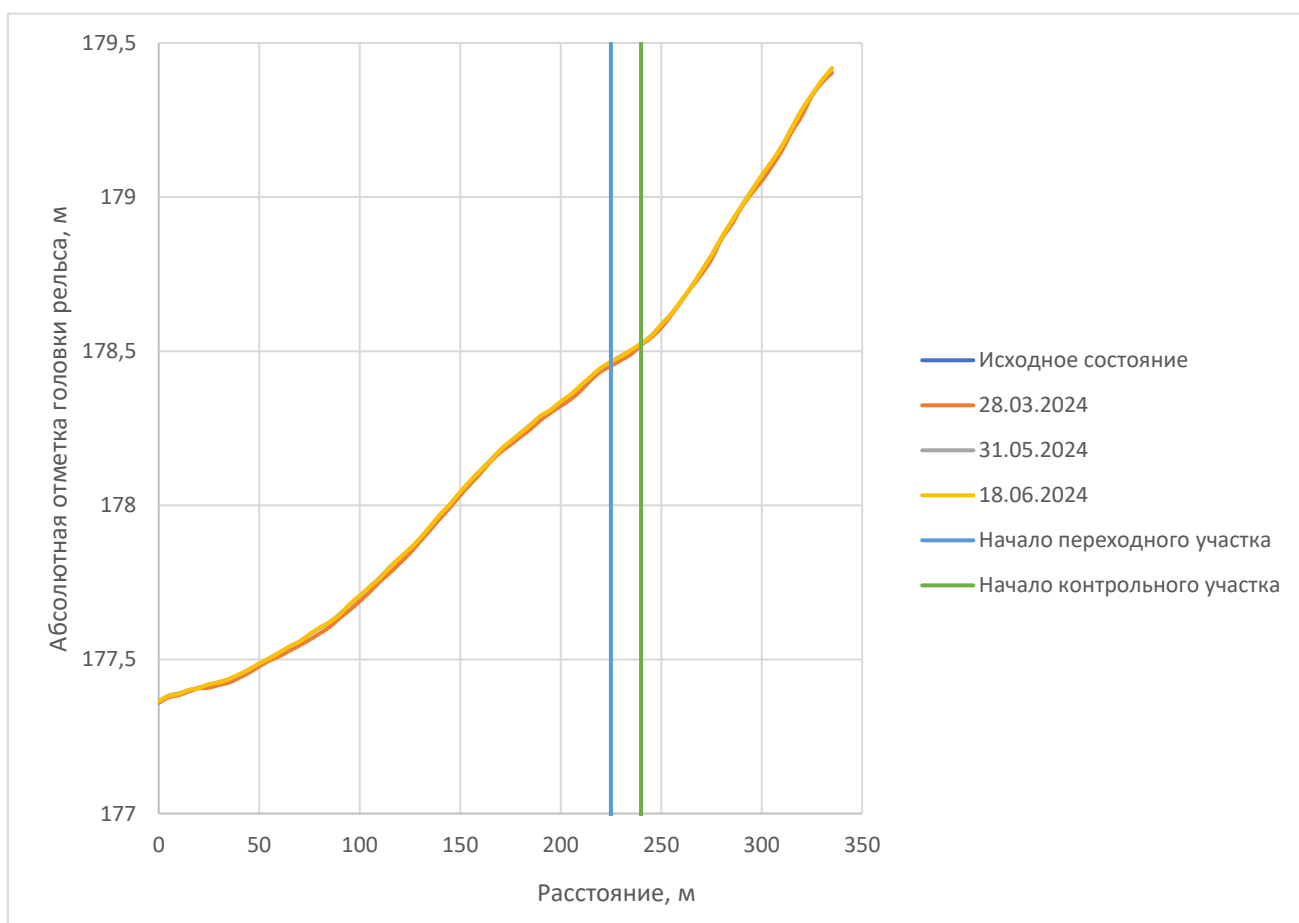


Рисунок 3.20 – Изменение абсолютных отметок головок рельса по левой рельсовой нити на третьем участке

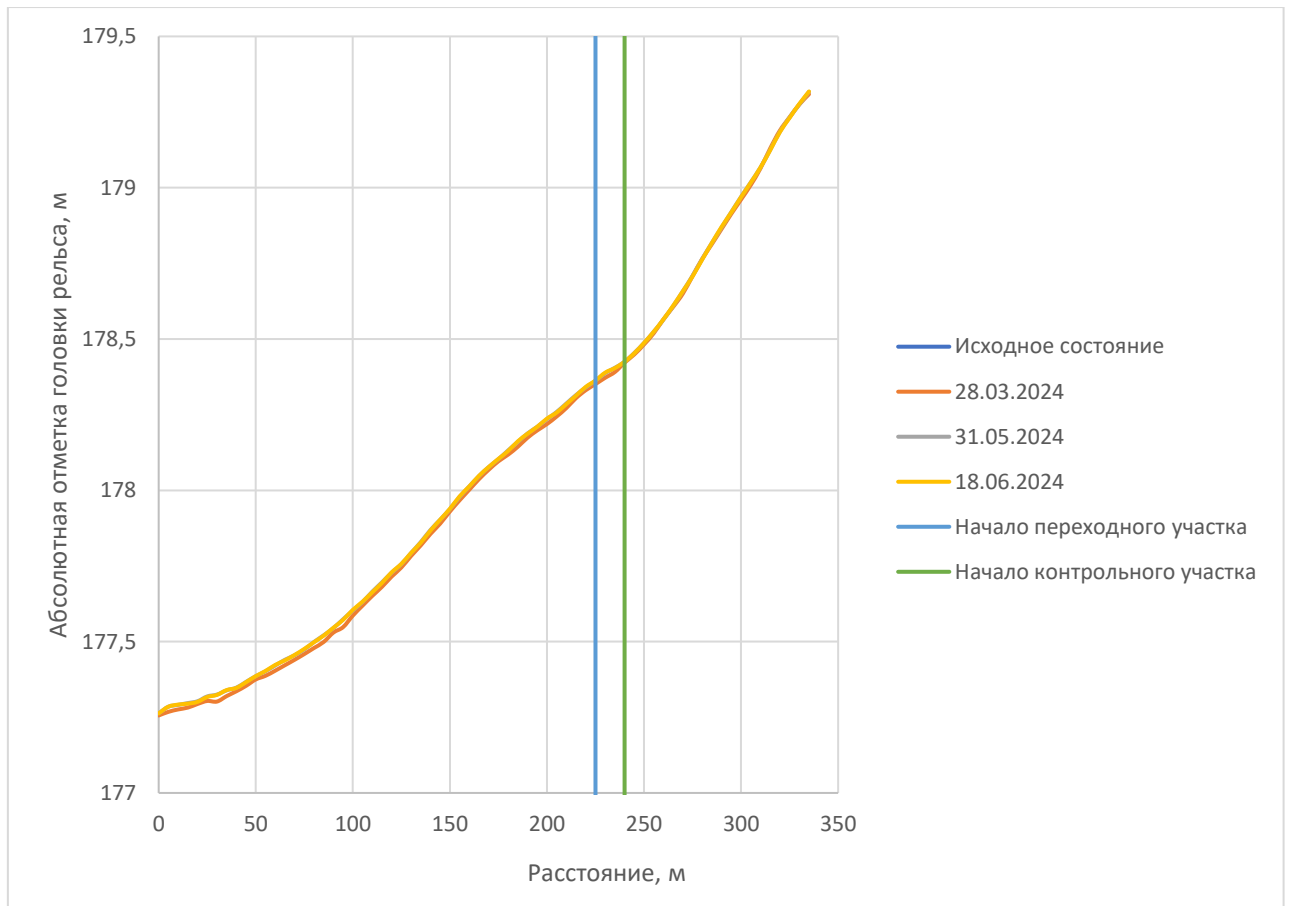


Рисунок 3.21 – Изменение абсолютных отметок головок рельса по правой рельсовой нити на третьем участке

Анализ результатов измерений показывает, что после укладки и до наработки 60 млн. т брутто пропущенного тоннажа произошла равномерная осадка рельсовых нитей на величину до 46 мм со средним значением остаточной деформации равной 25 мм, что в первую очередь связано с уплотнением балластной призмы. Дальнейшие наблюдения показывают практически полное отсутствие осадок пути, что также подтверждает его стабильность.

3.7 Выводы по разделу 3

1. Была апробирована технология устройства ПЗС методом холодного ресайклинга на ЭК. Суммарно было устроено 740 м ПЗС по технологии холодного ресайклинга толщиной от 20 до 25 см. Качество уплотнения контролировалось путем определения динамического модуля деформации E_{vd} ,

который должен был на первые сутки составлять не менее 30 МПа, что было обеспечено на всех измеряемых сечениях, кроме одного.

2. Сразу после укладки модуль деформации по верху ПЗС составил от 58,71 до 174,69 МПа, при этом среднее значение E_{v2}/E_{v1} на первом и втором участке составило 2,71 и 2,37 соответственно, что выше требований Инструкции [11] и свидетельствует о недостаточном уплотнении ПЗС. При этом, к моменту полного набора прочности модуль деформации ПЗС составил от 405,53 до 516,51 МПа с соотношением E_{v2}/E_{v1} от 1,17 до 1,33. К 7 суткам, аналогично результатам лабораторных штамповых испытаний, на всех участках обеспечивался модуль деформации не менее 80 МПа. Отметим, что участки, которые укладывались в период выпадения осадков, несмотря на неудовлетворительное уплотнение, в итоге достигли большего значения модуля деформации за счет гидратации портландцемента.

3. По полученным результатам штамповых испытаний модуль деформации материала ПЗС оказался больше значений модуля деформации по его верху, который составил от 405,53 до 516,51 МПа, что выше значений, полученных при лабораторных испытаниях (около 225 МПа) при схожих значениях прочности на сжатие, в связи с чем встает вопрос о корректности определения модуля деформации по испытаниям на одноосное сжатие. В качестве альтернативы для дальнейших работ предлагается использовать нормативные значения модуля деформации материала ПЗС в зависимости от его марки по прочности, представленные в [145].

4. При устройстве ПЗС средняя погонная выработка составила 67 м/ч с основными потерями времени, связанными с загрузкой распределителей для портландцемента и полимерного стабилизатора. При дальнейших работах по данной технологии рекомендуется применять, как минимум два распределителя для портландцемента. Помимо этого, одним из возможных способов увеличения производительности является предварительное смешение портландцемента и полимерного стабилизатора на производственных площадках до проведения работ. В случае невозможности

данного технического решения рекомендуется применять отдельный распределитель под полимерный стабилизатор. С учетом вышеуказанных рекомендаций погонная выработка производства работ по устройству ПЗС может возрасти до 118 м/ч (2832 м/сут), что опережает темпы выполнения по капитальному ремонту железнодорожного пути.

5. По измерениям геометрии рельсовой колеи на участках с опытными конструкциями ПЗС в период с начала эксплуатации брутто было выявлено 4 отступления 2-ой степени (перекос) в период до наработки 69,4 млн. т брутто, возникновение которых связано со стабилизацией балластной призмы. После проведения послеосадочной выправки пути и до наработки 205 млн. т брутто отступлений по геометрии рельсовой колеи на опытных участках не обнаружено, что свидетельствует о стабильности пути с ПЗС. В качестве альтернативного контроля стабильности пути была проведена геодезическая съемка по левой и правой рельсовой нити, по результатам которой средняя осадка при наработке 60 млн. т брутто составила 25 мм по обоим рельсовым нитям, что также связано с уплотнением балластной призмы, после чего дальнейшая осадка пути до наработки 120 млн. т брутто составила не более 3 мм, что дополнительно подтверждает стабильность пути.

6. На основе полученных результатов рекомендуется тиражирование технологии холодного ресайклинга для получения более достоверной информации по трудозатратам, технологии производства работ и наработки статистики, а также апробации приведенных рекомендаций в условиях эксплуатируемой линии.

4 Устройство подбалластного защитного слоя в условиях действующей особогрузонапряженной линии

4.1 Постановка задачи

Положительные результаты лабораторных испытаний и опытной укладки на экспериментальном кольце позволяют сделать заключение о возможности применения технологии закрепления накопленной толщи балластных материалов по методу холодного ресайклинга для устройства ПЗС. Учитывая отсутствие в настоящий момент путевой техники, способной выполнять приведенные работы, тиражирование технологии в ближайшей перспективе будет осуществляться автотракторной техникой, что потребует снятия рельсошпальной решетки.

Очевидно, что выполнение таких технологических операций как резка рельсовых плетей, демонтаж рельсошпальной решетки, вырезка балластного слоя только для устройства ПЗС нецелесообразно. В связи с данным обстоятельством, предлагается рассмотреть возможность устройства ПЗС при выполнении работ по капитальному ремонту железнодорожного пути. В рамках выполнения поставленной задачи необходимо рассмотреть вопросы по проектированию ПЗС, связанные с анализом материала накопленной толщи балласта, подбора состава добавок и расчета толщины ПЗС, применимости технологических решений, принятых при укладке на ЭК с отработкой приведенных рекомендаций и возможной их корректировкой по результатам укладки, проведение замеров затрат труда на производство работ для дальнейшей технико-экономической оценки технологии и получение исходных данных для корректировки существующей нормативно-технической документации.

4.2 Характеристика участка

Для проверки применения ПЗС по методу холодного ресайклинга, возможной корректировки технологии производства работ для условий действующей железнодорожной линии, участок планового капитального ремонта пути на перегоне Заозерная – Камала Красноярской железной дороги, имеющей следующие основные характеристики:

- длина участка 2800 м;
- специализация линии – особогрузонапряженная;
- грузонапряженность 121,6 млн. ткм/км брутто в год;
- рельсы Р65;
- шпалы железобетонные, эпюра шпал 2000 шт./км;
- бесстыковой путь с отдельными местами рельсовых рубок;
- последний капитальный ремонт проведен в 2008 году;
- последний средний ремонт со сменой рельсов проведен в 2017 году;
- 70 % участка с загрязнением балласта выше 30 %;
- наличие слоя старогоднего балласта на глубину от 0,6 до 1,0 м ниже проектного уровня основной площадки земляного полотна;
- насыпи высотой до 9 м, выемки глубиной до 15 м;

На участке запланировано провести капитальный ремонт на новых материалах с устройством ПЗС по методу холодного ресайклинга на длине 2400 м.

4.3 Проектирование подбалластного защитного слоя

Проектирование ПЗС включало в себя следующую последовательность операций:

- проведение штамповых испытаний в уровне 40 см ниже подошвы шпал с целью определения необходимости устройства ПЗС;
- отбор образца старогодних балластных материалов;

- проведение лабораторных испытаний с целью подбора состава, возможная модификация гранулометрического состава;

- назначение толщины ПЗС.

В первую очередь на участке была проведена серия из 10 штамповых испытаний по методике, представленной в подразделе 3.1. Результаты штамповых испытаний приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты штамповых испытаний до укладки ПЗС

Участок	E_{v1} , МПа	E_{v2} , МПа	E_{v2}/E_{v1}
4269 ПК6+50	28,12	71,43	2,54
4269 ПК9+50	27,86	79,13	2,84
4270 ПК2+50	24,53	70,31	2,87
4270 ПК5+50	37,61	83,64	2,22
4270 ПК8+60	32,00	75,89	2,37
4271 ПК1+50	21,37	58,06	2,72
4271 ПК4+50	26,27	82,31	3,13
4271 ПК7+50	34,59	79,52	2,30
4272 ПК0+50	27,77	69,43	2,50
4272 ПК3+50	23,00	68,23	2,97
Среднее	28,3	73,8	2,64

При рассмотрении результатов испытаний видно, что только в 2 точках из 10 достигается требуемый модуль деформации более 80 МПа, при этом соотношение E_{v2}/E_{v1} на всех исследуемых сечениях получилась больше 2,2, что в соответствии с Инструкцией [11] требует устройства подбалластного защитного слоя.

Для оценки возможности закрепления накопленной толщи балластных материалов добавками портландцемента и полимерного стабилизатора с вышеуказанного участка были отобраны пробы грунта на глубине от 30 до 50 см ниже подошвы шпалы. Отбор образцов происходил в 5 равномерно распределенных по длине участка точках. Суммарная масса отобранной пробы

– около 200 кг. Отбор образца старогодных балластных материалов представлен на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Отбор образца старогодного балластного материала

После отбора образца была составлена объединенная проба со всех сечений и проведен рассев с целью определения гранулометрического состава. Гранулометрический состав объединенной пробы представлен на рисунке 4.2.

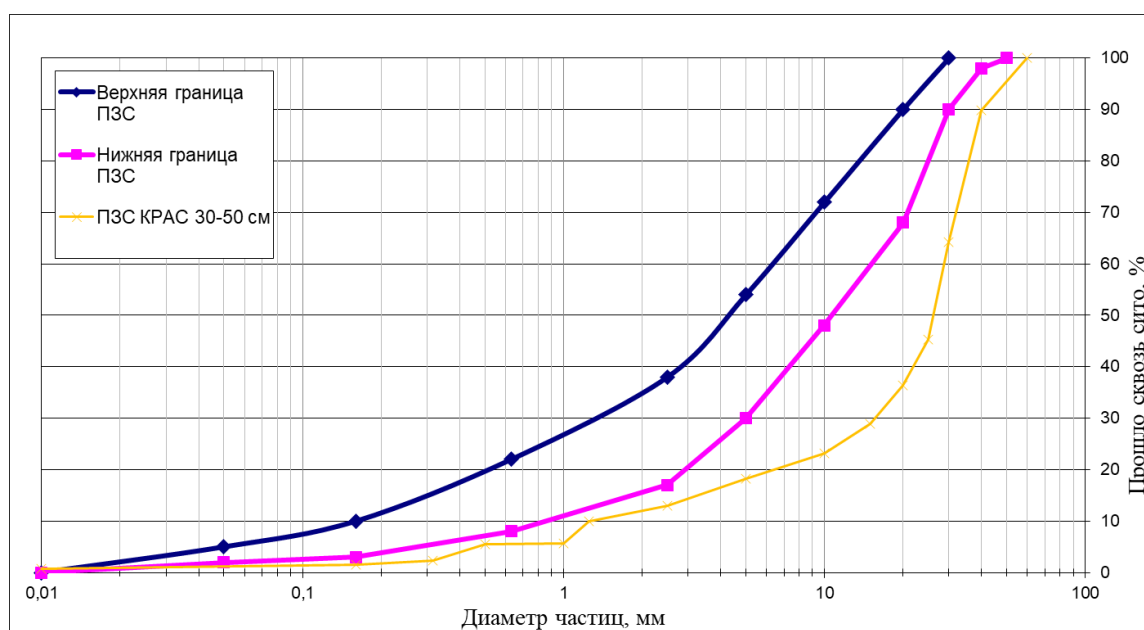


Рисунок 4.2 – Гранулометрический состав отобранного образца с глубины от 30 до 50 см ниже подошвы шпалы

По анализу результатов по определению гранулометрического состава, в отобранном образце имеется недостаток частиц фракции размером до 20 мм, которые требуются для создания структуры ПЗС с необходимой плотностью упаковки частиц, в связи с чем, принято решение обогатить существующий гранулометрический состав щебеночно-песчаными смесями.

За целевое значение гранулометрического состава был принят состав, полученный на ЭК, показавший удовлетворительные результаты. Анализ кривой исходного зернового состава на данном участке показал, что наиболее подходящим вариантом для модификации является добавление 28 % по массе смеси С6 по ГОСТ 25607 [137], исходя из следующих факторов:

- гранулометрический состав смеси С6, состоящий из фракций 0–20 мм, которой недостаточно в исходной смеси отобранного образца;
- наиболее близкая кривая гранулометрического состава к составу ПЗС, полученному на ЭК;
- экономия затрат на закупку материала от 10 до 15 % в сравнении со смесью С7, примененной на ЭК.

Подобранный (модифицированный) гранулометрический состав представлен на рисунке 4.3.

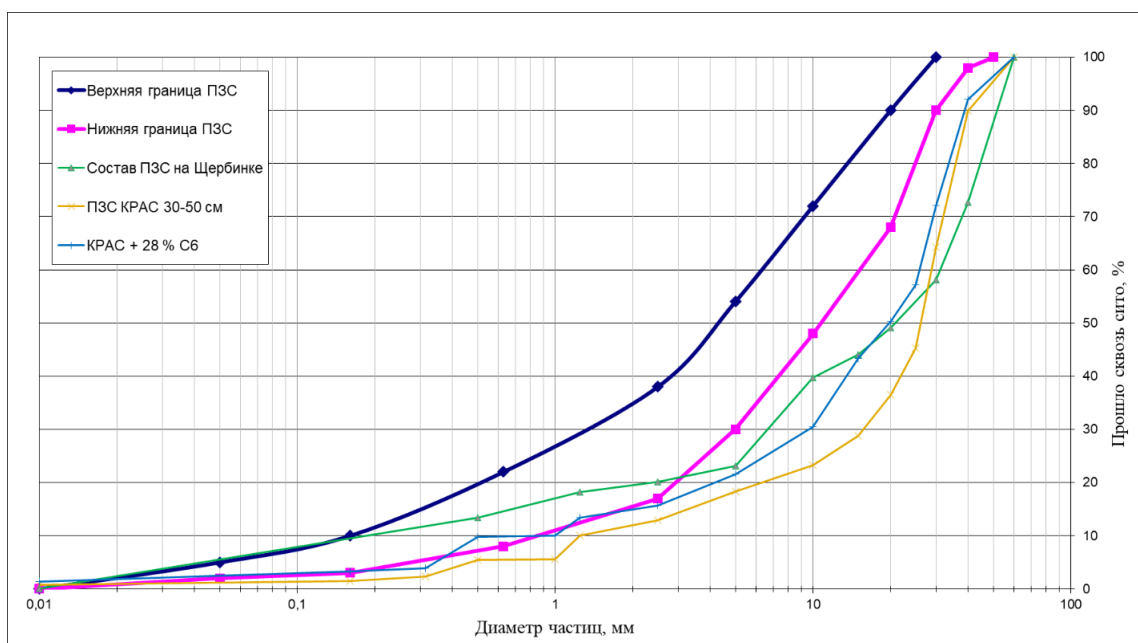


Рисунок 4.3 – Подобранный гранулометрический состав ПЗС

Для модифицированного гранулометрического состава были проведены испытания по подбору добавок портландцемента и полимерного стабилизатора. В качестве полимерной добавки для повышения трещиностойкости и долговечности получаемого слоя использовались два варианта добавок – «Никофлок» и «ПМД». Процентное содержание цемента при испытаниях принималось равным 3, 4 и 5 % от массы грунта. Содержание полимерных добавок принималось равным 0,15 % от массы грунта (5 % от массы цемента), так как по результатам предыдущих испытаний дальнейшее увеличение содержания стабилизатора не давало заметного роста свойств получаемого материала. Образцы с добавкой «Никофлок» испытывались при добавлении 3, 4, 5 % цемента от массы грунта, образцы с добавкой «ПМД» испытывались с добавлением 3 % цемента от массы грунта для сравнения получаемых характеристик с добавкой «Никофлок» и дальнейшего распространения результатов на образцы с 4 и 5 % содержания цемента от массы грунта. Образцы отобранного грунта с модифицированным гранулометрическим составом с добавлением цемента и полимерных добавок были испытаны на сжатие в водонасыщенном состоянии в возрасте 7 (для оценки первоначального набора прочности) и 28 суток (для оценки характеристик смеси после набора прочности), а также на морозостойкость после воздействия 10 циклов и растяжение при расколе в возрасте 28 суток. Результаты испытаний представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты испытаний по подбору состава добавок

№ серии образцов	Содержание портландцемента, %	Тип стабилизатора	Прочность на сжатие в возрасте 7/28 суток, МПа	Прочность на раскол в возрасте 28 суток, МПа	Кэф. морозостойкости
1	3	Никофлок	5,52/9,95	0,70	0,77
2	4	Никофлок	7,21/11,07	0,84	0,74
3	5	Никофлок	5,56/11,13	0,88	0,94
4	3	ПМД	7,06/11,09	0,97	0,92

Оптимальная влажность образцов во всех случаях составила 5,5 %, максимальная плотность – 2,33 г/см³.

По результатам испытаний за основной вариант был принят состав с 3 % портландцемента от массы грунта и 0,15 % полимерной добавки «ПМД», так как данный состав показал результаты лучше по прочности и морозостойкости, чем аналогичный по количеству портландцемента с добавкой «Никофлок», который обеспечивает подобные свойства только при 5 % содержания портландцемента от массы грунта, что экономически менее выгодно, учитывая схожую стоимость и расход полимерной добавки. По классификации ГОСТ 70452 [141] полученный состав имеет марку по прочности М80Б. Ввиду того, что полученная прочность образцов сопоставима с результатами, полученными при подборе состава добавок на ЭК, а также при лабораторных испытаниях, можно сделать вывод о схожести свойств материала ПЗС. В связи с этим, для обеспечения модуля деформации по верху ПЗС не менее 80 МПа назначим минимально возможную его толщину, равную 20 см.

4.4 Укладка полдбалластного защитного слоя

Исходя из ограниченного времени на производство работ в технологическое «окно», процесс устройства ПЗС методом холодного ресайклинга претерпел определенные изменения относительно процесса на ЭК АО «ВНИИЖТ», а именно процесс добавления ЩПС, который было предложено вносить по торцам шпал после вырезки балластного слоя машиной типа ЩОМ, на старогодную рельсошпальную решетку с применением хоппер-дозаторных вагонов (представлено на рисунке 4.4).



Рисунок 4.4 – Отсыпка смеси ЩПС из хоппер-дозаторных вагонов

Также, исходя из максимальной ширины вырезки балласта машиной ЩОМ-2000 5 м и ширины рабочих органов ресайклера и распределителя вяжущих 2,4 м, для сокращения количества проходов машин для устройства ПЗС было предложено, уменьшить ширину ПЗС до 4,8 м. Помимо этого была учтена рекомендация, данная в разделе 3 в части количества распределителей вяжущих, а именно для распределения портландцемента были взяты два распределителя, и отдельный распределитель для полимерной добавки, загрузка которых производилась с применением крана-манипулятора на базе машины КАМАЗ 43118 из биг-бэгов вместо автоцементовоза, примененного на ЭК (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 – Загрузка распределителей вяжущих

В остальной части технологический процесс был аналогичен примененным на ЭК и представленным в разделе 3 и включал в себя:

- вертикальную планировку и распределение ЩПС с помощью грейдера или бульдозера;
- распределение вяжущего материала и полимерного стабилизатора с применением распределителя вяжущих;
- перемешивание полученного слоя с применением ресайклера на глубину 25 см (с технологическим запасом на уплотнение грунта);
- уплотнение кулачковым катком с включенным режимом вибрации, при заднем ходе режим вибрации отключался;
- профилирование слоя ПЗС с применением грейдера;
- окончательное уплотнение гладковальцовым катком с включенным режимом вибрации, при заднем ходе режим вибрации также отключался.

Работы по ПЗС были распланированы по 5-ти «окнам» продолжительностью 24 ч последовательно в следующие периоды:

- 300 м в кривой радиусом 424 м – 19.09.2024;
- 500 м в кривой радиусом 615 м – 23.09.2024;
- 600 м в кривой радиусом 422 м – 26.09.2024;
- 550 м в кривой радиусом 415 м – 30.09.2024;
- 450 м в кривой радиусом 612 м – 03.10.2024.

Перед началом проведения работ на первом участке были отобраны пробы загрязненного щебня и ЩПС и определены их естественные влажности, которые составили 7,7 % для загрязненного щебня и 2,3 % для ЩПС, что дает суммарную влажность смеси в 6,5 % (определяется по формуле ГОСТ 25607 [137], что на 1 % больше оптимальной влажности смеси, и является удовлетворительным для нормальной гидратации цемента).

При выполнении работ на первом «окне», с учетом задержки по времени работы машины ЩОМ-2000, работы по устройству ПЗС начались только через 14 часов после его начала вследствие чего было принято решение о сокращении объема работ устройства ПЗС методом холодного ресайклинга до 100 м с устройством переходного участка длиной не менее 15 м, для недопущения передержки «окна».

Качество уплотнения контролировалось путем определения динамического модуля деформации E_{vd} , который должен составлять не менее 30 МПа на момент укладки, исходя из опыта, полученного при укладке ПЗС на ЭК.

При двух проходах кулачкового и гладковальцового катков по одному следу, при недостаточной влажности материала ПЗС, в некоторых сечениях участка динамический модуль деформации оказался меньше 30 МПа и составил от 22,98 до 29,88 МПа, вследствие чего был назначен дополнительный проход гладковальцового катка, после чего на всем протяжении участка модуль деформации составил от 30,04 до 38,4 МПа. Средняя влажность слоя ПЗС до уплотнения оказалась равной 4,66 %, после уплотнения – 4,36 %.

На втором «окне» аналогично были отобраны пробы перед укладкой ПЗС и определены влажности загрязненного щебня и ЩПС, которые оказались равны 5,45 и 1,97 % соответственно. Влажность перемешенного слоя ПЗС до уплотнения по результатам измерения составляла 4,85 %.

Для обеспечения динамического модуля деформации ПЗС E_{vd} не менее 30 МПа было принято решение о необходимости выполнении трех проходов кулачкового и трех проходов гладковальцового катков по одному следу в одну сторону. После шести проходов катков данное значение было достигнуто на всех сечениях второго участка. Средняя влажность после укладки ПЗС составила 3,68 %.

По результатам испытаний смеси ПЗС было отмечено высыхание слоя ПЗС в процессе укладки, что приводило к ухудшению параметров уплотнения. Помимо этого, отмечено неравномерное распределение ЩПС автогрейдером, вследствие чего наблюдались отдельные места с большим количеством крупных фракций на поверхности ПЗС (рисунок 4.6).

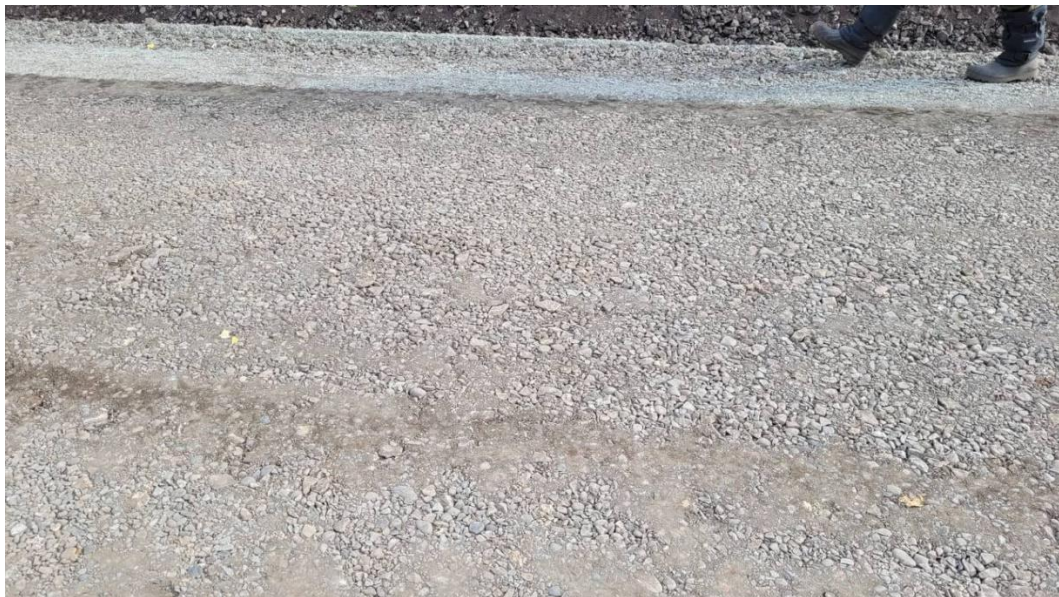


Рисунок 4.6 – Неравномерность поверхности ПЗС

Для улучшения параметров уплотнения смеси ПЗС на третьем и последующих «окнах» была обеспечена поливка слоя ПЗС водой в процессе уплотнения. До укладки влажность загрязненного щебня и ЩПС составила 3,87 и 2,2 % соответственно, после поливки водой средняя влажность слоя

ПЗС составила 5,67 %, что близко к оптимальной влажности. После окончательного уплотнения влажность слоя ПЗС составила 4,94 %.

Для решения проблемы неравномерности поверхности ПЗС начиная с третьего «окна» россыпка ЩПС велась не только по торцам шпал, но и внутрь рельсовой колеи, в результате чего, после прохода ресайклера и уплотнения поверхность ПЗС стала более однородной (рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 – Поверхность ПЗС при распределении ЩПС по торцам шпал и внутрь колеи

Помимо вышеизложенного, на участке № 5 в качестве отработки одного из возможных вариантов технологии проводилось уплотнение только гладковальцовыми катками с учетом проведения работ по увлажнению материала ПЗС.

Сводные параметры уплотнения ПЗС, разбитые по участкам представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Сводные параметры уплотнения ПЗС

№ окна	Влажность ПЗС до уплотнения, %	Влажность ПЗС после уплотнения, %	E_{vd}^{cp} , МПа
1	4,66	4,36	35,63
2	4,85	3,68	35,48

№ окна	Влажность ПЗС до уплотнения, %	Влажность ПЗС после уплотнения, %	E_{vd}^{cp} , МПа
3	5,67	4,94	36,78
4	3,94	4,26	37,97
5	4,15	4,2	38,76

В процессе укладки фиксировалось время на выполнение технологических операций, по результатам которого средний темп по устройству ПЗС составил 111 м/ч.

Для каждого участка на первые и третьи сутки после укладки были проведены штамповые испытания. Сводные результаты штамповых испытаний, разбитые по участкам представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Сводные результаты штамповых испытаний

№ окна	1-е сутки			3-е сутки		
	E_{v1}	E_{v2}	E_{v2}/E_{v1}	E_{v1}	E_{v2}	E_{v2}/E_{v1}
1	33,17	75,88	2,29	76,8	173,04	2,25
2	30,82	83,89	2,72	85,1	190,54	2,24
3	37,46	93,32	2,49	73,25	165,12	2,25
4	47,45	99,54	2,10	74,49	146,57	1,97
5	43,26	91,06	2,10	71,15	156,45	2,20
Среднее	38,43	88,74	2,34	76,16	166,34	2,18

По анализу результатов испытаний, представленных в таблицах 4.3–4.4 можно сделать вывод об эффективности приведенных рекомендаций по показателям среднего динамического модуля деформации E_{vd}^{cp} по участкам, который показал рост на величину от 3 до 9 % на участках № 3–5 по сравнению с участками № 1–2. Помимо этого, статический модуль деформации так же повысился на этих участках на величину до 18 % относительно первых двух участках. Стоит отметить, что применение только гладковальцовых катков несущественно снизило показатель статического модуля деформации, при

этом средний динамический модуль деформации показал наибольшие значения по всем участкам. Сразу после уплотнения слоя ПЗС на 4 из 5 участках был обеспечен требуемый модуль деформации по верху ПЗС не менее 80 МПа, а к 3-им суткам данное требование было выполнено на всех участках укладки ПЗС.

4.5 Выводы по разделу 4

1. Для опытного применения на участке ремонта особо грузонапряженного пути Красноярской железной дороги, исходя из анализа его условий, были выбраны параметры ПЗС из старогоднего балластного материала с обработкой вяжущим с полимерными добавками, на основе лабораторных испытаний подобран состав вяжущего и полимерной добавки и разработан опытный технологический процесс по его устройству в технологическое «окно» с его корректировкой относительно ранее разработанного процесса для ЭК в г. Щербинка.

2. Были проведены работы по внедрению технологии холодного ресайклинга с применением автотракторной техники в условиях действующей инфраструктуры.

3. Предложенные корректировки технологии по назначению увлажнения материала ПЗС и использованию метода рассыпки ЩПС позволили улучшить качество работ по устройству ПЗС в части его уплотнения, о чем свидетельствуют результаты испытаний на участках № 3–5, на которых модуль деформации на первые сутки показал характеристики выше, чем на участках № 1–2 (до применения мер) на 18 %.

4. Проверка применения для уплотнения только гладковальцовых катков, при условии обеспечения требуемой влажности материала ПЗС, показала достаточность обеспечения показателя модуля деформации, что позволяет проводить уплотнение слоя ПЗС только ими.

5. По результатам замеров времени на выполнение технологических операций по устройству ПЗС средняя производительность работ составила

111 м/ч. Полученные темпы укладки ПЗС превосходят результаты, полученные на ЭК на 65 %, а также оказались близки к прогнозным 118 м/ч, при этом, стоит отметить, что в технологический процесс была добавлена дополнительная операция увлажнения слоя ПЗС.

6. Одним из важных факторов, определяющим качество устройства ПЗС, является его влажность при уплотнении, которая должна быть близка к оптимальной. Данное обстоятельство следует учитывать при разработке путевых машин для тиражирования приведенной технологии, которые должны предусматривать возможность увлажнения материала ПЗС.

5 Разработка требований к подбалластному защитному слою из старогодных балластных материалов с применением вяжущих

5.1 Постановка задачи

Полученные данные по результатам лабораторных испытаний и опытных укладок конструкции позволяют сделать вывод о возможности применения технологии закрепления накопленной толщи старогодных балластных материалов для устройства ПЗС по методу холодного ресайклинга. Следующим шагом исследования являлось решение задач по установлению требований к конструкции ПЗС для возможности ее дальнейшего тиражирования. В соответствии с Инструкцией [11] основным требованием к конструкции ПЗС является обеспечение требуемого модуля деформации по его верху, что может быть достигнуто за счет материала и толщины ПЗС, а также его армирования геосинтетическими материалами. Ввиду того, что использование последних в рассматриваемой технологии невозможно, главными факторами для обеспечения требуемого модуля деформации по верху ПЗС являются толщина и свойства его материала. Учитывая, что модули деформации закрепленного материала ПЗС значительно выше типовых ЩПГС, предлагается разработать методику для оценки модуля деформации по верху ПЗС и определить его рекомендуемые толщины из закрепленного материала для обеспечения требуемого модуля деформации в зависимости от категории железнодорожной линии аналогично таблице 4.3 [11].

Помимо этого, с учетом полученных высоких значений модуля деформации ПЗС на ЭК и на участке Заозерная–Камала Красноярской железной дороги, встает вопрос о том, вызывает ли данный параметр негативный эффект, связанный с повышением напряжений в рельсах и балластном слое из-за избыточной жесткости железнодорожного пути и

необходимо ли ее компенсировать за счет применения в конструкции дополнительных упругих элементов.

5.2 Назначение рекомендуемых толщин подбалластного защитного слоя из закрепленного материала по условию деформативности

5.2.1 Разработка методики назначения толщины подбалластного защитного слоя

5.2.1.1 Расчет приведенного модуля деформации

В рамках разработки методики по определению необходимой толщины ПЗС основной целью является обеспечение нормативного модуля деформации по верху ПЗС, который определяется по результатам штамповых испытаний.

Поскольку основание для штамповых испытаний при наличии ПЗС всегда является многослойным (как минимум двухслойным) в расчете модуль деформации по верху ПЗС является характеристикой такого многослойного основания, а не материала отдельного слоя и такой модуль может быть назван приведенным.

Для расчета приведенного модуля по поверхности основной площадки предложено использовать методику СП 22.133330 [142] по расчету осадки основания под фундаментом круглой формы, что имитирует штамповые испытания с определением модуля E_{v2} . Согласно СП 22.13330 [142] величина осадки под одиночным фундаментом S определяется по формуле

$$S = \beta \sum \frac{\sigma_i h_i}{E_{vi}}, \quad (5.1)$$

где β – безразмерный коэффициент, равный 0,8;

σ_i – среднее вертикальное нормальное напряжение от фундамента под его центром в i -ом слое грунта;

h_i – толщина i -го слое грунта, принимаемая не более 0,4 ширины фундамента;

E_{vi} – модуль деформации i -го слоя грунта по вторичной ветви нагружения из штамповых испытаний (E_{v2} – по международной классификации).

Величина приведенного модуля основания может быть найдена из условия равенства осадки под штампом разнородной толщи и приведенной однородной

$$\sum \frac{\sigma_i h_i}{E_{vi}} = \sum \frac{\sigma_i h_i}{E_{v2пр}}, \quad (5.2)$$

где $E_{v2пр}$ – условный приведенный модуль грунтовой толщи под штампом, при котором осадка составит величину S .

Тогда приведенный модуль деформации можно найти по формуле

$$E_{v2пр} = \frac{\sum \sigma_i h_i}{\sum \frac{\sigma_i h_i}{E_{vi}}}, \quad (5.3)$$

Напряжения под центром фундамента по глубине σ_i можно найти по формуле (5.17) СП 22.13330 [142]

$$\sigma = \alpha p, \quad (5.4)$$

где α — коэффициент, принимаемый по таблице 5.8 СП 22.13330 [142] в зависимости от относительной глубины ξ , равной $2z / b$;

p — среднее давление под подошвой фундамента (под штампом), кПа.

Тогда формула для $E_{v2пр}$ через α , приобретает следующий вид

$$E_{v2пр} = \frac{\sum \alpha_i h_i}{\sum \frac{\alpha_i h_i}{E_i}}, \quad (5.5)$$

Если величину толщины слоя принять постоянной, то формула (1.5) еще упрощается и окончательно

$$E_{v2пр} = \frac{\sum \alpha_i}{\sum \frac{\alpha_i}{E_i}} \quad (5.6)$$

Толщина слоя h_i при расчете осадки под фундаментом должна быть согласно СП 22.13330 [142] не более 0,4 ширины подошвы фундамента. Если принять, что диаметр штампа для испытаний на основной площадке согласно Инструкции [1] составляет 0,3 м, то толщина слоя должна быть принята не более 0,12 м. С учетом того, что минимальная толщина ПЗС равняется 0,2 м, для обеспечения постоянной толщины слоя h_i в расчетах назначить ее равной 0,1 м.

В соответствии с таблицей 5.8 СП 22.13330 [142] сжимаемая толща, определяемая по формуле $\xi = 2z / b$ для круглого штампа с диаметром 0,3 м, составляет 1,8 м.

Для валидации приведенной методики 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 58,06 МПа.

Данное сечение имело следующий геологический разрез (от низа подошвы шпалы):

- щебенистый грунт фракции до 80 мм толщиной 0,6 м;
- галечниковый грунт с песчаным заполнителем толщиной 0,9 м;
- песок средней крупности маловлажный плотный толщиной 0,2 м;
- суглинок полутвердый с примесями органического вещества толщиной 1,7 м.

По результатам инженерно-геологических изысканий [143], а также результатов ранее проведенных исследований [98, 144] были приняты характеристики грунтов, представленные в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Характеристики грунтов для расчета приведенного модуля деформации

Грунт	Модуль деформации E , МПа
Щебенистый грунт фракции до 80 мм	65,0
Галечниковый грунт с песчаным заполнителем	57,0
Песок средней крупности маловлажный плотный	39,0
Суглинок полутвердый с примесями органического вещества	24,0

Результаты расчета приведенного модуля деформации представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты расчета модуля деформации в уровне 40 см ниже подошвы шпалы

h , м	E_i , МПа	α_i	α_i/E
0,05	65	0,957	0,0147
0,15	65	0,6515	0,0100
0,25	57	0,372	0,0065
0,35	57	0,225	0,0039
0,45	57	0,147	0,0026
0,55	57	0,103	0,0018
0,65	57	0,0753	0,0013
0,75	57	0,0646	0,0011
0,85	57	0,0445	0,0008
0,95	57	0,0367	0,0006
1,05	57	0,0295	0,0005
1,15	39	0,0236	0,0006
1,25	39	0,0212	0,0005
1,35	24	0,018	0,0008
1,45	24	0,0158	0,0007
1,55	24	0,0142	0,0006
1,65	24	0,0125	0,0005
1,75	24	0,0108	0,0005
Сумма		2,8222	0,0481

$$E_{v2np} = \frac{\sum \alpha_i}{\sum \frac{\alpha_i}{E_i}} = \frac{2,8222}{0,0481} = 58,6 \text{ МПа}$$

Полученное значение практически полностью сходится с результатами штамповых испытаний с разницей в 1 %. Проведем аналогичный расчет с учетом устроенного ПЗС толщиной 0,2 м, где штамповый модуль на участке составил 146,57 МПа к 3 суткам набора прочности. В соответствии с маркой материала ПЗС по прочности М70Б, его нормативный модуль деформации составляет 870 МПа [145], однако, с учетом того, что штамповые испытания проводились в возрасте 3 суток набора прочности, а приведенная марка соответствует 28 суткам набора прочности предлагается искусственно занижить характеристики материала до 40 % от проектной прочности [146]. В данном случае прочность на сжатие составит 4,4 МПа, а прочность на растяжение при расколе 0,38 МПа. Полученные значения близки к марке материала М40 для которой модуль деформации составляет 600 МПа [145], что и было принято для расчета. Результаты расчета приведенного модуля деформации представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты расчета приведенного модуля деформации по верху ПЗС в возрасте 3 суток

<i>h</i> , м	<i>E_i</i> , МПа	<i>α_i</i>	<i>α_i/E</i>
0,05	600	0,957	0,0016
0,15	600	0,6515	0,0011
0,25	65	0,372	0,0057
0,35	57	0,225	0,0039
0,45	57	0,147	0,0026
0,55	57	0,103	0,0018
0,65	57	0,0753	0,0013
0,75	57	0,0646	0,0011
0,85	57	0,0445	0,0008
0,95	57	0,0367	0,0006
1,05	57	0,0295	0,0005

$h, \text{ м}$	$E_i, \text{ МПа}$	α_i	α_i/E
1,15	39	0,0236	0,0006
1,25	39	0,0212	0,0005
1,35	24	0,018	0,0008
1,45	24	0,0158	0,0007
1,55	24	0,0142	0,0006
1,65	24	0,0125	0,0005
1,75	24	0,0108	0,0005
Сумма		2,8222	0,0248

$$E_{v2np} = \frac{\sum \alpha_i}{\sum \frac{\alpha_i}{E_i}} = \frac{2,8222}{0,0248} = 113,9 \text{ МПа}$$

Расчетное значение приведенного модуля деформации по верху ПЗС оказалось на 28,6 % ниже значения, полученного при испытаниях, в связи с чем была выдвинута гипотеза о возможном изменении коэффициента затухания напряжений α_i или уменьшении глубины сжимаемой толщи при наличии ПЗС из закрепленного материала, что должно повысить получаемое расчетное значение модуля деформации.

5.2.1.2 Разработка расчетной модели

Для проверки гипотезы, поставленной в предыдущем пункте, было проведено моделирование штамповых испытаний в программном комплексе «Plaxis 2D».

В целях сокращения трудозатрат на выполнение расчетов была выбрана осесимметричная модель, в которую был заложен аналогичный геологический разрез. Ввиду отсутствия на рассматриваемом сечении слабых грунтов, поведение грунтов земляного полотна было задано в соответствии с моделью Мора-Кулона. Материал ПЗС описывался линейно-упругой моделью. Характеристики грунтов представлены в таблице 5.4. Дополнительные прочностные характеристики грунтов были назначены в соответствии с данными [143, 147].

Таблица 5.4 – Характеристики грунтов для расчета

Грунт	Модуль деформации E , МПа	Удельное сцепление c , МПа	Угол внутреннего трения φ , °	Коэффициент Пуассона ν
Материал ПЗС	870,0/600,0	—	—	0,25
Щебенистый грунт фракции до 80 мм	65,0	41,0	52,0	0,25
Галечниковый грунт с песчаным заполнителем	57,0	5,0	43,0	0,25
Песок средней крупности маловлажный плотный	39,0	2,0	38,0	0,3
Суглинок полутвердый с примесями органического вещества	24,0	25,0	23,0	0,3

С учетом того, что заложенные в модель модули деформации описывают поведение материала на второй ветви нагружения, моделирование выполнялось путем последовательного нагружения от 0 до 0,08 МПа с шагом в 0,02 МПа, что имитирует вторую ветвь нагружения при штамповых испытаниях. Общий вид модели представлен на рисунке 5.1.

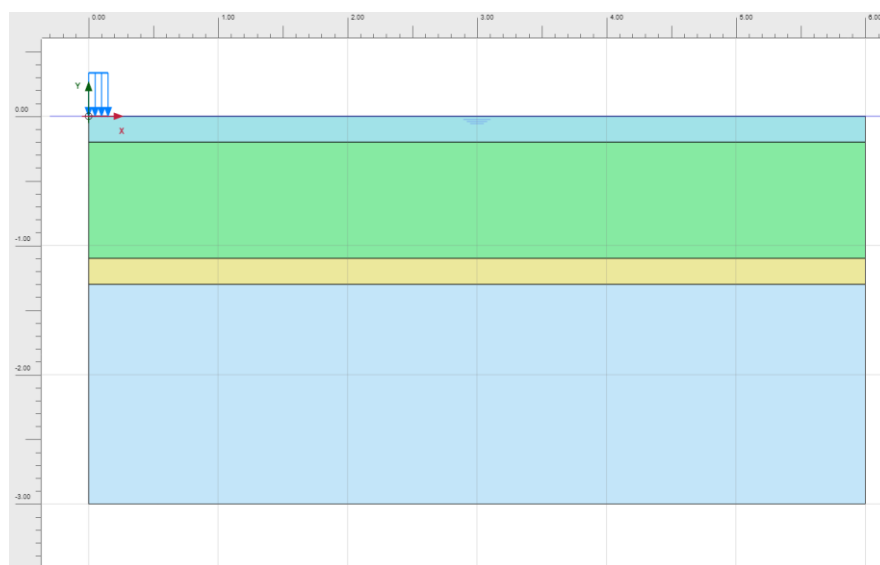


Рисунок 5.1 – Общий вид модели для расчета модуля деформации

Было принято 3 расчетных случая:

- штамповые испытания до устройства ПЗС (№ 1);
- штамповые испытания после устройства ПЗС в возрасте 3 суток (№ 2);
- штамповые испытания после устройства ПЗС в проектном возрасте для оценки влияния модуля деформации материала ПЗС на коэффициент затухания напряжений α_i и глубину сжимаемой толщи (№ 3).

Расчет модуля деформации по верху проводился путем получения значения перемещения штампа на каждом из этапов расчета с построением графика осадки штампа (рисунок 5.2) Обработка результатов расчета для получения модуля деформации по верху проводилась аналогично обработке результатов при штамповых испытаниях.

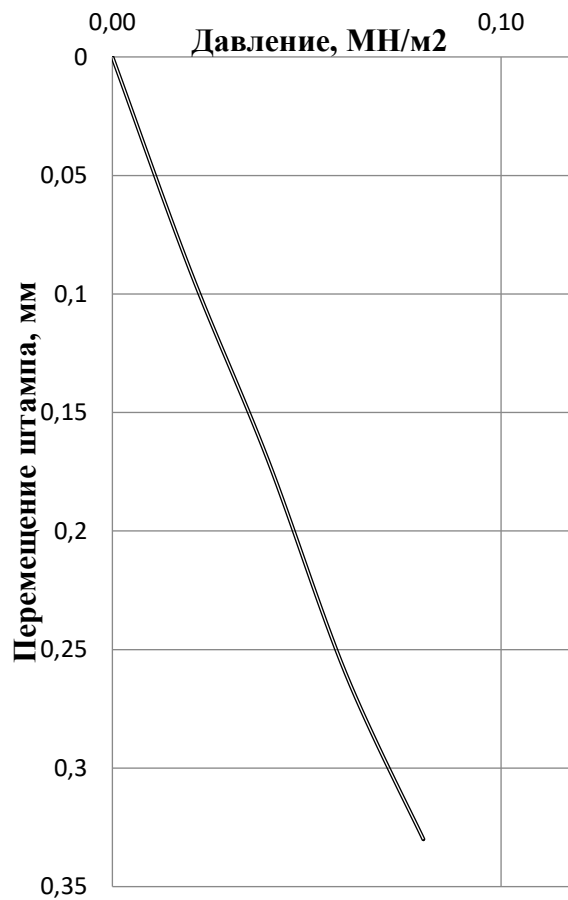


Рисунок 5.2 – График осадки штампа

Результаты расчета представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Результаты расчета модуля деформации

№ модели	Модуль деформации по верху E_{v2} , МПа	Разница с экспериментом, %
1	53,89	7,2
2	140,41	4,4
3	157,34	—

Сравнение зависимостей осадки штампа от напряжений для моделей №№ 1-2 представлены на рисунках 5.3–5.4.

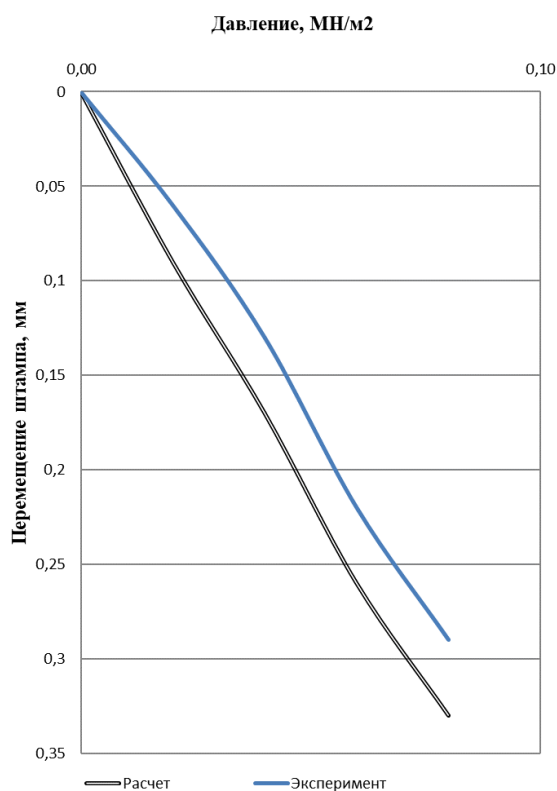


Рисунок 5.3 – Сравнение результатов расчета и эксперимента до устройства ПЗС

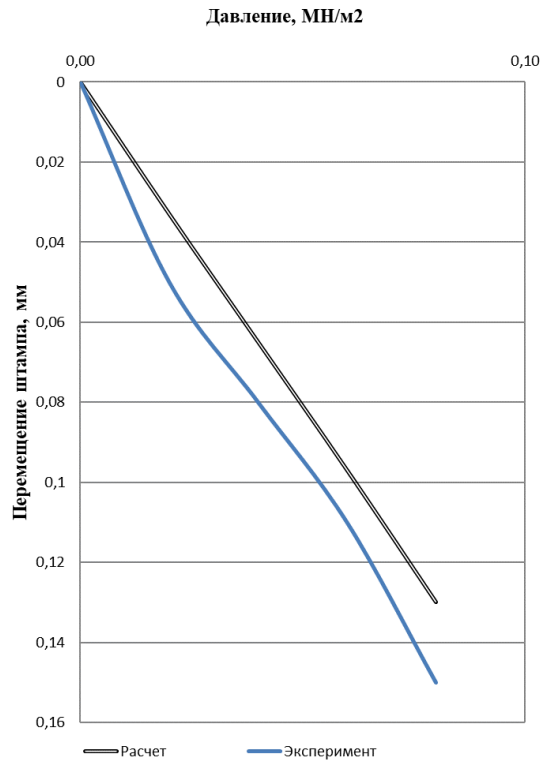


Рисунок 5.4 – Сравнение результатов расчета и эксперимента после устройства ПЗС

Как видно из таблицы 5.5 и рисунков 5.3–5.4, результаты моделирования дают удовлетворительную сходимость с относительной разницей не более 7,2 %. При сравнении абсолютных величин перемещений штампа расхождение между расчетом и экспериментом в расчетном случае № 1 составляет 0,04 мм, а в расчетном случае № 2 0,02 мм, что тоже можно считать удовлетворительным.

Для оценки коэффициента α_i по глубине земляного полотна были построены эпюры напряжений от внешней нагрузки для трех расчетных случаев, представленные на рисунке 5.5.

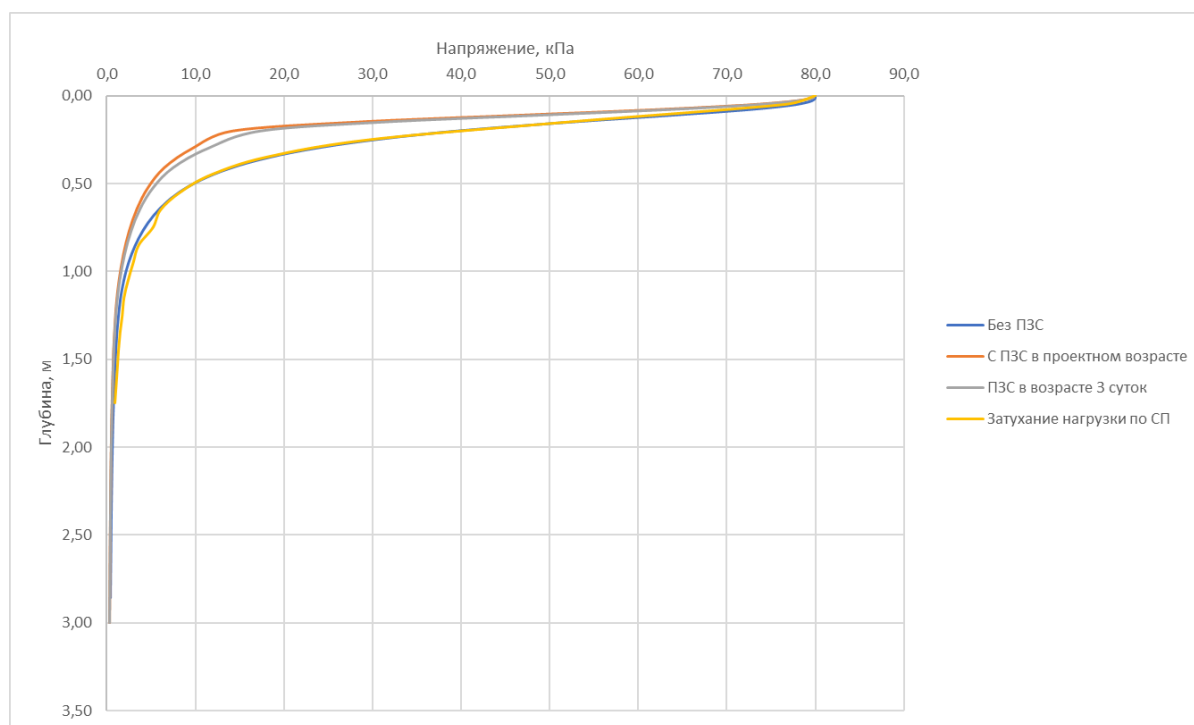


Рисунок 5.5 – Эпюры затухания напряжений по глубине земляного полотна

В качестве критерия определения глубины сжимаемой толщ примем аналогичное СП 22.13330 [142] значение коэффициента α_i , равное 0,01. Проведем сравнение расчетных значений α_i с нормативным до глубины 1,75 м. Сравнение расчетных и нормативного значений коэффициента затухания напряжений представлено в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Сравнение расчетных и нормативного значений коэффициента затухания напряжений

Глубина, м	№ 1		№ 2		№ 3		Значение α_i по СП [142]
	α_i	Разница с СП, %	α_i	Разница с СП, %	α_i	Разница с СП, %	
0,05	0,964	0,73	0,902	6,10	0,893	7,17	0,957
0,15	0,655	0,53	0,391	66,62	0,354	84,04	0,652
0,25	0,374	0,53	0,142	161,97	0,149	149,66	0,372
0,35	0,236	4,66	0,12	87,50	0,102	120,59	0,225
0,45	0,149	1,34	0,084	75,00	0,073	101,37	0,147
0,55	0,103	0,00	0,061	68,85	0,054	90,74	0,103
0,65	0,073	3,15	0,046	63,70	0,042	79,29	0,075
0,75	0,054	19,63	0,036	79,44	0,033	95,76	0,065

Глубина, м	№ 1		№ 2		№ 3		Значение α_i по СП [142]
	α_i	Разница с СП, %	α_i	Разница с СП, %	α_i	Разница с СП, %	
0,85	0,040	11,25	0,028	58,93	0,026	71,15	0,045
0,95	0,031	18,39	0,023	59,57	0,021	74,76	0,037
1,05	0,024	22,92	0,018	63,89	0,017	73,53	0,030
1,15	0,019	24,21	0,015	57,33	0,014	68,57	0,024
1,25	0,016	32,50	0,013	63,08	0,012	76,67	0,021
1,35	0,014	28,57	0,011	63,64	0,011	63,64	0,018
1,45	0,013	21,54	0,01	58,00	0,01	58,00	0,016
1,55	0,011	29,09	0,009	57,78	0,009	57,78	0,014
1,65	0,010	25,00	0,008	56,25	0,008	56,25	0,013
1,75	0,009	20,00	0,0075	44,00	0,0075	44,00	0,011

Анализ результатов сравнения, представленный на рисунке 5.5 и в таблице 5.6 показывает, что значения коэффициента затухания, приведенные в СП 22.13330 [142] хорошо согласуются для условий типовой конструкции земляного полотна. Разница расчетных и нормативных коэффициентов затухания напряжений на глубине до 0,65 м составляет не более 4,7 %, а дальнейшее увеличение данного расхождения до значений 32,5 % не оказывает существенного влияния на получаемое приведенное модуля деформации ввиду малых значений напряжений на этих глубинах (5,4 % и менее от первоначальной величины внешней нагрузки). Обратная ситуация наблюдается на расчетных случаях 1-2, где ощутимая разница показателей достигается уже на глубине 0,15 м, причем в расчетных вариантах напряжения затухают значительно быстрее. Выявленное отличие нормативного и расчетного показателей коэффициента затухания напряжений позволяет объяснить заниженное значение приведенного модуля деформации, рассчитанного по СП 22.13330 [142]. При этом приведенный в СП 22.13330 [142] коэффициент затухания напряжений не зависит от модуля

деформации материала слоя, ввиду чего не учитывается более эффективное распределение напряжений при применении ПЗС из закрепленных грунтов.

Дополнительно отметим, что прослеживается явная прямо пропорциональная зависимость между значением приведенного модуля деформации земляного полотна и затухания в нем напряжений.

Помимо этого, поставленный критерий по глубине сжимаемой толщи принятый равным 1 % от внешней нагрузки достигается для случая без ПЗС на глубине 1,65 м, а для обоих случаев с ПЗС – на глубине 1,45 м.

5.2.1.3 Валидация расчетной модели

Имея уточненные значения коэффициента затухания напряжений и глубины сжимаемой толщи, проведем повторные расчеты приведенного модуля деформации. Результаты расчета приведенного модуля деформации до и после устройства ПЗС представлены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Результаты расчета приведенного модуля деформации до устройства ПЗС и для ПЗС в возрасте 3 суток

h , м	E_i , МПа	α_i	α_i/E
До устройства ПЗС			
0,05	65	0,964	0,015
0,15	65	0,655	0,010
0,25	57	0,374	0,007
0,35	57	0,236	0,004
0,45	57	0,149	0,003
0,55	57	0,103	0,002
0,65	57	0,073	0,001
0,75	57	0,054	0,001
0,85	57	0,040	0,001
0,95	57	0,031	0,001
1,05	57	0,024	0,000
1,15	39	0,019	0,000
1,25	39	0,016	0,000
1,35	24	0,014	0,001

<i>h</i>, м	<i>E_i</i>, МПа	<i>α_i</i>	<i>α_i/E</i>
1,45	24	0,013	0,001
1,55	24	0,011	0,000
1,65	24	0,010	0,000
Сумма		2,786	0,047
Для ПЗС в возрасте 3 суток			
0,05	600	0,902	0,0015
0,15	600	0,391	0,0007
0,25	65	0,142	0,0022
0,35	57	0,12	0,0021
0,45	57	0,084	0,0015
0,55	57	0,061	0,0011
0,65	57	0,046	0,0008
0,75	57	0,036	0,0006
0,85	57	0,028	0,0005
0,95	57	0,023	0,0004
1,05	57	0,018	0,0003
1,15	57	0,015	0,0003
1,25	39	0,013	0,0003
1,35	39	0,011	0,0003
1,45	24	0,01	0,0004
Сумма		1,9	0,0129

$$E_{v2пр}^{без\ ПЗС} = \frac{\sum \alpha_i}{\sum \frac{\alpha_i}{E_i}} = \frac{2,786}{0,047} = 59,5 \text{ МПа}$$

$$E_{v2пр}^{с\ ПЗС} = \frac{\sum \alpha_i}{\sum \frac{\alpha_i}{E_i}} = \frac{1,900}{0,0129} = 146,9 \text{ МПа}$$

Расчетные значения приведенных модулей деформации до и после укладки ПЗС оказались достаточно близки как к конечно-элементным расчетам, так и к результатам натурных испытаний. Разница по модулю

деформации по расчету и эксперименту для условий до устройства ПЗС составила 2,4%, после устройства ПЗС – 0,2 %.

Приведенные результаты показывают возможность с небольшой погрешностью определить приведенный модуль деформации по верху ПЗС по предлагаемой методике, в связи с чем рекомендуется ее применение для назначения рекомендуемых толщин ПЗС по условию деформативности.

5.2.2 Расчет коэффициентов затухания напряжений

По результатам предыдущих расчетов была выявлена зависимость между приведенным модулем деформации по верху ПЗС и коэффициентом затухания напряжений, ввиду чего необходимо было уточнить его значения.

Данная задача решалась путем варьирования трех исходных параметров, таких как модуль деформации нижележащих слоев грунта, модуль деформации материала ПЗС и его толщина.

Модули деформации нижележащих слоев грунта были выбраны аналогично таблице 4.3 [11] и составляли 10, 20, 30, 40 и 50 МПа. По результатам лабораторных испытаний минимальная марка материала ПЗС соответствовала М40, а максимальная – М70, дополнительно было взято промежуточное значение, равное марке М60.

В [145] приведены значения модуля упругости материала ПЗС в зависимости от марки по прочности (таблица 5.8).

Таблица 5.8 – Нормативные значения модуля деформации материала ПЗС в зависимости от марки материала [145]

Марка материала	Нормативное значение модуля деформации материала ПЗС, МПа
40	600
60	800
70 и выше	870

С учетом вариативности по прочностным маркам, целесообразно определить границы допускаемых толщин ПЗС, устроенного по технологии

холодного ресайклинга. Имея в виду наличие в гранулометрическом составе ПЗС фракций до 63 мм, рекомендуется назначать минимальную толщину ПЗС не менее 20 см в соответствии с [11], а максимальную не более 30 см для возможности проведения быстрого уплотнения слоя без потери его качества. Для толщин ПЗС аналогично было принято промежуточное значение, равное 25 см.

Для расчета коэффициентов затухания использовалась двухслойная модель, заданная в программном комплексе «Plaxis 2D», состоящая из материала ПЗС и грунта основной площадки земляного полотна с заданным модулем деформации. Принципиальная схема модели и принцип задания нагрузки аналогично подпункту 5.2.1.2.

В рамках оптимизации количества расчетных случаев была выполнена проверка зависимости затухания напряжений от модуля деформации материала ПЗС.

Для этого были проведены расчеты модели с модулем деформации нижележащего грунта 10 МПа и толщиной 20 см с тремя заданными модулями деформации материала ПЗС в соответствии с таблицей 5.8.

Результаты расчета приведены на рисунке 5.6.

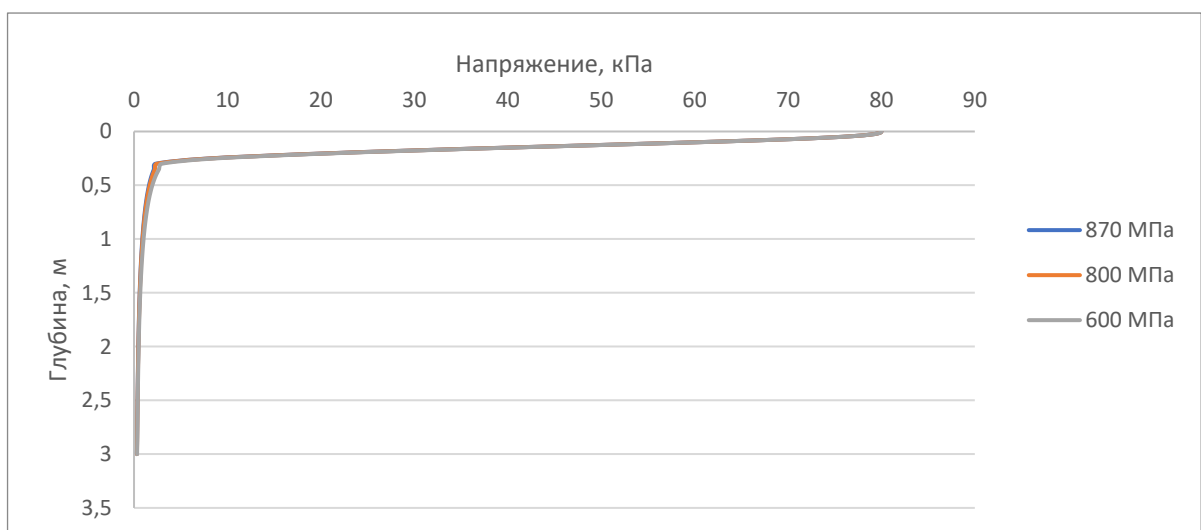


Рисунок 5.6 – Результаты расчета коэффициента затухания нагрузки в зависимости от модуля деформации материала ПЗС

По результатам расчета не было выявлено значимой чувствительности получаемых данных от модуля деформации материала ПЗС, в связи с чем, для определения коэффициента затухания нагрузки задавалась усредненная по трем зависимостям кривая.

Аналогичная проверка чувствительности модели была проведена для толщины ПЗС при условии модуля деформации нижележащего грунта 10 МПа. Результаты расчета приведены на рисунке 5.7.

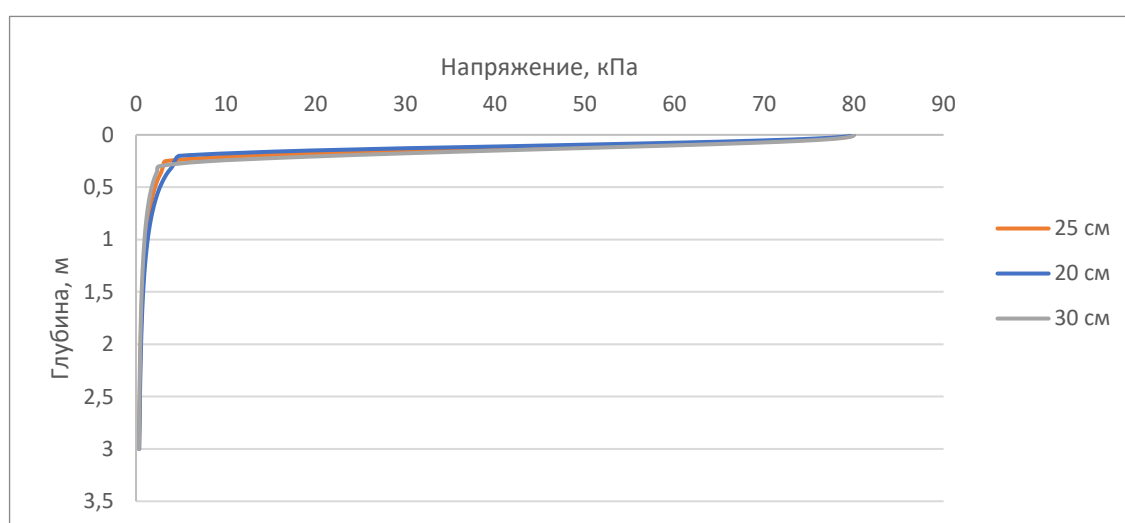


Рисунок 5.7 – Результаты расчета коэффициента затухания нагрузки в зависимости от толщины ПЗС

По анализу результатов испытаний была выявлена определенная тенденция на более быстрое затухание напряжений по глубине, в связи с чем, для обеспечения требуемой точности каждый расчетный случай рассматривался отдельно.

Для определения коэффициентов затухания напряжений была проведена серия из 45 вариантов с варьированием параметров модуля деформации нижележащего слоя грунта, модуля деформации материала ПЗС и его толщины. Результаты расчета приведены в Приложении А.

Имея полученные значения коэффициентов затухания нагрузки для различных исходных данных, по формуле (5.6) были рассчитаны приведенные модули деформации, представленные в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Результаты расчета приведенного модуля деформации по верху ПЗС

Модуль деформации нижележащего слоя грунт, МПа	Приведенный модуль деформации по верху ПЗС при модуле деформации материала ПЗС, МПа, и толщине слоя, см								
	870			800			600		
	20	25	30	20	25	30	20	25	30
10	43,6	68,9	99,3	43,4	68,4	98,4	42,8	68,4	98,3
20	68,8	100,6	129,7	68,5	99,7	128,2	67,1	96,5	122,5
30	93,0	137,9	154,5	92,4	136,4	158,4	90,0	130,4	150,0
40	113,7	156,5	190,6	112,8	154,7	187,6	109,3	147,3	176,2
50	134,7	182,9	214,3	133,5	180,4	210,6	128,7	170,5	196,5

В качестве критерия назначения рекомендуемой толщины было выбрано ее наименьшее значение, обеспечивающее требуемое значение модуля деформации по верху ПЗС, что позволит сократить затраты на материалы (портландцемент, полимерный стабилизатор, вода, ЩПС для возможной модификации гранулометрического состава), а также оптимизировать временные затраты на распределение вяжущих материалов и уплотнение слоя ПЗС. По анализу таблицы 5.9 были выбраны толщины ПЗС и модуль деформации его материала, удовлетворяющие назначенному критерию. Рекомендуемые толщины ПЗС и марки материала приведены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Рекомендуемые толщины ПЗС по условию деформативности для закрепленного грунта

Требуемый модуль деформации по верху ПЗС, МПа	Толщина ПЗС при модуле деформации нижележащих 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			25
50		0			
* — не применимо в связи с необходимой толщиной ПЗС больше 30 см.					

При рассмотрении таблицы 5.10 видно, что ПЗС, устроенный из старогородних балластных материалов с обработкой вяжущими позволяет обеспечить требуемый модуль деформации во всех случаях, за исключением высокоскоростных железнодорожных магистралей на слабом основании с модулем деформации 10 МПа. При этом, можно сделать вывод, что марки М40 достаточно для создания указанной конструкции ПЗС.

5.3 Оценка напряжений в элементах верхнего строения пути

Для решения поставленной задачи по оценке влияния ПЗС из закрепленных балластных материалов на напряжения в элементах верхнего

строения пути (Далее – ВСП) на ЭК были проведены измерения сил и перемещений рельса от грузовых и порожних вагонов при скорости 10 км/ч.

Измерения проводились на двух опытных участках (№ 1, 2) с применением ПЗС, имеющих следующие характеристики:

Характеристики опытных участков:

- рельсы Р65 ДТ350;
- рельсовые скрепления ЖБР-65ППР (модернизированное) с вертикальной статической жесткостью от 200 до 250 кН/мм;
- радиус кривой 1200 м (№ 1) и 400 м (№ 2);
- эюра шпал 1840 шт./км (№ 1) и 2000 шт./км (№ 2);
- подшпальные прокладки с распределенным статическим модулем упругости 0,3 Н/мм³;
- базальтовый балласт категории В толщиной 30 см под подошвой шпалы;
- подбалластный защитный слой из старогонных балластных материалов, устроенный по технологии холодного ресайклинга толщиной 20 см.

Измерения вертикальных сил проводились весной 2024 г. при помощи силомерного датчика, установленного на подрельсовой площадке шпалы или подкладке рельсового скрепления через демпфер по обоим рельсовым нитям. Перемещения рельса контролировались при помощи прогибомеров, установленных в шпальном ящике на одинаковом расстоянии от двух соседних шпал. Измерения проводились при 10 проходах испытательного поезда.

Результаты измерений представлены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Результаты измерений сил и перемещений рельсов [148]

Участок	Средняя вертикальная сила на рельсовую нить, кН		Среднее перемещение рельса, мм	
	от груженных вагонов	от порожних вагонов	под груженными вагонами, мм	под порожними вагонами, мм
№ 1	115,34	46,06	1,5	1,0

Участок	Средняя вертикальная сила на рельсовую нить, кН		Среднее перемещение рельса, мм	
	от груженных вагонов	от порожних вагонов	под груженными вагонами, мм	под порожними вагонами, мм
№ 2	115,67	41,86	1,77	1,17

С учетом наличия на опытных участках подшпальных прокладок с известным распределенным модулем упругости, целесообразно исключить их перемещения из значений, полученных с участков № 1, 2 для дальнейшего определения напряжений в элементах железнодорожного пути.

Жесткость подшпальной прокладки можно определить по формуле

$$Ж = C \cdot 2 \Omega, \quad (5.7)$$

где C – распределенный статический модуль упругости, равный $0,3 \text{ Н/мм}^3$;

Ω - площадь полушпалы, равная 3092 см^2 .

Подставив значения в формулу (5.7) получим значение жесткости подшпальной прокладки $185,52 \text{ кН/мм}$.

Имея значение жесткости подшпальной прокладки, вычтем ее перемещения из полученных ранее значений. С учетом того, что нагрузки, представленные в таблице 5.11 приходятся на рельсовую нить, для расчета перемещения подшпальных прокладок необходимо принимать силу, приходящую на расчетную шпалу. В соответствии с [132] на расчетную шпалу приходится 40 % нагрузки от рельсовой нити, что и было принято для дальнейших расчетов.

Перемещения рельса на опытных участках без учета деформации подшпальных прокладок представлены в таблице 5.12.

Таблица 5.12 – Перемещения рельсов на опытных участках без учета деформации подшпальных прокладок

Участок	Среднее перемещение рельса, мм	
	под груженными вагонами	под порожними вагонами
№ 1	1,25	0,90
№ 2	1,52	1,08

Модуль упругости подрельсового основания может быть определен по формуле

$$U = \sqrt[3]{\frac{1}{64EI} \left(\frac{\Delta P}{\Delta y} \right)^4}, \quad (5.8)$$

где E – модуль упругости рельсовой стали, МПа;

I – момент инерции рельса, м⁴;

ΔP – разница средних вертикальных сил на рельс порожнего и груженого состава;

Δy – разница вертикальных перемещений рельса под порожним и груженым составом.

Результаты расчета модуля упругости подрельсового основания представлены в таблице 5.13.

Таблица 5.13 – Результаты расчета модуля упругости подрельсового основания

Участок	С учетом деформации подшпальной прокладки	Разница средних нагрузок на рельс порожнего и грузового вагонов, кН	Разница вертикальных перемещений рельса под порожним и груженым составом, мм	Модуль упругости подрельсового основания, МПа
№ 1	Да	69,28	0,50	94,9
	Нет	69,28	0,35	152,3
№ 2	Да	73,81	0,60	81,0
	Нет	73,81	0,44	122,1

По результатам расчета средний модуль упругости на опытных участках оказался равным 87,9 МПа. При этом, если исключить деформацию подшпальных прокладок то, средний модуль упругости подрельсового основания составит 137,2 МПа, что в 1,56 раз повысило его значение. Отметим, что расхождение по модулю упругости пути между двумя

опытными участками составило 17 %, что может быть объяснено наличием локальных участков с повышенным модулем деформации ПЗС.

С учетом получившихся значений модуля упругости подрельсового основания целесообразно провести расчет напряжений в элементах верхнего строения пути для сравнения их с допустимыми, в первую очередь для балластного слоя. Допускаемые напряжения в элементах ВСП представлены в таблице 5.14.

Таблица 5.14 – Допускаемые значения напряжений в элементах ВСП [149]

Показатель	Нормативное значение
Допускаемые напряжения растяжения в кромках подошвы рельсов [$\sigma_{кп}$]	Не более 240 МПа
Допускаемые напряжения на верхней постели железобетонных шпал на смятие под подкладкой при отсутствии прокладок амортизаторов [$\sigma_{ш}$]	Не более 20 МПа
Допускаемые напряжения под шпалой в балласте [$\sigma_б$]	Не более 0,45 МПа

Для оценки влияния модуля упругости пути на напряжения в элементах ВСП был проведен расчет по методике [149] для грузовых вагонов с осевой нагрузкой 23,5 и 25 тс в кривой 1200 м при скорости движения 90 км/ч для полученных в таблице 5.13 значений модуля упругости.

Результаты расчета приведены в таблице 5.15.

Таблица 5.15 – Результаты расчета напряжений в элементах ВСП

Участок	С учетом деформации подшпальной прокладки	От воздействия вагонов с осевой нагрузкой 23,5 тс			От воздействия вагонов с осевой нагрузкой 25 тс		
		$\sigma_{кп}$, МПа	$\sigma_{ш}$, МПа	$\sigma_б$, МПа	$\sigma_{кп}$, МПа	$\sigma_{ш}$, МПа	$\sigma_б$, МПа
№ 1	Да	93,22	1,28	0,21	99,48	1,36	0,23
	Нет	88,20	1,45	0,24	94,14	1,55	0,26
№ 2	Да	95,01	1,23	0,21	101,38	1,31	0,22
	Нет	90,50	1,36	0,23	96,59	1,46	0,24

По результатам расчета видно, что значительное увеличение модуля упругости подрельсового основания не приводит к превышению допускаемых напряжений в элементах ВСП. При этом, кромочные напряжения в подошве рельсов имеют тенденцию к снижению при увеличении жесткости пути за счет снижения прогибов рельсов и, как следствие, уменьшения в них изгибных напряжений.

Стоит отметить, что за счет исключения деформации подшпальных прокладок напряжения в балласте выросли на 9–13 %, однако, по результатам расчета на всех участках имеется практически двукратный запас по их допускаемым напряжениям.

При этом, также немаловажным является и обеспечение оптимального модуля упругости подрельсового основания. В работе [150] исследователями из ИЦ ВЭИП была предпринята попытка определения оптимального модуля упругости подрельсового основания по критерию обеспечения минимальной стоимости жизненного цикла для особогруженонапряженных линий. Для определения оптимального модуля упругости пути была решена многокритериальная оптимизационная задача, связанная с выходом рельсов, промежуточных рельсовых скреплений и шпал на 1 км, а также трудозатратам на текущее содержание пути. За технические ограничения оптимизационной задачи были приняты требования, представленные в [151]:

- гамма-процентный ресурс промежуточных рельсовых скреплений должен составлять не менее 95 % на весь период гарантийных обязательств (не менее 1,4 млрд. т брутто пропущенного тоннажа);

- гамма-процентный ресурс шпал должен составлять не менее 95 % на 2,5 млрд. т брутто пропущенного тоннажа;

- вероятность безотказной работы рельсов должна составлять не менее 0,95 по дефектам, не связанным со сваркой, наплавкой, боковым износом, а также ненормативными механическим и термомеханическим воздействием на рельсы подвижного состава.

Результаты расчета приведены на рисунке 5.8.

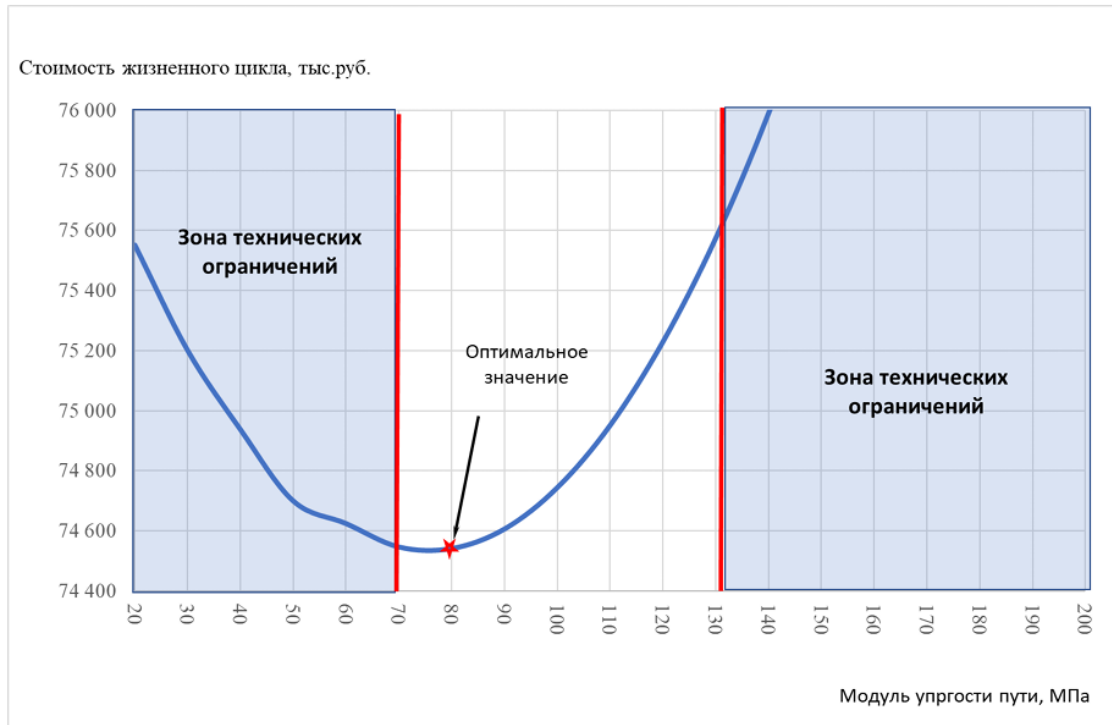


Рисунок 5.8 – Стоимость жизненного цикла конструкции верхнего строения пути в зависимости от модуля упругости пути [150]

По анализу результатов расчета оптимальный модуль упругости подрельсового основания составляет порядка 80 МПа, что сопоставимо со средними значениями, получившимися на опытных участках на ЭК с учетом наличия подшпальных прокладок и устройства ПЗС, обработанного вяжущими.

При сравнении экспериментально полученных модулей упругости пути видно, что опытный участок № 1 при отсутствии подшпальных прокладок попал бы в зону технических ограничений в связи с возможными выходами из строя узлов промежуточных рельсовых скреплений (в первую очередь прокладок) ввиду повышенной жесткости пути, а опытный участок № 2 находился бы у границы области этих ограничений. При этом на участках № 1, 2 при применении подшпальных прокладок значение модуля упругости близко к оптимальному.

В связи с вышеизложенным, для обеспечения комплексной стабильности железнодорожного пути на особогрузонапряженных линиях как с точки зрения земляного полотна, так и с точки зрения конструкции верхнего

строения пути (снижение напряжений в балласте), при устройстве подбалластных защитных слоев с применением вяжущих материалов, рекомендуется применение подшпальных прокладок.

5.4 Выводы по разделу 5

1. Разработана и проверена методика расчета приведенного модуля деформации по верху ПЗС, позволяющая определять необходимую толщину ПЗС.

2. 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.

3. Определено, что перспективной является конструкция ПЗС из старогородних балластных материалов, закрепленных вяжущими, толщиной от 20 до 30 см и имеющими марку материала по прочности не ниже М40.

4. По результатам замера сил и перемещений рельсов, выполненных на ЭК, были рассчитаны возникающие в элементах ВСП напряжения на опытных участках (с наличием и без подшпальных прокладок) от воздействия грузовых вагонов с осевыми нагрузками 23,5 и 25 тс, которые во всех случаях оказались ниже допускаемых, с практически двукратным запасом по допускаемым напряжениям в балласте.

5. Устройство и эксплуатация железнодорожного пути с ПЗС из закрепленных материалов, имеющим повышенный модуль деформации возможно, однако для обеспечения оптимального модуля упругости пути по условию минимальной стоимости жизненного цикла рекомендуется применение в конструкции пути подшпальных прокладок.

6 Оценка технико-экономической эффективности устройства подбалластного защитного слоя методом холодного ресайклинга

6.1 Расчет трудозатрат на выполнение работ по капитальному ремонту железнодорожного пути с устройством ПЗС

С учетом того, что технология холодного ресайклинга на данный момент предполагает ее выполнение преимущественно за счет техники на автодорожном ходу, целесообразнее выполнять работы по устройству ПЗС при проведении капитальных ремонтов железнодорожного пути после вырезки балласта и снятия рельсошпальной решетки.

По результатам замеров времени на участке Заозерная–Камала Красноярской железной дороги был предложен опытный технологический процесс и оценены трудозатраты на устройство ПЗС. Работы, выполняемые в рамках предложенного технологического процесса, брались, исходя из утвержденного технологического процесса [153] и утвержденных норм времени на производство работ по ремонту верхнего строения пути [154].

Технологический процесс по выполнению капитального ремонта с устройством ПЗС шириной 4,8 м по методу холодного ресайклинга предложено выполнять в следующей последовательности:

- вырезка балластных материалов;
- распределение ЩПС из хоппер-дозаторных вагонов;
- демонтаж рельсошпальной решетки;
- распределение ЩПС по основной площадке автогрейдером, поливка слоя ЩПС;
- устройство ПЗС и его уплотнение по методу холодного ресайклинга;
- монтаж рельсошпальной решетки;
- балластировка пути;
- первичная выправка пути;

- смена инвентарных рельсов на плети;
- окончательная выправка пути.

Вырезка балластных материалов проводится с применением машины ЩОМ-2000. Монтаж и демонтаж рельсошпальной решетки осуществляется краном УК25/9-18 с 8 платформами УССО по 5 звеньев в пакете. Распределение ЩПС и балласта проводится хоппер-дозаторными вагонами объемом 44 м³. Выправка пути осуществляется комплексом машин, состоящим из ВПО-С, Дуоматик, ДСП, ПБ. Смена инвентарных рельсов на плети проводится спецсоставом РС-800 и путевой рельсосварочной машиной ПРСМ.

Для устройства ПЗС предложено использовать распределители вяжущих в количестве 3 штук с объемом бункера для вяжущих материалов 6 м³ и шириной распределения 2,4 м, ресайклер с глубиной возможного перемешивания грунта от 15 до 50 см и шириной рабочего органа 2,4 м, поливомоечные машины с объемом бака 12 м³, а также кулачковые и гладковальцовые катки вибрационного типа массой не менее 18 т. Заправку распределителей целесообразно выполнять из биг-бэгов с применением автокранов.

Ведомость затрат труда на производство работ по предложенному опытному технологическому процессу капитальному ремонту пути с устройством ПЗС в перерасчете на 1 км пути представлена в Приложении Б.

По данным, полученным из ведомости затрат труда, был построен график проведения капитального ремонта пути с устройством ПЗС по условию общего необходимого времени закрытия перегона для выполнения фронта работ в 1000 м.

График предлагаемого к внедрению технологического процесса по капитальному ремонту с устройством ПЗС по методу холодного ресайклинга вместе с условными обозначениями представлен на рисунках 6.1–6.2.

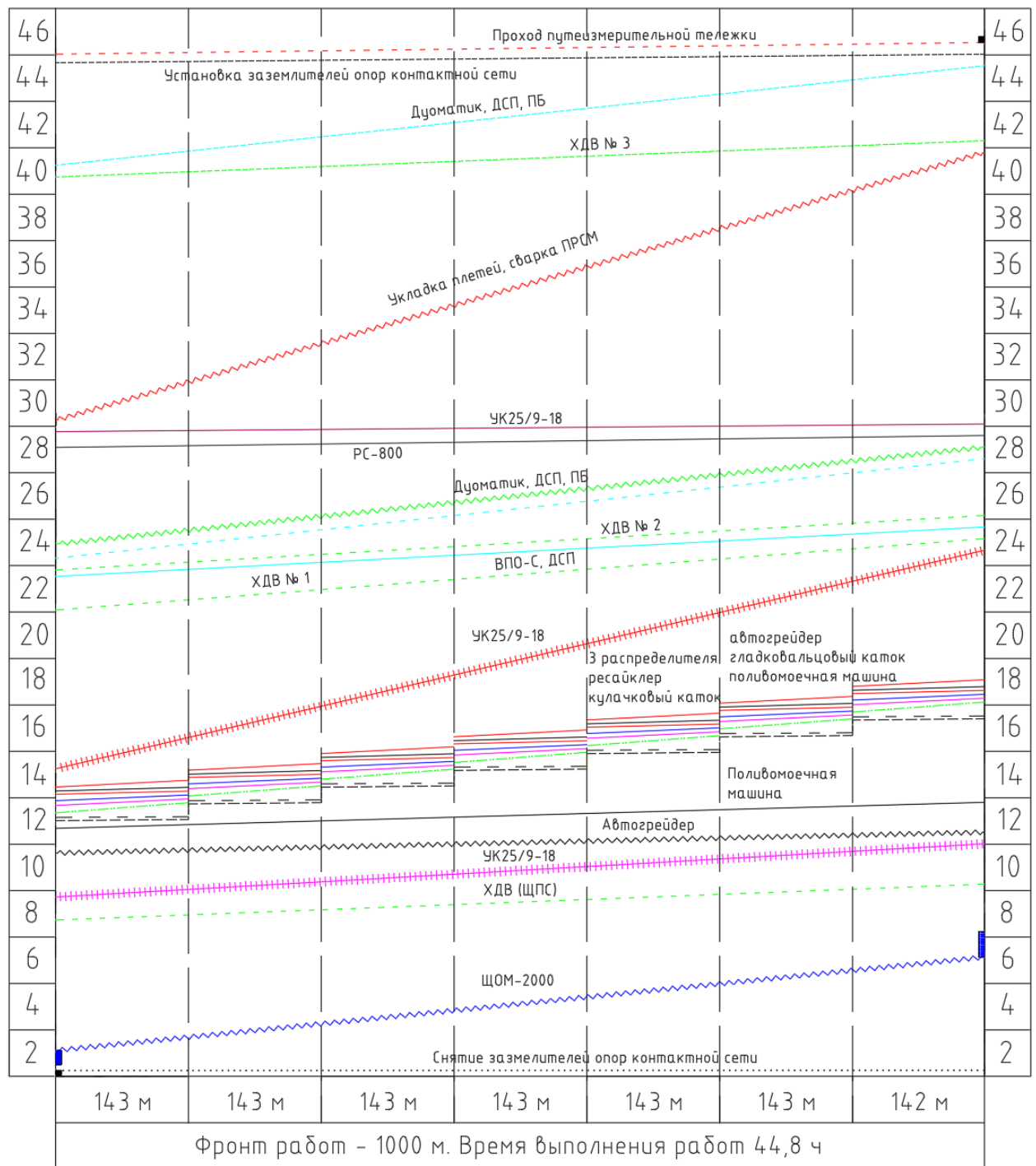


Рисунок 6.1 – График выполнения работ по капитальному ремонту с устройством ПЗС методом холодного ресайклинга

	Оформление закрытия/открытия перегона, заезд и выезд техники с места произ-ва работ		Уплотнение кулачковым катком
	Снятие и установка заземлителей опор контактной сети		Профилирование слоя автогрейдером
	Зарядка/Разрядка машины ЩОМ-2000, приведение составов СЗ-240-6 в рабочее/транспортное положение		Уплотнение гладковальцовым катком
	Вырезка балласта машиной ЩОМ-2000		Укладка РШР
	Распределение ЩПС/Балласта из ХДВ		Работа машин ВПО-С, ДСП
	Демонтаж РШР		Работа машин Дуоматик, ДСП, ПБ
	Работа поливочной машины		Перевод 2/3 клемм в монтажное положение
	Распределение ЩПС автогрейдером		Выгрузка плетей из рельсовозного состава
	Распределение и загрузка портландцемента		Выгрузка элементов ВСП из УК
	Распределение и загрузка ПМД		Укладка и сварка плетей ПРСМ
	Ресайклинг		Проход путеизмерительной тележки

Рисунок 6.2 – Условные обозначения к графику выполнения работ

По результатам расчета суммарная трудоемкость работ по производству капитального ремонта с устройством ПЗС составила 24865,11 чел-мин, общая продолжительность работ – 44,8 ч, что соответствует выработке 22,3 м/ч. Устройство ПЗС занимает 9,01 ч, 111 м/ч соответственно. Согласно данным [153] при работе в условиях закрытого перегона один комплекс по проведению капитального ремонта пути обеспечивает суточную выработку 27,2 м/ч, тогда капитальный ремонт 1 км пути займет 36,8 ч. Добавление в технологический процесс операций по устройству ПЗС методом холодного ресайклинга увеличивает требуемое время на капитальный ремонт 1 км пути на 8 часов, что допустимо в условиях закрытого перегона. При необходимости производства

работ в 24-часовые «окна» альтернативным вариантом для проведения капитального ремонта пути с устройством ПЗС будет являться уменьшение фронта работ.

6.2 Сравнение технико-экономических показателей различных технологий устройства ПЗС

Основными параметрами эффективности технологического процесса являются трудоемкость, погонная выработка на единицу времени, а также стоимость выполнения работ, которая состоит из зарплаты монтеров пути, стоимости эксплуатации путевых машин (с учетом зарплат машинистов) и материалов.

Рассмотрим необходимость усиления основной площадки земляного полотна при типовом для сети железных дорог РФ модуле деформации по ее верху 30 МПа с применением ПЗС для обеспечения приведенного модуля деформации не менее 80 МПа.

В качестве технологий по устройству ПЗС, помимо холодного ресайклинга рассматривалось 2 варианта: устройство ПЗС из ЩПГС с применением машин РМ-80 и СЧУ-800 и с применением машинного комплекса АХМ 800-Р.

При этом для каждой из альтернативных технологий были приняты две схемы устройства ПЗС, а именно устройство ПЗС без армирования и с армированием одним слоем георешетки. В соответствии с [11] толщина ПЗС без армирования составила 0,55 м, а с армированием одним слоем георешетки 0,40 м. В каждом варианте также рассматривалось устройство разделительного слоя из геотекстиля. Ширина устройства ПЗС принималась равной 5,0 м.

Для корректного сравнения из каждого технологического процесса были выделены операции, непосредственно связанные с устройством ПЗС.

Согласно утвержденным технологическим процессам [155, 156], а также опыту эксплуатации машины АХМ 800-Р на Австрийских железных дорогах

[157] продолжительность работ по устройству ПЗС машинами РМ-80 и СЧУ-800 в пересчете на 1000 м пути составляет 10,5 часов с суммарными трудозатратами 4728,57 чел-мин, машиной АХМ 800-Р – 24 часа и 69419,43 чел-мин соответственно.

Сравнение погонной выработки трех технологий представлено на рисунке 6.3.

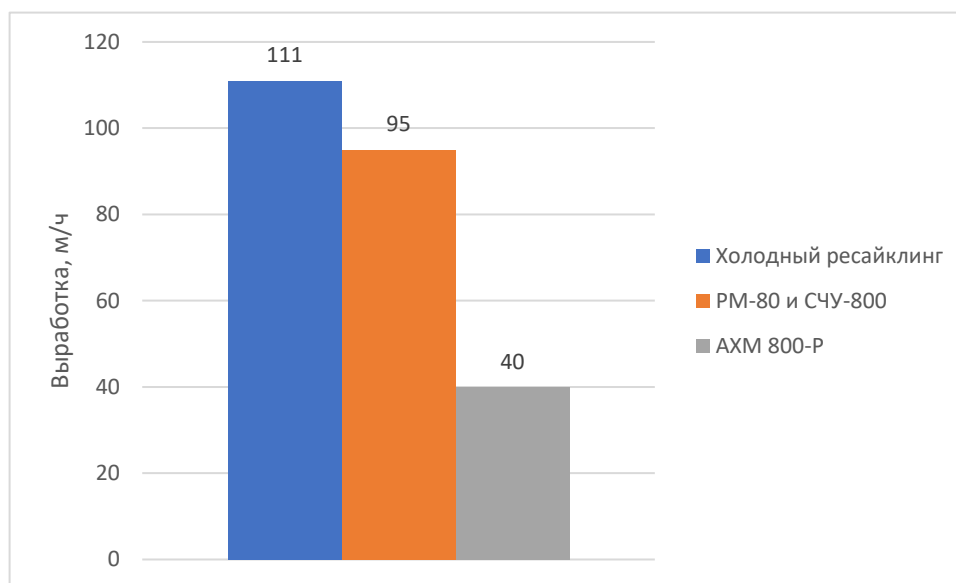


Рисунок 6.3 – Сравнение погонной выработки технологий по устройству ПЗС

Для расчета зарплаты монтеров пути необходимо рассчитать стоимость одного часа работы одного монтера пути.

Общая стоимость одного часа монтера пути состоит из следующих составляющих:

- оплата труда по тарифу (K_1);
- районный коэффициент (K_2);
- доплата за разъездной характер работы (K_3);
- премия (K_4);
- доплата за вредные условия труда (K_5).

Оплата труда по тарифу, K_1 , руб/ч, определяется по формуле (6.1):

$$K_1 = Z_1 \cdot T_{3,5}, \quad (6.1)$$

где Z_1 – оплата труда по тарифу для монтера пути 1 разряда – 70,64 руб/час в соответствии с [158];

$T_{3,5}$ – оплата труда по тарифу для среднего разряда при выполнении работ – 124,32 руб/час с учетом тарифного коэффициента за разряд 1,76;

Затраты труда на работу сигналистов W_c , чел-ч/км, определяются по формуле (6.2):

$$W_c = \frac{N_c \cdot 8 \cdot t_o}{L}, \quad (6.2)$$

где N_c – количество сигналистов, чел;

t_o – периодичность предоставления окон, дней;

L – фронт выполнения работ, км.

Оплата труда с учетом районного коэффициента определяется по формуле (6.3):

$$K_2 = K_1 \cdot 0,2. \quad (6.3)$$

Доплата за разъездной характер работы определяется по формуле (6.4):

$$K_3 = (K_1 + K_2) \cdot 0,2. \quad (6.4)$$

Премия рассчитывается по формуле (6.5):

$$K_4 = K_1 \cdot 0,8. \quad (6.5)$$

Доплата за вредные условия труда определяется по формуле (6.6):

$$K_5 = K_1 \cdot 0,05. \quad (6.6)$$

Общая единичная стоимость затрат труда будет определяться по формуле (6.7):

$$K_6 = \sum_{i=1}^5 K_i. \quad (6.7)$$

Проведем расчет, подставив имеющиеся значения:

$$W_c = \frac{4 \cdot 8 \cdot 1}{1} = 32 \text{ чел} - \text{ч/км};$$

$$K_1 = 70,64 \cdot 1,76 = 124,32 \text{ руб/ч};$$

$$K_2 = 124,32 \cdot 0,2 = 24,86 \text{ руб/ч};$$

$$K_3 = (124,32 + 24,86) \cdot 0,2 = 29,83 \text{ руб/ч};$$

$$K_4 = 124,32 \cdot 0,8 = 99,46 \text{ руб/ч};$$

$$K_5 = 124,32 \cdot 0,05 = 6,22 \text{ руб/ч};$$

$$K_6 = 124,32 + 24,86 + 29,83 + 99,46 + 6,22 = 284,69 \text{ руб/ч}.$$

Аналогично для сигналистов, с учетом среднего разряда 3,0 и тарифного коэффициента 1,63 получим значение $K_6^c = 263,67 \text{ руб/час}$.

Зарплата монтеров пути вместе с сигналистами Z_m , руб, рассчитывается по формуле (6.8):

$$Z_m = W_{\pi} \cdot K_6 + W_c \cdot K_6^c, \quad (6.8)$$

где W_{π} – трудозатраты монтеров пути на устройство ПЗС, чел-ч.

По формуле (6.8) получим:

$$Z_m^{x.p.} = 19,91 \cdot 284,69 + 32 \cdot 263,67 = 8741,99 \text{ руб};$$

$$Z_m^{PM, CЧУ} = 78,81 \cdot 284,69 + 32 \cdot 263,67 = 30873,85 \text{ руб};$$

$$Z_m^{AXM} = 1156,99 \cdot 284,69 + 32 \cdot 263,67 \cdot 2 = 346258,36 \text{ руб}.$$

Стоимости эксплуатации машин для устройства ПЗС представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Стоимость эксплуатации машин

Технология	Наименование машины	Количество маш-ч	Стоимость работы, руб	Зарплата машинистов, руб
Холодный ресайклинг	Хоппер-дозаторные вагоны (рассыпка ЦПС)	1,54	16083,88	925,91
	Тепловоз маневровый	1,54	14695,02	1095,17
	Распределитель вяжущих	5,87	75785,05	904,94
	Ресайклер	3,04	155989,37	1204,78
	Катки вибрационные самоходные	5,03	22619,59	902,46
	Машина поливомоечная	2,22	3245,42	342,24

Технология	Наименование машины	Количество маш-ч	Стоимость работы, руб	Зарплата машинистов, руб
	Автомобиль бортовой с г/п до 5 т	5,33	4654,61	821,69
	Автогрейдер	2,88	4707,85	516,72
ИТОГО			297 780,79	6 713,91
РМ-80 + СЧУ-800	Хоппер-дозаторные вагоны (рассыпка ЩПГС)	3,87	36957,17	2754,29
	Тепловоз маневровый	3,87	30734,16	1194,159
	ПБ	1,85	10915,36	1044,024
	Автогрейдер	5,11	8367,95	918,43
	Катки вибрационные самоходные	3,87	17416,71	694,87
ИТОГО			104 391,35	6 605,78
АХМ 800-Р	АХМ 800-Р	33,21	566412,95	12996,42
	СЗ 240-6	45,4	427891,71	22159,79
ИТОГО			994 304,66	35 156,21

С учетом данных [157], применение в машинном комплексе АХМ 800-Р секции рециклинга позволяет сократить затраты на новый материал ЩПГС на величину до 50 %, что было учтено в расчете затрат на материалы.

Затраты на материалы для устройства ПЗС представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Затраты на материалы для устройства ПЗС

Технология	Толщина ПЗС, см	Наименование материала	Количество	Стоимость, руб
Холодный ресайклинг	20	ЩПС	687 м ³	1301744,71
		Вода	72 т	979,06
		Портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н	107,2 т	2305141,00
		Полимерно-минеральная добавка	5,4 т	730667,74
		ИТОГО		4 338 533,36

Технология	Толщина ПЗС, см	Наименование материала	Количество	Стоимость, руб
РМ-80+СЧУ-800 без армирования	55	ЩПГС	3203,8 м ³	8766708,65
		Геотекстиль	5000 м ²	1033924,50
		ИТОГО		9 800 633,15
РМ-80+СЧУ-800 с армированием одним слоем георешетки	40	ЩПГС	2240,0 м ³	6129417,37
		Геотекстиль	5000 м ²	1033924,50
		Георешетка	5000 м ²	3305745,00
		ИТОГО		10 469 086,87
АХМ 800-Р без армирования	55	ЩПГС	1601,9 м ³	4383354,33
		Геотекстиль	5000 м ²	1033924,50
		ИТОГО		5 417 278,33
АХМ 800-Р с армированием одним слоем георешетки	40	ЩПГС	1120 м ³	3064708,69
		Геотекстиль	5000 м ²	1033924,50
		Георешетка	5000 м ²	3305745,00
		ИТОГО		7 404 378,19

Сравнение стоимостей работ по устройству ПЗС представлено на рисунке 6.4.

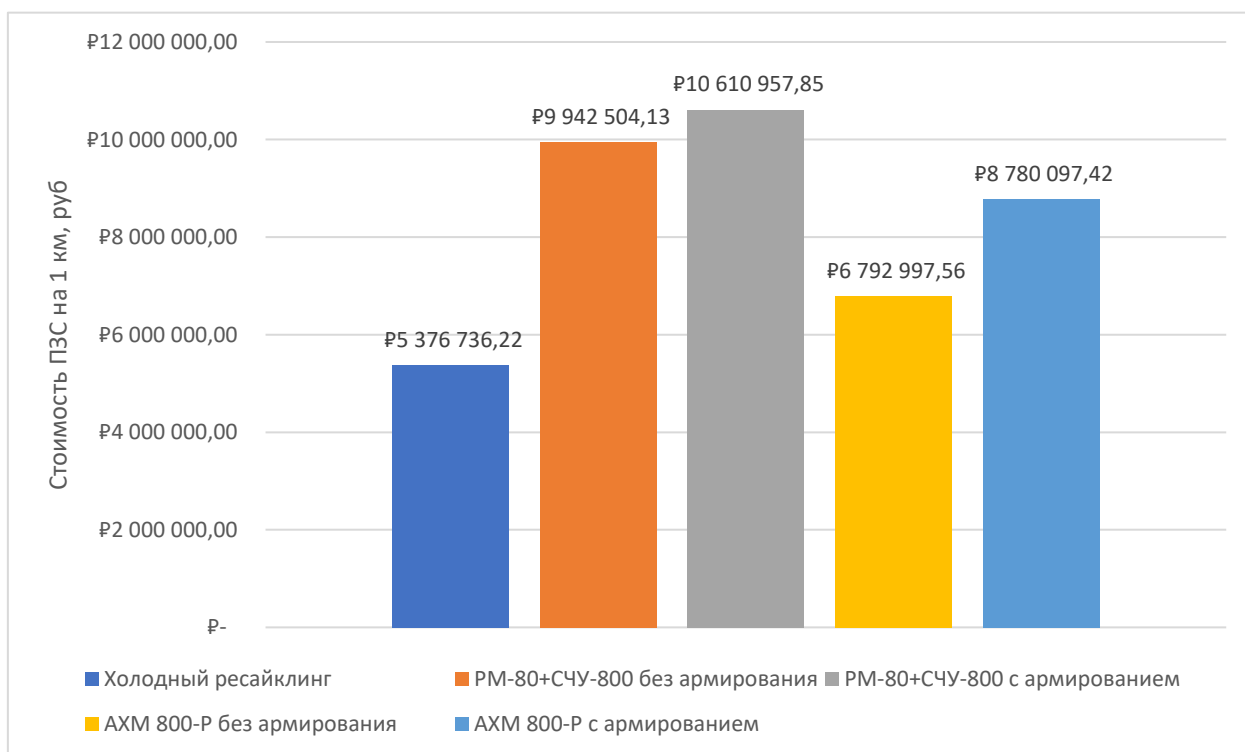


Рисунок 6.4 – Сравнение стоимостей работ по укладке ПЗС

По результатам сравнения стоимостей устройства 1 км ПЗС технология холодного ресайклинга для устройства ПЗС экономичнее применения комплекса АХМ 800-Р на 26–63 % и на 84–97 % экономичнее устройства ПЗС с применением щебнеочистительных комплексов РМ-80 и СЧУ-800. Стоит отметить, что приведенный расчет не учитывал необходимости вывоза и дальнейшей утилизации вырезанного грунта основной площадки, что может дать дополнительный экономический эффект.

6.3 Выводы по разделу 6

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 [153, 154] был разработан технологический процесс капитального ремонта с устройством ПЗС методом холодного ресайклинга. Согласно получившимся расчетам трудозатраты по устройству ПЗС составляют 19,91 чел-ч, что в 3,96 раз меньше, чем применение щебнеочистительных машин РМ-80 и СЧУ-800 и в 58 раз меньше применения машинного комплекса АХМ-800Р. По анализу графика производства работ погонная выработка при устройстве ПЗС по методу холодного ресайклинга составила 111 м/ч, что в 1,16 раз быстрее технологии с применением машин РМ-80 и СЧУ-800 и в 2,7 раз быстрее машинного комплекса АХМ-800Р. 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 подбалластного защитного слоя, 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. Техничко-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 дальнейшего развития темы является дальнейшее уточнение приведенных требований, а также разработка нормативно-технической документации по применению ПЗС из старогодных балластных материалов, обработанных вяжущим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. № 3363-р.
2. Певзнер, В.О. Обобщение зарубежного опыта по воздействию на путь грузовых вагонов с осевой нагрузкой 25 т/ось и более / В.О. Певзнер, О.Ю. Белоцветова // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2016. – Т. 9, № 9(9). – С. 184-189.
3. Лебедев, А.В. Состояние земляного полотна по итогам его эксплуатации в 2015 году / А. В. Лебедев // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути : Труды XIII Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца, Москва, 31 марта – 01 2017 года. – Москва: Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II, 2016. – С. 33-38.
4. Ашпиз, Е.С. Пути усиления основной площадки земляного полотна / Е.С. Ашпиз // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 6. – С. 55-56.
5. Ашпиз, Е.С. О влиянии тяжеловесного движения на земляное полотно / Е.С. Ашпиз // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 7. – С. 50-53.
6. Ашпиз, Е.С. Основная площадка при осевых нагрузках 27 тс / Е. С. Ашпиз, В. В. Виноградов // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 12. – С. 22-25.
7. Ашпиз, Е.С. Оценка воздействия тяжеловесных поездов на земляное полотно с учетом испытаний на участке Ковдор - Мурманск / Е.С. Ашпиз, А.В. Замуховский // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: Труды XIII Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца, Москва, 31 марта – 01 2017 года. – М.: Московский

государственный университет путей сообщения Императора Николая II, 2016. – С. 141-146.

8. Работа пути в условиях тяжеловесного движения / В.О. Певзнер, И.Б. Петропавловская, О.А. Суслов [и др.] // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути, Труды XIII Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца, Москва, 31 марта – 01 2017 года. – М.: Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II, 2016. – С. 138-140.

9. Скутина О.Л. Особенности эксплуатации железнодорожного пути на участках тяжеловесного движения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 4 (68). – С. 76–85.

10. Концепция перспективных направлений развития хозяйства пути и сооружений, утвержденная Распоряжением ОАО «РЖД» от 22.05.2023 № ЦДИ-454/р.

11. Инструкция по устройству подбалластных защитных слоев при реконструкции (модернизации) железнодорожного пути, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 12.12.2012 № 2544/р.

12. Маркин, М.А. Решение проблемы устранения локальных выплесков / М.А. Маркин // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 5. – С. 18-20.

13. Воробьев, В.Б. Усиление основной площадки земляного полотна подбалластным защитным слоем для повышения пропускной способности железных дорог / В.Б. Воробьев // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2022. – № 2(58). – С. 41-45.

14. Investigation on the stability and dynamic response of soil foundation under heavy haul railway tracks // International journal of engineering research & technology. – 2020. – Vol. 9 Issue 8. – С 377–386.

15. Сазонов, В.Н. Надежное земляное полотно - основа эффективной работы пути / В.Н. Сазонов, Е.С. Ашпиз // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 4. – С. 52-57.

16. Ашпиз, Е.С. Плоские георешетки для армирования подбалластных защитных слоев / Е.С. Ашпиз, В.С. Беляев // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 11. – С. 10-12.

17. Лабораторные исследования конструкции защитного слоя, армированного плоской георешеткой / Е.С. Ашпиз, А.В. Замуховский, А.П. Шмаков [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 1. – С. 22-25.

18. Блажко, Л. С. Увеличение несущей способности земляного полотна в слабоводопроницаемых грунтах / Л. С. Блажко, В. И. Штыков, Е. В. Черняев // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 12. – С. 26-29.

19. Блажко Л.С., Чуян С.Н., Захаров В.Б., Черняев Е.В. Анализ способов повышения несущей способности грунтов основной площадки земляного полотна // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2016. – № 3 (48). – С. 328–336.

20. Виноградов, В.В. Оценка новых технических решений по усилению земляного полотна / В.В. Виноградов, Ю.К. Фроловский, А.А. Зайцев // Путь и путевое хозяйство. – 2008. – № 6. – С. 24-25.

21. Моделирование усиления насыпи / В.В. Виноградов, Ю.К. Фроловский, А.А. Зайцев, И.В. Иванченко // Путь и путевое хозяйство. – 2007. – № 3. – С. 26-27.

22. 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.

23. 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.

24. Дыдышко, П.И. Обеспечение стабильности подшпального основания реконструируемых линий и вторых путей / П. И. Дыдышко // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 22. – С. 67–70.

25. Усиление пути добавками полифилизаторов / П.И. Дыдышко, С.В. Ольхина, Ю.А. Веселов [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – № 9. – С. 9–12.

26. Иванов, П.В. Повышение несущей способности железнодорожного земляного полотна, воспринимающего вибродинамическую нагрузку, искусственным укреплением грунтов основной площадки: специальность 05.22.06 "Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Иванов Павел Владимирович. – СПб., 1999. – 189 с.

27. Каримов М.С. Применение цементогрунта для укрепления основной площадки железнодорожного земляного полотна. – М.: Транспорт, 1964. – 32 с.

28. Каримов М.С. Исследование искусственной цементации грунтов основной площадки железнодорожного земляного полотна [Текст]: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук / Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. Геол. фак. – М.: [б. и.], 1965. – 18 с.

29. Козлов, А.В. Формирование защитных слоев железнодорожного земляного полотна с применением щебеночно-песчаных смесей: специальность 05.23.11 "Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Козлов Андрей Владимирович. – М., 2007. – 215 с.

30. Козлов, А.В. Профилактика деформаций подбалластного основания пути / А. В. Козлов // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 9. – С. 2–7.

31. Колос, А.Ф. Противодинамическая стабилизация железнодорожного земляного полотна путем цементации грунтов основной площадки: специальность 05.22.06 «Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Колос Алексей Федорович. – СПб., 2000. – 163 с.

32. Колос, А.Ф. Эффективность укрепления основной площадки земляного полотна полифилизаторами при строительстве железных дорог / А.Ф. Колос, И.С. Козлов, В.А. Вишняков // Бюллетень результатов научных исследований. – 2013. – № 1-2(6-7). – С. 22–27.

33. 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. – Т. 2, № 1. – С. 21–25.

34. Колос, А.Ф. Основные требования к земляному полотну высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва-Казань / А.Ф. Колос, И.В. Колос // Путь XXI века : Сборник научных трудов III международной научно-практической конференции, посвященной 205-летию создания Института Корпуса инженеров путей сообщения, СПб., 20 февраля 2015 года. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2015. – С. 7–13.

35. Коншин, Г.Г. Вибрации грунта земляного полотна / Г. Г. Коншин, А. П. Шмаков // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 11. – С. 31–35.

36. Коншин, Г.Г. Вибрационный метод диагностики насыпей / Г. Г. Коншин // Путь и путевое хозяйство. – 2007. – № 10. – С. 22–26.

37. Ланис, А.Л. Использование метода напорной инъекции при усилении земляного полотна железных дорог: специальность 05.22.06 "Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ланис Алексей Леонидович. – М., 2009. – 155 с.

38. Ланис, А.Л. Применение метода напорной инъекции для усиления насыпей / А. Л. Ланис // Путь и путевое хозяйство. – 2009. – № 6. – С. 33–35.

39. Ланис, А.Л. Способ усиления земляного полотна методом напорной инъекции / А. Л. Ланис // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 23. – С. 75–77.

40. Ланис, А.Л. Усиление грунтов земляного полотна на подходах к мостам и путепроводам / А. Л. Ланис, Д. А. Разуваев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 3(63). – С. 97–104.

41. Ланис, А.Л. Армирование эксплуатируемых высоких насыпей с инъецированием твердеющих растворов: специальность 05.22.06 "Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Ланис Алексей Леонидович. – М., 2019. – 409 с.

42. Лапидус Л.С. Несущая способность основной площадки железнодорожного земляного полотна [Текст] / Под ред. М.Н. Гольдштейна. – М : Транспорт, 1978. – 125 с.

43. Грицык, В.И. Условия усиления подбалластной зоны железнодорожного земляного полотна / В.И. Грицык, М.В. Окост // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2005. – № 3. – С. 117–124.

44. Окост, М.В. Повышение нагрузок и скоростей движения требует усиления железнодорожного земляного полотна / М. В. Окост // Инженерный вестник Дона. – 2008. – № 2(4). – С. 93–104.

45. Окост, М. В. Усиление подбалластной зоны железнодорожного пути покрытиями с использованием органических вяжущих: специальность 05.22.06 "Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Окост Максим Викторович. – Ростов-на-Дону, 2006. – 145 с.

46. Прокудин, И.В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку: специальность 05.22.06 "Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Прокудин Иван Васильевич. – Л., 1982. – 458 с.

47. Шахунянц, Г.М. Земляное полотно железных дорог [Текст]: Вопросы проектирования и расчета: [Учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта] / Проф. Г. М. Шахунянц, д-р техн. наук. – М.: Трансжелдориздат, 1953. – 828 с.

48. Ликвидация пучин на железнодорожном пути [Текст]: Конструкции и расчет. – М.: Изд. и 1 тип. Трансжелдориздата, 1938. - 180 с.: ил.; 21 см. - (Труды Московского института инженеров транспорта им. И. В. Сталина; Вып. 61).

49. Шахунянц, Георгий Михайлович. Земляное полотно [Текст] / Проф. Г. М. Шахунянц, д-р техн. наук. – М.: изд. 1-я тип. Трансжелдориздата, 1946. – 342 с.

50. Исследование земляного полотна железных дорог [Сборник статей] / Под общ. ред. проф. Г.М. Шахунянца. – М.: Транспорт, 1968. – 95 с.

51. Chang, C. S., Adegoke, C. W. and Selig, E. T. (1980) «The GEOTRACK model for railroad track performance» Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. GT11, pp. 1201 – 1218.

52. Li, D. and Selig, E. T. Cumulative plastic deformation for fine grained subgrade soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 12, 1996, pp. 1006 – 1013.

53. Li, D. and Selig, E. T. Method for railroad track foundation design I: Development Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 4, 1998, pp. 316 – 322.

54. Li, D. and Selig, E. T. Method for railroad track foundation design II: Application» Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 4, 1998, pp. 323 – 329.

55. Li, D. and Selig, E. T. Evaluation of railway subgrade problems» Transportation Research Record 1489, Transportation Research Board, 1995, pp. 17 – 25.

56. C. Esveld Modern railway track. Second edition. MRT-Production, 2001 – 632 p.

57. Yang, L., Lo, E., Blanchet, V. and Tun, Y.W. 2019. Stress distribution in multilayered Railway Formation and Subgrade. Proc. 13th Australia New Zealand Conference Geomechanics, Perth, pp 979-984.

58. Yang, L., Powrie, W. and Priest, J.A. 2009. Dynamic Stress Analysis of a Ballasted Railway Track Bed during Train Passage. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135 (5), pp 680-689.

59. Безрук, В.М. Укрепление грунтов [Текст]. – М.: Транспорт, 1965. - 340 с., 1 л. карт.: ил.; 22 см.

60. Безрук, В.М. Укрепленные грунты (свойства и применение в дорожном и аэродромном строительстве): научное издание / В. М. Безрук, И. Л. Гурячков [и др.]. – М.: Транспорт, 1982. - 231 с.: ил.

61. Безрук, В.М., Устройство цементно-грунтовых оснований и покрытий [Текст] / В. М. Безрук, К. А. Князюк. – М.: Дориздат, 1951. - 188 с., 1 л. диагр.: ил.; 22 см.

62. Теоретические основы укрепления грунтов цементом [Текст] / В. М. Безрук, д-р геол.-минерал. наук; Глав. упр. по строительству автомоб. дорог при Совете Министров СССР. Гос. Всесоюз. дор. науч.-исслед. ин-т Союздорнии. – М.: Автотрансиздат, 1956. - 248 с., 1 л. диагр.: ил.; 23 см.

63. Безрук, В. М. Методы комплексного укрепления грунтов цементом с добавками извести и электролитов [Текст]. – М.: Автотрансиздат, 1958. - 17 с.; 22 см.

64. Дорожные одежды из укрепленных грунтов: [учебное пособие для вузов по специальности "Автомобильные дороги"] / В.М. Безрук, А.С. Еленович. – М.: Высшая школа, 1969. – 330 с.

65. Безрук, В.М. Технология и механизация укрепления грунтов в дорожном строительстве [Текст] / [В.М. Безрук, Л.Н. Ястребова, Е.Ф. Левицкий и др.]; Под ред. В.М. Безрука. – М.: Транспорт, 1976. - 231 с.: ил.; 21 см.

66. Бируля, А.К. Дороги из местных материалов [Текст] / А. К. Бируля. – М.: Автотрансиздат, 1955. - 140 с. : ил.; 23 см.

67. Бируля, А.К., Механические свойства цементогрунта и использование их в конструкциях дорожных одежд / А.К. Бируля, Д.В. Ермакович // Материалы к V Совещанию по закреплению и уплотнению грунтов. – 1966. – С 375–379.

68. Грушко, И.М. Дорожно-строительные материалы: [Учеб. по спец. «Стр-во автомоб. дорог и аэродромов», «Мосты и трансп. тоннели» / И. М. Грушко, И. М. Борщ, И. В. Королев, Г. М. Мищенко]. – М.: Транспорт, 1991. – 357 с.

69. Грушко, И.М. Дорожные цементобетоны на местных материалах [Текст] / И. М. Грушко, В. А. Ступивцев, А. А. Демидова; под ред. М. И. Волкова; М-во строительства предприятий тяжелой индустрии УССР. Комбинат "Лугансктяжстрой". Трест "Луганскдорстрой". – Луганск: Донбасс, 1969. – 70 с.

70. Гурячков, И.Л. Исследование эффективности применения зол-уноса или золошлаковых смесей при укреплении грунтов портландцементом [Текст] : Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. (440) / Харьк. автомоб.-дор. ин-т. – М.: [б. и.], 1968. – 24 с.

71. Кейльман, В.А. Особенности проектирования дорожных одежд из каменных материалов и отходов промышленности в условиях мягкого климата / В.А. Кейльман / Вопросы производства и применения местных материалов из естественных горных пород и отходов промышленности при строительстве дорожных одежд: Труды Союздорнии. М.: 1981. – С. 21–22.

72. Кейльман, В.А. Местные материалы и активаторы в дорожном строительстве Юга РСФСР [Текст] / Рост. инж.-строит. ин-т. - Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 1962. – 80 с.: ил.; 22 см.

73. Кейльман В.А. Предложения по комплексному использованию местных известняков и отходов промышленности при устройстве дорожных одежд в IV климатической зоне – Ростов на/Д: Ростовский инженерно-строительный институт, 1974. – 150 с.

74. Климашов, Ф.С., Строительство дорожных оснований из крупного щебня пониженной прочности [Текст] / Ф. С. Климашев, Б. И. Курденков, В. К. Некрасов. – М.: Автотрансиздат, 1961. - 45 с.: ил.; 22 см.

75. Кузнецов, А.П. Местные обломочные материалы в строительстве на северо-западе / А. П. Кузнецов. – Ленинград: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1975. – 119 с.

76. Кузнецов А.П. Прочностные и деформативные свойства обломочных материалов, укрепленных цементом / А.П. Кузнецов / Материалы V всесоюзного научно-технического совещания по основным проблемам технического прогресса в дорожном строительстве. – 1971. С 105–115.

77. Салль, А.О. Наблюдения за работой цементогрунтовых оснований/ А.О. Салль, А.П. Кузнецов / Автомобильные дороги. – 1971. – № 10. – С. 24–25.

78. Кузнецов, А.П. Дорожные основания из слабых материалов, укрепленных цементом / А.П. Кузнецов / Автомобильные дороги. – 1963 - № 9. – С. 12-15.

79. Кузнецов, А.П. Влияние на прочностные показатели цементогрунта технологических факторов/ А.П. Кузнецов / Автомобильные дороги. – 1971. – № 1. – С 20–21.

80. Луканина Т.М. Исследование свойств грунтов, укрепленных карбамидными смолами, для целей дорожного строительства [Текст]: Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук / Моск. автомоб.-дор. ин-т. – М.: [б. и.], 1967. - 29 с.

81. Методические рекомендации по строительству оснований дорожных одежд с использованием связных грунтов, укрепленных минеральными или органическими вяжущими с добавками ПАВ и промышленных отходов / Гос. всесоюз. дор. НИИ; Составили Т. М. Луканина и др.]. – М.: Союздорнии, 1985. - 39 с.

82. Могилевич, В.М. Подбор состава цементогрунта с учетом технологии работ / В.М. Могилевич, Р.П. Щербакова, В.Н. Никитин // Автомобильные работы. – № 2(326). – 1969. – С 11–12.

83. Могилевич, В.М. Дорожные одежды из цементогрунта [Текст] / В. М. Могилевич, Р.П. Щербакова, О. В. Тюменцева; под общ. ред. В.М. Могилевича. – М.: Транспорт, 1973. - 214 с.: ил.; 22 см.

84. Придание грунтам водонепроницаемости и механической прочности [Текст] / проф. А. В. Николаев, проф. Л.Г. Берг, А.В. Беляев [и др].; под ред. чл.-корр. АН СССР П. А. Ребиндера и проф. А. В. Николаева; Акад. наук Союза ССР. – Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1942. – 29 с.

85. Салль, А.О. Дорожные одежды с основаниями из малопрочных каменных материалов в северо–западных районах СССР / А.О. Салль / Материалы V всесоюзного научно-технического совещания по основным проблемам технического прогресса в дорожном строительстве. – 1971. – С 26–33.

86. Салль, А.О. Методические рекомендации по строительству щебеночных оснований повышенной жесткости [Текст] Министерство транспортного строительства, Государственный всесоюзный дорожный научно-исследовательский институт (СОЮЗДОРНИИ). – 1978. – 13 с.

87. Славущий, А.К. Автомобильные дороги. Одежды из местных материалов: учебное пособие для автомоб.-дор. спец. вузов / А.К. Славущий, В.К. Некрасов, Г.А. Ромаданов [и др.]; под ред. А.К. Славущего – М.: Транспорт, 1967. – 255 с.

88. Славущий, А.К. Местные материалы в строительстве автомобильных дорог [Текст]. – М.: Высш. школа, 1961. - 122 с.: ил.; 20 см..

89. Славущий, А.К. Дорожные одежды из местных материалов = Автомобильные дороги [Текст]: [Учеб. пособие для вузов по специальности "Автомоб. дороги" / А.К. Славущий, В.Г. Волков, Б.И. Курденков и др.] ; Под ред. проф. А.К. Славущего. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1977. - 264 с.: ил.; 22 см..

90. Щербакова, Р.П. Укрепление грунтов цементом для дорожных одежд в условиях Западной Сибири: диссертация ... кандидата технических наук: 05.00.00. – Омск, 1965. — 237 с.

91. Habiba Afrin. A Review on Different Types Soil Stabilization Techniques. International Journal of Transportation Engineering and Technology. Vol. 3, No. 2, 2017, pp. 19-24. doi: 10.11648/j.ijtet.20170302.12.

92. K. Raja, E. Elakkya, A T Manikandan, B. Surya, M. Nekila Strength characteristics developed in cement stabilized soil. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. № 1055, 2021, pp 1–10.

93. Habeeb Solihu Cement Soil Stabilization as an Improvement Technique for Rail Track Subgrade, and Highway Subbase and Base Courses: A Review. Journal of Civil & Environmental Engineering, 2017.

94. Рабчук, С.А. Совершенствование путевого машинного комплекса / С.А. Рабчук // Путь и путевое хозяйство. – 2012. – №10. – С. 11–12.

95. Кузнецова, А.В. Прогноз накопления деформаций грунта земляного полотна под действием циклической нагрузки на основе результатов компьютерного моделирования / А В. Кузнецова, А.В. Савин // Транспортное строительство : Сборник статей второй всероссийской научно-технической конференции, Москва, 12–14 апреля 2021 года. – М.: Издательство "Перо", 2021. – С. 201-208.

96. J Cook, J. Buckley, M Dobie and R. Bhavsar, The use of Multi-Axial Geogrids in Rail Trackbed Stabilisation, ИННА Conference, Perth, Australia, 2015.

97. Технические требования к конструкции подбалластного защитного слоя с использованием продуктов от вырезки старого балласта щебнеочистительными комплексами (для опытного применения), утвержденные распоряжением ОАО «РЖД» от 22.02.2022 № ЦДИ-375.

98. Технические условия к материалу защитного слоя с использованием продуктов от вырезки старого балласта щебнеочистительными комплексами, научно-технический отчет. Этап № 1 «Результаты лабораторных испытаний». Руководитель темы Ашпиз Е.С., М.: МИИТ 2021. – 111 с.

99. Практическое применение технологий стабилизации грунтов и регенерации конструктивных слоев дорожной одежды: учебное пособие. М.: Межрегиональный ЦППК, 2017 г., 142 с.

100. Научные исследования Союздорнии за 50 лет – М.: Транспорт, 1977. – 230 с.

101. Доклады от СССР XIV Международному конгрессу (Прага, 1971). – М.: Транспорт, 1973. – 179 с.

102. Бушин, Е.Д. Применение малопрочных минеральных материалов, обработанных гудроном, для строительства местных дорог (в условиях Московской области): автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МАДИ, 1975. – 22 с.

103. Бухтояров, А.В. Оптимизация проектирования дорожных одежд нежесткого типа на основе местных дорожно-строительных материалов: дис. ... канд. техн. наук. – Воронеж, 2000. – 176 с.

104. Дагаев Б.И. Основания дорожных одежд из малопрочных известняков / Б. И. Дагаев. – М.: Транспорт, 1988. - 67,[2] с.: ил.; 22 см.

105. Кильматов, Р.Ф. Основания из укрепленных цементом материалов [Текст]. М.: Транспорт, 1965. - 62 с. : ил.; 21 см..

106. Абубакиров, И.К. Дорожные покрытия из известняка-ракушечника, укрепленного цементом в Каракалпакской АССР / И.К. Абубакиров, У.М. Раджапов, Ю.К. Спрысков // Материалы V всесоюзного научно-технического совещания по основным проблемам технического прогресса в дорожном строительстве. – 1971. – С 49–53.

107. ГОСТ 22733-2016 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности.

108. Марков, Л.А. Улучшение свойств грунтов поверхностноактивными и структурообразующими веществами [Текст] / Л.А. Марков, А.П. Парфенов, А.П. Петрашев и др.; под ред. д-ра техн. наук проф. И. И. Черкасова; [Предисл. акад. П.А. Ребиндера]. – М.: Автотрансиздат, 1963. - 176 с.: ил.; 22 см.

109. Ключников, Г.Я. Влияние замораживания–оттаивания цементогрунта на его прочность при сжатии и изгибе / Г.Я. Ключников // Материалы VII Всесоюзного совещания по закреплению и уплотнению грунтов. – 1971. – С 548–551.

110. Белов, В.В. Формирование оптимальной макроструктуры строительной смеси / В.В. Белов, М.А. Смирнов // Строительные материалы. 2009. №9. С 88–90.

111. Белов, В. В. Метод определения оптимального зернового состава заполнителя тяжелого бетона / В.В. Белов, М А. Смирнов, И В. Образцов // Вестник Тверского государственного технического университета. – 2012. – № 20. – С. 72-76.

112. Белов, В.В. Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач [Текст]: учебное пособие / [В.В. Белов, И.В. Образцов, В.К. Иванов, Е.Н. Коноплев]; Минобрнауки России, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Тверской гос. технический ун-т" (ТвГТУ). - Тверь: Тверской гос. технический ун-т, 2015. - 107 с.: ил., табл.; 21 см

113. Образцов, И.В. Оптимизация зерновых составов цементно-минеральных смесей для производства строительных композитов методами компьютерного моделирования: дис. ... канд. техн. наук. – Тверь, 2014. – 131 с.

114. Белов, В.В. Компьютерное оптимизирование зерновых составов строительных композитов на основе цементно-минеральных смесей // В.В. Белов, И.В. Образцов / Строительство и реконструкция № 2 (58), 2015. – С 83–89.

115. Волков, М.И. Определение прочности цементного бетона и щебня методом раскалывания/ М.И. Волков, Н.Ф. Глущенко // Научное сообщение № 3. – Х.: Типография Харьковского сельскохозяйственного института, 1957. – 16 с.

116. Ахвердов, И.Н. Исследование метода испытания бетона на растяжение посредством раскалывания образцов / И.Н. Ахвердов, С.М. Ицкович // Бетон и железобетон, 1961, № I. – С 19–23.

117. Марготьев, А.Н. Оценка прочности балластного слоя и земляного полотна по предельному состоянию [Текст]. – М.: Транспорт, 1970. - 152 с.: черт., карт.; 22 см.

118. Чернявский, В.Л. Физико-химические особенности гидратации цементов при низких температурах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харьков: Харьковский инженерно-строительный институт, 1966. –14 с.

119. Горчаков, Г.И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений [Текст] / Г. И. Горчаков, М.М. Капкин, Б.Г. Скрамтаев. – М.: Стройиздат, 1965. - 195 с.: ил.; 22 см.

120. Суфиянов, Р.Ш. Технология стабилизации грунта при строительстве автомобильных дорог / Р.Ш. Суфиянов // Вестник науки. – № 1 (34). – 2021. – С. 151–156.

121. Фурсов, С.Г. Строительство конструктивных слоев дорожной одежды из грунтов, укрепленных вяжущими материалами/ С.Г. Фурсов // Автомобильные дороги и мосты. – 2007. – № 3. – С. 17–21.

122. Клековкина, М.П. Инновационные материалы - добавки и стабилизаторы для укрепления грунтов / М.П. Клековкина, К В. Филиппова // Техника. Технологии. Инженерия. – 2017. – № 3(5). – С. 31-34.

123. Исследование физико-механических свойств стабилизированных «АНТ» грунтов / А.В. Андреева, О.Н. Буренина, Н.Н. Давыдова [и др.] // Приволжский научный вестник. – 2016. – № 4(56). – С. 23-27.

124. СТО 001-2012 Грунты, укрепленные цементом совместно с добавкой «NanoStab», для дорожного строительства.

125. СТО 69646750-001-2011 Смеси грунтовые и асфальтогранулобетонные, укрепленные добавкой Полибонд, для автодорожного, железнодорожного и аэродромного строительства.

126. Эффективность стабилизаторов различного состава при укреплении грунтов минеральными вяжущими / Т.В. Дмитриева, И.Ю. Маркова, В.В. Строкова [и др.] // Строительные материалы и изделия. – Том 3, № 1. – 2020. – С. 30–38.

127. Матуа, В.П Исследование влияния стабилизирующих добавок на свойства укрепленных минеральными вяжущими щебеночно-песчаных смесей / В.П. Матуа, С.В. Сизонец // Новые технологии. – 2013. – № 1. – С. 50–55.

128. СТО 13881083.002-2021 Полимерно-минеральная добавка Nicoflok для смесей с неорганическим вяжущим. Технические условия.

129. Патент на изобретение RU 2520118 С2. Композиция для устройства оснований дорожных одежд и других сооружений // Митрофанов Н.Г., Панов И.В., Румянцев Д.А., Шабанова Т.Н., Зенкин И.Н. // Патентообладатель: федеральное государственное бюджетное учреждение высшего профессионального образования «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет» // заявл. 03.09.2012; опубл. 20.06.2014, Бюл. № 17. – 11 с.

130. Подбор составов органоминеральных смесей для устройства слоя основания дорожной одежды из материалов, обработанных цементом совместно с ПМК NICOFLOK / М. В. Катарсонов, А. В. Кочетков, Д. И. Гофман, В. В. Куксаузен // Транспортные сооружения. – 2018. – Т. 5, № 4. – С. 9.

131. ГОСТ 30491-2012 Смеси органоминеральные и грунты, укрепленные органическими вяжущими, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия.

132. Compendium/ Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics. 2nd edition. Hamburg: Eurailpress. 2011 – 634 с. ISBN 13: 9783777103204.

133. ГОСТ 23558-94 Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства.

134. ГОСТ 7392-2014 Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия.
135. ГОСТ 12801-98 Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний.
136. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
137. ГОСТ 25607-2009 Смеси щебеночно-гравийно-песчаные для покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов.
138. Ашпиз, Е.С. Мониторинг эксплуатируемого земляного полотна: Теоретические основы и практические решения: диссертация ... доктора технических наук: 05.22.06. – М., 2002. – 396 с.
139. Кузнецова, Т.В. Физическая химия вяжущих материалов [Текст] : [учебник для вузов по специальности "Химическая технология тугоплавких неметаллов и силикатных материалов"] / Т.В. Кузнецова, И.В. Кудряшов, В.В. Тимашев. – М.: Высшая школа, 1989. - 383, [1] с.: ил.; 21 см.
140. Баженов, Ю.М. Технология бетона [Текст]: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по строительным специальностям / Ю. М. Баженов. - [5-е изд.]. – М.: Изд-во АСВ, 2011. - 524 с.
141. ГОСТ 70452-2022 Дороги автомобильные общего пользования. Грунты стабилизированные и укрепленные неорганическими вяжущими. Общие технические условия.
142. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений.
143. 17.0131-ИГИ. Устройство участков пути с использованием инновационных материалов на участке Заозерная–Камала, 2 путь (4269 км ПК6+50 – 4272 км ПК 4+50). Технический отчет по результатам инженерно-геологических изысканий для подготовки проектной документации. Том 2, Красноярск. – 77 с.
144. Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых

грунтов с крупнообломочными включениями / ДальНИИС. – М.: Стройиздат 1989. – 24 с.

145. ГОСТ 71404-2024 Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования.

146. Ромкин Д.С. Влияние возраста высокопрочного бетона на его физико-механические и реологические свойства: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.23.01 / Ромкин Денис Сергеевич; [Место защиты: Науч.-исслед. ин-т строит. физики Рос. акад. архитектуры и строит. наук]. – М., 2010. - 22 с.

147. Влияние формы зерен щебеночного балласта на его прочностные свойства / А.Ф. Колос, П.А. Чистяков, А.С. Леус [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. – 2017. – № 4. – С. 148-160.

148. Отчет по результатам весеннего цикла измерений на опытных и контрольных участках экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» и на опорном участке Московской ж.д. перегона Непецино–Яганово (окончательный). Руководитель темы Ашпиз Е.С., М.: МИИТ 2024. – 70 с.

149. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности, утвержденное Распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2017 № 2706р.

150. Отчет о проведении массовых расчетов для определения оптимальных значений модуля упругости подрельсового основания (промежуточный, этап 3). Руководитель темы Левинзон М.А., М.: ВЭИП 2022. – 45 с.

151. Технические требования к конструкции железнодорожного пути и системе его технического обслуживания, обеспечивающей наработку пропущенного тоннажа 2,5 млрд. тонн брутто, утвержденные распоряжением ОАО «РЖД» от 13.04.2023 № 931.

152. ГОСТ 29027-91 Влагомеры твердых и сыпучих веществ. Общие технические требования и методы испытаний.

153. Технологический процесс № к1241ц-20 «Капитальный ремонт пути 1 (2) уровня с выработкой 1300 м в сутки на закрытом перегоне со сложным планом и профилем».

154. Нормы времени на работы по ремонту верхнего строения пути, утвержденные Распоряжением ОАО «РЖД» от 14.04.2021 № 789/р.

155. Опытный технологический процесс № к354ц-10 комплексной реконструкции пути с применением щебнеочистительных машин РМ-80 и СЧУ-800 (откорректированный по опыту Октябрьской ж.д. на перегоне Торбино – Боровенка)

156. Технологический процесс № к1227ц-20 «Реконструкция железнодорожного пути с созданием подбалластного защитного слоя комплексом АХМ-800Р в режиме закрытого перегона».

157. Rudolf Schilder, Franz Piereder Formation rehabilitation on Austrian Federal Railways – five years of operating experience with the АНМ 800-R // Rail engineering International Edition, 2000, № 4. – pp. 11–16.

158. Распоряжение ОАО «РЖД» от 23.10.2023 № 2642/р «Об индексации заработной платы работников открытого акционерного общества «Российские железные дороги».

Приложение А
Результаты расчета коэффициента затухания напряжений

Таблица А.1 – Результаты расчета коэффициента затухания нагрузки для модулей деформации нижележащих слоев грунта от 10 до 30 МПа

Модуль деформации нижележащего слоя грунта, МПа при толщине ПЗС, см																	
10						20						30					
20		25		30		20		25		30		20		25		30	
$h, \text{ м}$	α_i	$h, \text{ м}$	α_i	$h, \text{ м}$	α_i	$h, \text{ м}$	α_i	$h, \text{ м}$	α_i	$h, \text{ м}$	α_i	$h, \text{ м}$	α_i	$h, \text{ м}$	α_i	$h, \text{ м}$	α_i
0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000
0,05	0,887	0,05	0,927	0,05	0,946	0,05	0,894	0,05	0,930	0,05	0,947	0,05	0,900	0,05	0,933	0,05	0,949
0,15	0,239	0,15	0,402	0,15	0,500	0,15	0,273	0,15	0,421	0,15	0,511	0,15	0,299	0,15	0,436	0,15	0,520
0,25	0,058	0,225	0,081	0,25	0,105	0,25	0,087	0,225	0,107	0,25	0,124	0,225	0,107	0,225	0,087	0,225	0,212
0,35	0,045	0,30	0,040	0,35	0,029	0,35	0,064	0,30	0,060	0,35	0,045	0,30	0,091	0,30	0,065	0,30	0,066
0,45	0,036	0,4	0,032	0,45	0,024	0,45	0,050	0,4	0,046	0,45	0,035	0,4	0,067	0,4	0,050	0,4	0,049
0,55	0,030	0,5	0,026	0,55	0,020	0,55	0,040	0,5	0,037	0,55	0,028	0,5	0,052	0,5	0,040	0,5	0,038
0,65	0,026	0,6	0,023	0,65	0,017	0,65	0,033	0,6	0,030	0,65	0,024	0,6	0,042	0,6	0,033	0,6	0,031
0,75	0,022	0,70	0,020	0,75	0,015	0,75	0,028	0,70	0,026	0,75	0,021	0,70	0,035	0,70	0,027	0,70	0,026
0,85	0,020	0,8	0,017	0,85	0,014	0,85	0,024	0,8	0,022	0,85	0,018	0,8	0,029	0,8	0,023	0,8	0,022
0,95	0,017	0,9	0,015	0,95	0,012	0,95	0,021	0,9	0,019	0,95	0,016	0,9	0,025	0,9	0,020	0,9	0,019
1,05	0,015	1,0	0,014	1,05	0,011	1,05	0,018	1,0	0,017	1,05	0,014	1	0,021	1,0	0,018	1	0,017
1,15	0,014	1,10	0,012	1,15	0,010	1,15	0,016	1,10	0,015	1,15	0,013	1,10	0,019	1,10	0,016	1,10	0,015
1,25	0,012	1,20	0,011	1,25	0,009	1,25	0,014	1,20	0,014	1,25	0,012	1,2	0,016	1,20	0,014	1,2	0,014
1,35	0,011	1,30	0,010	1,35	0,009	1,35	0,013	1,30	0,012	1,35	0,011	1,3	0,015	1,30	0,013	1,3	0,012
1,45	0,010	1,40	0,010	1,45	0,008	1,45	0,012	1,40	0,011	1,45	0,010	1,4	0,013	1,40	0,011	1,4	0,011
1,55	0,010	1,50	0,009	1,55	0,008	1,55	0,011	1,50	0,010	1,55	0,009	1,50	0,012	1,50	0,010	1,50	0,010
1,65	0,009	1,60	0,008	1,65	0,007	1,65	0,010	1,60	0,009	1,65	0,008	1,6	0,011	1,60	0,010	1,6	0,009

Модуль деформации нижележащего слоя грунта, МПа при толщине ПЗС, см																	
10						20						30					
20		25		30		20		25		30		20		25		30	
1,75	0,008	1,70	0,008	1,75	0,007	1,75	0,009	1,70	0,009	1,75	0,008	1,7	0,010	1,70	0,009	1,7	0,009

Таблица А.2 – Результаты расчета коэффициента затухания нагрузки для модулей деформации нижележащих слоев грунта от 40 до 50 МПа

Модуль деформации нижележащего слоя грунта, МПа при толщине ПЗС, см											
40						50					
20		25		30		20		25		30	
h , м	α_i	h , м	α_i	h , м	α_i	h , м	α_i	h , м	α_i	h , м	α_i
0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000	0,00	1,000
0,05	0,904	0,05	0,935	0,05	0,950	0,050	0,908	0,05	0,937	0,050	0,951
0,15	0,322	0,15	0,449	0,15	0,528	0,150	0,341	0,15	0,460	0,150	0,534
0,25	0,125	0,225	0,146	0,25	0,153	0,250	0,140	0,225	0,161	0,250	0,165
0,35	0,088	0,30	0,089	0,35	0,067	0,350	0,097	0,30	0,100	0,350	0,076
0,45	0,066	0,4	0,065	0,45	0,050	0,450	0,072	0,4	0,072	0,450	0,056
0,55	0,052	0,5	0,050	0,55	0,039	0,550	0,055	0,5	0,055	0,550	0,043
0,65	0,041	0,6	0,040	0,65	0,032	0,650	0,044	0,6	0,043	0,650	0,035
0,75	0,034	0,70	0,033	0,75	0,027	0,750	0,036	0,70	0,035	0,750	0,029
0,85	0,029	0,8	0,028	0,85	0,023	0,850	0,030	0,8	0,029	0,850	0,025
0,95	0,024	0,9	0,024	0,95	0,020	0,950	0,025	0,9	0,025	0,950	0,021
1,05	0,021	1,0	0,020	1,05	0,017	1,050	0,022	1,0	0,021	1,050	0,018
1,15	0,018	1,10	0,018	1,15	0,015	1,150	0,019	1,10	0,019	1,150	0,016
1,25	0,016	1,20	0,016	1,25	0,014	1,250	0,017	1,20	0,016	1,250	0,014
1,35	0,014	1,30	0,014	1,35	0,012	1,350	0,015	1,30	0,015	1,350	0,013
1,45	0,013	1,40	0,013	1,45	0,011	1,450	0,013	1,40	0,013	1,450	0,012

Модуль деформации нижележащего слоя грунта, МПа при толщине ПЗС, см											
40						50					
20		25		30		20		25		30	
1,55	0,012	1,50	0,011	1,55	0,010	1,550	0,012	1,50	0,012	1,550	0,011
1,65	0,011	1,60	0,010	1,65	0,009	1,650	0,011	1,60	0,011	1,650	0,010
1,75	0,010	1,70	0,010	1,75	0,009	1,750	0,010	1,70	0,010	1,750	0,009

Приложение Б

Ведомость затрат труда на проведение 1 км капитального ремонта пути с устройством ПЗС

Таблица Б.1 – Ведомость затрат труда на производство капитального ремонта 1 км пути с устройством ПЗС

Наименование работ	Измеритель	Объем работы	Затрат труда, чел-мин	Затрат труда, маш-мин	Всего на работу, мин	С учетом коэф. технологического запаса	Кол-во рабочих, чел	Продолжительность, мин
Подготовительный этап								
Снятие заземлителей опор контактной сети	1 заземлитель	16	3,44	—	55,04	68,8	4	17,2
ИТОГО				чел-мин	55,04	68,8	—	—
Вырезка балласта								
Подготовка мест для зарядки машины ЩОМ-2000	2 места зарядки	1	660	—	660	825	6	137,5
Зарядка машины ЩОМ-2000	2 секции	1	204	100,8	204	255	12	21,25
Приведение составов СЗ-240-6 в рабочее положение	1 состав	1	—	12,6	12,6	15,75	1	15,75

[illegible]

Наименование работ	Измеритель	Объем работы	Затрат труда, чел-мин	Затрат труда, маш-мин	Всего на работу, мин	С учетом коэф. технологического запаса	Кол-во рабочих, чел	Продолжительность, мин
Демонтаж рельсошпальной решетки краном УК25/9-18	10 звеньев	4	669,6	27,9	2678,4	3348	24	139,5
ИТОГО				чел-мин	2678,4	3348	—	—
Устройство ПЗС								
Распределение ЩПС грейдером	100 м ²	48	—	1,8	86,4	—	2	54
Поливка ЩПС из поливомоечной машины	1000	1	—	66,7	66,7	—	1	66,7
Распределение вяжущих материалов	150 м	13,32	—	3,55	47,34	—	2	23,67
Распределение полимерно-минеральной добавки	500 м	4	—	2,17	8,68	—	1	8,68

[illegible]

Наименование работ	Измеритель	Объем работы	Затрат труда, чел-мин	Затрат труда, маш-мин	Всего на работу, мин	С учетом коэф. технологического запаса	Кол-во рабочих, чел	Продолжительность, мин
Укладка рельсошпальной решетки звеньями краном УК25/9-18	10 звеньев	4	536,8	24,4	2147,2	2684	22	122
Монтаж рельсовых стыков	стык нити	80	11,856	—	948,48	1185,6	8	148,2
Заготовка и укладка рельсовых рубок	стык нити	2	57,22	—	114,44	143,05	7	20,44
Регулировка железобетонных шпал по эюре (10 %)	Шпала	184	3,4	—	625,6	782	6	130,33
ИТОГО				чел-мин	4410,72	5513,4	—	—
Балластировка и выправка пути								
Подготовка ХДВ к выгрузке	100 м ³	13,35	26,24	3,28	350,304	437,88	8	54,74
Выгрузка щебня из ХДВ	100 м ³	13,35	24	3	320,4	400,5	8	50,06
Приведение ХДВ в транспортное положение	100 м ³	13,35	38,24	4,78	510,504	638,13	8	79,77

Наименование работ	Измеритель	Объем работы	Затрат труда, чел-мин	Затрат труда, маш-мин	Всего на работу, мин	С учетом коэф. технологического запаса	Кол-во рабочих, чел	Продолжительность, мин
Приведение машины ВПО-С в рабочее положение	1 приведение	1	86,44	21,61	86,44	108,05	4	27,01
Выправка и рихтовка машиной ВПО-С	1 км пути	1	128,76	32,19	128,76	160,95	4	40,24
Приведение машины ВПО-С в транспортное положение	1 приведение	1	6,14	3,07	6,14	7,675	2	3,84
Приведение машины ДСП в рабочее положение	1 приведение	1	6,14	3,07	6,14	7,675	2	3,84
Стабилизация балластной призмы машиной ДСП	1 км пути	1	78,4	39,2	78,4	98	2	49
Приведение машины ДСП в транспортное положение	1 приведение	1	6,14	3,07	6,14	7,675	2	3,84

Наименование работ	Измеритель	Объем работы	Затрат труда, чел-мин	Затрат труда, маш-мин	Всего на работу, мин	С учетом коэф. технологического запаса	Кол-во рабочих, чел	Продолжительность, мин
Подготовка ХДВ к выгрузке	100 м³	8,01	13,12	3,28	105,0912	131,364	4	32,84
Выгрузка балласта из ХДВ	100 м³	8,01	24	6	192,24	240,3	4	60,08
Приведение состава ХДВ в транспортное положение	100 м³	8,01	19,12	4,78	153,1512	191,439	4	47,86
Приведение машины Дуоматик в рабочее положение	1 приведение	1	17,52	4,38	17,52	21,9	4	5,475
Выправка пути машиной Дуоматик	м пути	1000	0,293	0,086	293	366,25	4	91,56
Приведение машины Дуоматик в транспортное положение	1 приведение	1	15,36	3,84	15,36	19,2	4	4,8

Наименование работ	Измеритель	Объем работы	Затрат труда, чел-мин	Затрат труда, маш-мин	Всего на работу, мин	С учетом коэф. технологического запаса	Кол-во рабочих, чел	Продолжительность, мин
Приведение машины ДСП в рабочее положение	1 приведение	1	6,14	3,07	6,14	7,675	2	3,84
Стабилизация балластной призмы машиной ДСП	1 км пути	1	78,4	39,2	78,4	98	2	49
Приведение машины ДСП в транспортное положение	1 приведение	1	6,14	3,07	6,14	7,675	2	3,84
Приведение машины ПБ в рабочее положение	1 приведение	1	12	6	12	15	2	7,5
Планировка балласта машиной ПБ	1 км пути	1	134	67	134	167,5	2	83,75
Приведение машины ПБ в транспортное положение	1 приведение	1	12	6	12	15	2	7,5

Наименование работ	Измеритель	Объем работы	Затрат труда, чел-мин	Затрат труда, маш-мин	Всего на работу, мин	С учетом коэф. технологического запаса	Кол-во рабочих, чел	Продолжительность, мин
ИТОГО				чел-мин	2518,3	3147,8	—	—
Замена инвентарных рельсов на рельсовые плети, сварка плетей								
Выгрузка рельсовых плетей со спецсостава РС-800	1 км пути	1	98,20	24,55	98,20	122,75	4,00	30,69
Выгрузка стыков и укороченных рельсов краном УК:								
- раскрепление пакета рельсов, снятие проволочных обвязок, расшивка крайних рельсов	Пакет	1	30,13	—	30,13	37,66	4	9,41
- перетяжка пакета рельсов на платформу крана	Пакет	1	17,4	4,35	17,4	21,75	4	5,43
- выгрузка рельсов в местах установки ГНУ и сварки	Звено	2	16,5	2,06	33	41,25	8	5,16
Постановка клемм в монтажное положение кроме каждой третьей шпалы и анкерных участков:								

Наименование работ	Измеритель	Объем работы	Затрат труда, чел-мин	Затрат труда, маш-мин	Всего на работу, мин	С учетом коэф. технологического запаса	Кол-во рабочих, чел	Продолжительность, мин
- отвинчивание шурупа	Шуруп	4320	0,066	—	285,12	356,4	8	44,55
- сдвигка клеммы	Клемма	4320	0,054	—	233,28	291,6	4	72,9
- завинчивание шурупа	Шуруп	4320	0,122	—	527,04	658,8	8	82,35
ИТОГО				чел-мин	1224,17	1530,21	—	—
Замена инвентарных рельсов на рельсовые плети, сварка плетей								
Перевод оставшихся клемм в монтажное положение кроме двух шпал на звене:								
- отвинчивание шурупа	Шуруп	1760	0,066	—	116,16	145,2	2	72,6
- сдвигка клеммы	Клемма	1760	0,054	—	95,04	118,8	2	59,4
- завинчивание шурупа	Шуруп	1760	0,122	—	214,72	268,4	4	67,1
Отвинчивание гаек стыковых болтов ключами ЭК-1	Болт	328	0,83	—	272,24	340,3	4	85,08
Снятие стыковых накладок	Накладка	164	0,61	—	100,04	125,05	4	31,26

Наименование работ	Измеритель	Объем работы	Затрат труда, чел-мин	Затрат труда, маш-мин	Всего на работу, мин	С учетом коэф. технологического запаса	Кол-во рабочих, чел	Продолжительность, мин
Зарядка навесного устройства для надвигки плетей	Зарядка	1	24,9	4,15	24,9	31,13	8	3,89
Перевод клемм в монтажное положение на двух шпалах на звене	Клемма	320	0,35	—	112	140	4	35
Надвижка рельсовых плетей с погрузкой инвентарных рельсов на платформу крана, перетяжкой пакета рельсов	Звено	40	20,4	1,7	816	1020	12	85
Закрепление пакетов рельсов	Пакет	1	84,3	—	84,3	105,38	4	26,34
Укладка парных пластин на каждой 15 шпале	Пара пластин	245	1,17	—	286,65	358,31	4	89,58

Наименование работ	Измеритель	Объем работы	Затрат труда, чел-мин	Затрат труда, маш-мин	Всего на работу, мин	С учетом коэф. технологического запаса	Кол-во рабочих, чел	Продолжительность, мин
Установка клинового упора на конец рельсовой плети, укладываемой в верхнюю нить кривой. Снятие клинового упора	Установка	1	32	—	32	40	4	10
Соединение конца рельсовой плети, укладываемой в нижнюю нить кривой, с автосцепки локомотива тросом. Снятие троса	Установка	1	12	—	12	15	2	7,5

Наименование работ	Измеритель	Объем работы	Затрат труда, чел-мин	Затрат труда, маш-мин	Всего на работу, мин	С учетом коэф. технологического запаса	Кол-во рабочих, чел	Продолжительность, мин
Устранение в процессе укладки натяжения рельсовой плети по наружной нити кривой ударами ударного механизма в клиновой упор и устранение искривления плети по внутренней нити кривой подтягиванием локомотивом	100 м пути	5	40,8	—	163,2	204	6	34
Разрядка навесного устройства для надвигки рельсовых плетей	Разрядка	1	24,9	4,15	24,9	31,125	4	7,78

Наименование работ	Измеритель	Объем работы	Затрат труда, чел-мин	Затрат труда, маш-мин	Всего на работу, мин	С учетом коэф. технологического запаса	Кол-во рабочих, чел	Продолжительность, мин
Установка стыковых накладок, болтов, завинчивание гаек в начале укладки	Стык нити	2	16,2	—	32,4	40,5	4	10,13
Монтаж и установка гидравлических приборов на правой и левой нитях	Установка	2	48	—	96	120	4	30
Монтаж и установка ударного механизма с клиновым упором	Установка	2	16	—	32	40	4	10
Растягивание рельсовых плетей гидравлическими приборами	м плети	2000	0,065	—	130	162,5	4	40,63

Наименование работ	Измеритель	Объем работы	Затрат труда, чел-мин	Затрат труда, маш-мин	Всего на работу, мин	С учетом коэф. технологического запаса	Кол-во рабочих, чел	Продолжительность, мин
Встряхивание рельсовой плети ударным механизмом	Встряхивание	4	4	—	16	20	4	5
Снятие ударного механизма	Снятие	2	16	—	32	40	8	5
Снятие парных пластин	Пар пластин	245	1,048	—	256,76	320,95	4	80,24
Отвинчивание шурупов ключами КШГ на 3-5 оборотов, постановка клемм в рабочее положение:								
- отвинчивание шурупа	Шуруп	7360	0,066	—	485,76	607,2	2	303,6
- сдвигка клеммы	Клемма	7360	0,054	—	397,44	496,8	2	248,4
-завинчивание шурупа	Шуруп	7360	0,122	—	897,92	1122,4	4	280,6
Отключение и снятие с пути гидравлических приборов	Снятие	2	48	—	96	120	8	15

Наименование работ	Измеритель	Объем работы	Затрат труда, чел-мин	Затрат труда, маш-мин	Всего на работу, мин	С учетом коэф. технологического запаса	Кол-во рабочих, чел	Продолжительность, мин
Заготовка по расчету и укладка рельсовых рубок в конце участка работ	Рубка	2	46	—	92	115	8	14,38
Установка стыковых накладок и болтов на стыки рельсовых плетей с существующим путем в конце укладки	Стык нити	2	16,2	—	32,4	40,5	2	20,25
Обрезка концов рельсовых плетей с болтовыми отверстиями	Рез	4	10,02	—	40,08	50,1	4	12,525
Сварка рельсовых плетей машиной ПРСМ	Стык нити	4	129,54	21,59	518,16	647,7	6	107,95
ИТОГО				чел-мин	5509,07	6886,34	—	—

Наименование работ	Измеритель	Объем работы	Затрат труда, чел-мин	Затрат труда, маш-мин	Всего на работу, мин	С учетом коэф. технологического запаса	Кол-во рабочих, чел	Продолжительность, мин
Окончательная выправка пути								
Подготовка ХДВ к выгрузке	100 м ³	5,34	13,12	3,28	70,06	87,58	4	21,89
Выгрузка балласта из ХДВ	100 м ³	5,34	24	6	128,16	160,2	4	40,05
Приведение состава ХДВ в транспортное положение	100 м ³	5,34	19,12	4,78	102,10	127,63	4	31,91
Приведение машины Дуоматик в рабочее положение	1 приведение	1	17,52	4,38	17,52	21,90	4	5,48
Выправка пути машиной Дуоматик	м пути	1000	0,293	0,086	293	366,25	4	91,56
Приведение машины Дуоматик в транспортное положение	1 приведение	1	15,36	3,84	15,36	19,2	4	4,8

Наименование работ	Измеритель	Объем работы	Затрат труда, чел-мин	Затрат труда, маш-мин	Всего на работу, мин	С учетом коэф. технологического запаса	Кол-во рабочих, чел	Продолжительность, мин
Приведение машины ДСП в рабочее положение	1 приведение	1	6,14	3,07	6,14	7,68	2	3,84
Стабилизация балластной призмы машиной ДСП	1 км пути	1	78,4	39,2	78,4	98	2	49
Приведение машины ДСП в транспортное положение	1 приведение	1	6,14	3,07	6,14	7,68	2	3,84
Приведение машины ПБ в рабочее положение	1 приведение	1	12	6	12	15	2	7,5
Планировка балласта машиной ПБ	1 км пути	1	134	67	134	167,5	2	83,75

[illegible]