

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

На правах рукописи

АБРАШИТОВ АЛЕКСАНДР АХМЕТОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫПРАВОЧНЫХ РАБОТ  
ПНЕВМАТИЧЕСКИМ СУФЛЯЖЕМ**

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Певзнер Виктор Ошерович

Москва – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1 Исторический обзор способов выправки железнодорожного пути.....	9
1.1 Ударный способ уплотнения .....	10
1.2 Вибрационный способ уплотнения .....	12
1.3 Уплотнение с помощью прессования.....	13
1.4 Вибропрессовый способ уплотнения .....	14
1.5 Вибропульсаторный способ уплотнения .....	14
1.6 Укладка подрельсовых (подшпальных) прокладок .....	21
1.7 Способ подсыпки или суфляж .....	24
1.7.1 Вибрационная подсыпка.....	32
1.7.2 Пневматическая подсыпка или пневматический суфляж.....	33
1.8 Другие бесподбивочные способы выправки.....	36
Выводы к главе 1.....	40
Глава 2 Стендовые испытания осадки рельсошпальной решетки, выправленной способом пневматического суфляжа .....	42
2.1 Принципы физического моделирования .....	42
2.2 Программа стендовых испытаний осадки РШР в профиле .....	44
2.3 Методика стендовых испытаний осадки модели шпалы в зависимости от количества циклов нагружения.....	45
2.4 Порядок проведения испытаний осадки штампа, имитирующего шпалу, после выправки пневматическим суфляжем .....	47
2.5 Оценка миграции суфляжного камня в щебеночный балласт.....	52
2.5.1 Расчет суффозионности материалов по методике В.С. Истоминой.....	53
2.5.2 Расчет суффозионности материалов по методике ВНИИГ.....	55

2.5.3 Расчет контактного выпора несвязных материалов по методике ВОДГЕО.....	56
2.5.4 Геометрический метод Седергрена.....	56
2.6 Стендовые испытания проверки миграции суфляжного щебня различных фракций в путевой балласт.....	57
Выводы к главе 2.....	62
Глава 3 Эксплуатационные наблюдения на участке применения способа пневматического суфляжа на действующем пути и экспериментальная апробация способа пневматического суфляжа на экспериментальном кольце ВНИИЖТ.....	64
3.1 Эксплуатационные наблюдения на участке применения способа пневматического суфляжа на действующем пути .....	64
3.2 Оценка соотношения пропущенного тоннажа на пути и количества циклов нагружения при стендовых испытаниях моделей с пневматическим суфляжем.....	70
3.3 Испытания на опытном участке Экспериментального кольца ВНИИЖТ.....	75
3.4 Выводы по главе 3.....	78
Глава 4 Экономическая оценка применения пневматического суфляжа.....	80
4.1 Расчет трудозатрат на выправку пути ЭШП (Норма времени N 1.1) ...	80
4.2 Предлагаемая норма времени выправка пути пневматическим суфляжем.....	85
4.3 Выводы к главе 4.....	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	96
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	98
ПРИЛОЖЕНИЕ Акт внедрения результатов исследования.....	105

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

Рассмотренные в диссертации вопросы имеют в настоящее время большое практическое значение, которое заключается в научном обосновании эффективности и целесообразности внедрения способа пневматического суфляжа для устранения просадок на линиях интенсивного движения поездов с достижением экономического эффекта при текущем содержании пути, благодаря возможности проводить его выправку без нарушения графика движения, устраняя этим потери пропускной способности от снижения скорости движения поездов.

Результаты выполненной работы подтверждают возможность рекомендации применения пневматического суфляжа для оперативного краткосрочного устранения просадок рельсовых нитей. При этом, способ пневматического суфляжа наиболее эффективен в условиях интенсивного движения поездов (более 90 пар в сутки) и является единственным способом выправки пути на мокром выплеске без вырезки загрязненного щебня.

В связи с этим, разработка способа оперативного краткосрочного устранения просадок способом пневматического суфляжа при текущем содержании пути для без вырезки загрязненного щебня в условиях интенсивного движения поездов является актуальной.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследования в области балластной призмы железнодорожного пути были выполнены выдающимся отечественным ученым С.Н. Поповым [35] и Е.С. Варызгиным [17].

Особо следует отметить Г.М. Шахунянца, который впервые в 1975 году применил пневматический суфляж на Донецкой железной дороге [45]. На основе экспериментальных и расчетных данных он предложил и обосновал технологию выправки пути на плитном основании пневматическим суфляжем.

Необходимо отметить такого исследователя, как Б.А. Щербину, который собрал и систематизировал информацию о применении такого способа выправки, как выправка железнодорожного пути подсыпкой или суфляж [47].

Следует также упомянуть А.К. Борисова [15], составителя практического пособия по применению выправки подсыпкой или суфляж.

Большое количество исследований проблем балластной призмы железнодорожного пути провели А. К. Шафрановский [42], [43] и И.Ф. Попов, [34].

Значительный вклад в совершенствование путевого хозяйства, в том числе в области статистического анализа рельсового хозяйства и вопросах дефектоскопии внес В.Б. Каменский [22], [23].

Практически, исследования способа выправки подсыпкой или суфляж занимались А. А. Ерёмушкин [32] и Г.М. Васильченко [18].

Ученые из Великобритании и США Р. McMichael, Selig E.T. Waters J.M провели ряд исследований по развитию способа пневматического суфляжа и определения показателей осадочности рельсошпальной решетки во времени после проведения выправки пневматическим суфляжем [61], [66].

**Цель исследования** - обоснование возможности применения способа пневматического суфляжа при текущем содержании пути для оперативного краткосрочного устранения отступлений геометрии рельсовой колеи по уровню без вырезки загрязненного щебня в условиях интенсивного движения поездов.

**Основными задачами**, решаемыми в диссертационной работе, являются:

- 1) разработка предложений и технологии по применению способа пневматического суфляжа при текущем содержании пути для оперативного краткосрочного устранения просядок без вырезки загрязненного щебня, в том числе и на мокрых выплесках в условиях интенсивного движения поездов;
- 2) определение зависимости влияния пропущенного тоннажа на осадку пути в местах оперативного краткосрочного устранения просядок пневматическим суфляжем;
- 3) обоснование гранулометрического состава суфляжного щебня;
- 4) проведение стендового моделирования в лабораторных условиях осадки пути при разном гранулометрическом составе суфляжного щебня;
- 5) выполнение полевых испытаний технологии оперативного краткосрочного устранения просядок способом пневматического суфляжа на

опытных участках Московской железной дороги и Экспериментальном кольце ВНИИЖТ;

б) оценка эффективности оперативного краткосрочного устранения просадок способом пневматического суфляжа при устранении локальных просадок.

**Объектом исследования** является балластная призма железнодорожного пути из щебня.

**Предметом исследования** является оценка возможности применения способа пневматического суфляжа для оперативного краткосрочного устранения просадок железнодорожного пути без вырезки загрязненного щебня в условиях интенсивного движения поездов в том числе и на мокрых выплесках.

**Научная новизна** работы состоит в том, что:

1) разработаны и экспериментально апробированы основные положения технологии пневматического суфляжа при устранении локальных выплесков;

2) на основании теоретических предпосылок и лабораторного моделирования на стендах научно обоснован гранулометрический состав щебня для пневматического суфляжа;

3) на базе лабораторного моделирования получены зависимости осадки пути от гранулометрического состава суфляжного щебня;

4) экспериментально получены величины интенсивности осадки пути от пропущенного тоннажа при выправке способом пневматического суфляжа на действующей линии и на Экспериментальном кольце ВНИИЖТ;

5) обоснованы сфера применения и эффективность способа пневматического суфляжа при устранении локальных просадок.

**Теоретическая значимость** работы:

– установлены зависимости осадки пути от пропущенного тоннажа при оперативном краткосрочном устранении локальных просадок способом пневматического суфляжа при различном материале суфляжа;

– выполнена оценка методов проверки перемещения щебня, применяемого для пневматического суфляжа, в путевой балласт на основании стендового моделирования в лабораторных условиях.

#### **Практическая значимость работы:**

- доказана возможность применения пневматического суфляжа для устранения просадок;
- даны рекомендации по гранулометрическому составу щебня пневматического суфляжа для устранения локальных просадок;
- разработана и опробована технология устранения локальных просадок способом пневматического суфляжа.

#### **Методология и методы исследования**

Методологически, исследования состоят из комплекса, экспериментальных работ, теоретических расчетов и эксплуатационных наблюдений. Сначала были выполнены испытания способа пневматического суфляжа на стендовых моделях в лабораторных условиях. Полученные на стендовых моделях результаты и закономерности, в дальнейшем, были использованы при закладке объектов полевых испытаний и эксплуатационных наблюдений на опытных участках Московской железной дороги и Экспериментального кольца ВНИИЖТ. На основе результатов полевых испытаний и эксплуатационных наблюдений были сделаны окончательные выводы. В диссертационной работе использовались апробированные программы стендовых лабораторных испытаний и полевых экспериментов, соответствующие общепринятым методикам. Обработка полученных данных осуществлялась с применением методов математической статистики.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- обоснование гранулометрического состава суфляжного щебня по результатам лабораторных испытаний;
- результаты экспериментальной апробации способа пневматического суфляжа на Экспериментальном кольце ВНИИЖТ;

- результаты эксплуатационных наблюдений на участке применения способа пневматического суфляжа на действующем пути;
- экономическая оценка применения пневматического суфляжа.

### **Степень достоверности и апробация работы**

Достоверность результатов исследования обеспечивается использованием проверенных теоретических положений, применением в лабораторных и полевых экспериментах общепринятых методик и поверенного оборудования, и измерительных приборов и подтверждается сходимостью результатов лабораторного моделирования и полевых измерений на опытных участках. Полученные результаты согласуются с результатами исследований, выполненных ранее другими специалистами.

Основные положения диссертационной работы докладывались, были обсуждены и одобрены: на международной научно-технической конференции «Транспортной техники и Геотехнологии» 2017 г. С. Петербург, на 9-й международной научно-практической конференции по физическому моделированию и Геотехнике 2018 год, Лондон.

**Внедрение.** Результаты работы внедрены при выправке подходов к безбалластным конструкциям пути на экспериментальном кольце ВНИИЖТ.

## ГЛАВА 1 ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР СПОСОБОВ ВЫПРАВКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

В процессе выправки железнодорожного пути в продольном профиле ликвидируют просадки, отступления по геометрии рельсовой колеи (ГРК), образовавшиеся в результате накопления остаточных деформаций балласта и, частично, деформаций земляного полотна вследствие интенсивных ударных и вибрационных воздействий (особенно при повышенных скоростях и высокой осевой нагрузке), что приводит к быстрому износу материала балластной призмы [35]. Таким образом, из соображений безопасности возникает необходимость восстановления работоспособности балластного слоя работами по техническому обслуживанию пути, в том числе выправкой железнодорожного пути в профиле [22]. Выправка производится путём подъёмки путевой решётки до необходимой отметки (проектная отметка плюс запас на осадку) и заполнения образовавшихся просветов между нижней поверхностью шпалы и так называемой балластной постелью балластом с необходимой степенью уплотнения, либо путём корректировки положения рельсов по уровню, либо, при небольших величинах корректировки, заполнением пространства между рельсом и металлической подкладкой специальными упругими прокладками отпрядённых толщин и типоразмеров.

Существующие способы выправки железнодорожного пути условно можно разделить по применяемому способу доставки и уплотнения выправочного материала на: ударный, вибрационный, запрессовочный, вибропрессовый и вибропульсаторный, подкладочный, подсыпочный.

Способ подсыпки, по виду выполнения можно разделить на: ручную подсыпку с помощью суфляжных лопат и динамическую. Рассмотрим каждый из этих способов.

## 1.1 Ударный способ уплотнения

С самого начала существования железных дорог применяется ударный способ уплотнения под рельсовыми опорами, который уже около 200 лет используется на всех железных дорогах мира.

В процессе эксплуатации балластная призма требует периодических выправок в плане и продольном профиле из-за неравномерной осадочности балласта. Изначально для этого использовались металлические подбойки или деревянные штопки при наличии в виде балласта песка или песчано-гравийной смеси. Однако такие методы требовали больших трудозатрат и мускульной силы исполнителей. В то же время, производительность была низкой, не удалось достичь необходимой степени уплотнения и равноупругости подбивки, щебень разрушался при уплотнении. Появилась потребность в улучшении и упрощении технологии выравнивания пути в продольном профиле.

Эксперименты Шуберта [65] были одними из первых исследований по изучению влияния ручной подбивки шпал на осадку шпал в балласте. В своих опытах Шуберт использовал динамический стенд и механическое приспособление для приложения нагрузки к шпалам. Он пришел к выводу, что после подбивки шпала сначала быстро, а затем медленно вдавливается в балласт, пока не наступает стабильное состояние, при котором осадка происходит равномерно под воздействием динамических нагрузок. Шуберт называл этот процесс стабилизацией балласта, который оценивал, как полезное действие подбивки. Дальнейшее равномерное накопление остаточных деформаций Блюм [39] осуществляется в основном путем перемещения балластных гранул внутри балластного слоя. Скорость перемещения гранул зависит от влажности балласта: чем выше влажность, тем быстрее происходит перемещение. Блюм разработал теорию, согласно которой балласт можно рассматривать как некую жидкость, которая под действием динамической нагрузки выталкивается из-под шпалы в направлении наименьшего сопротивления. При этом перемещение должно происходить вверх между шпалами в шпальный ящик, запрещая движение вниз и

вдоль шпалы. Было доказано проведенными расчетами (сначала Шведлером, а затем Циммерманом [73]), что движение балластных гранул начинается от середины шпалы, расходится в обе стороны и воздействует на относительно ограниченный слой балласта. Внутри этого слоя каждая частица описывает спираль, близкую по форме к логарифмической. В дальнейшем это было подтверждено Е.С. Варызгиным[17].

В 1914 году на Московско-Казанской железной дороге профессором Е. И. Веденисовым была организована подбивка шпал с использованием пневматических шпалоподбоек ударного действия. Однако пневматическая ударная подбивка была внедрена в производство только в 1925 году на Сталинской железной дороге для путей с щебёночным балластом. Экспериментальные работы проводил инженер А. Н. Шумилов. В дальнейшем пневматические шпалоподбойки, такие как германские (FMA), английские (Broom-Wayd) и отечественные (ПД - 4, ШД - 19), получили широкое распространение при капитальном ремонте с использованием щебёночного балласта. Использование пневматических шпалоподбоек вместо ручной подбивки привело к увеличению производительности в два раза, более равномерной и плотной подбивке, уменьшению дробимости щебёночного и гравийного балласта, а также улучшению условий работы работающего. Введение этой механизации в путевые работы сыграло положительную роль [29].

За границей был разработан ряд машин, работающих по ударному принципу, таких как шпалоподбивочная машина пневматического действия от компании "Вильямс" (США), подбивочно-балластировочная машина от компании "Пульман-Стандарт" (США), подбивочная машина от корпорации железных дорог Питсбурга (США), шпалоподбивочная машина от Колли (Франция) и другие [13]. Однако, пневматические шпалоподбойки ударного действия имели множество серьезных недостатков. Во-первых, они требовали сложной и тяжелой сети воздухопроводов. Во-вторых, они создавали высокий уровень шума. В-третьих, они приводили к высокой степени дробления балласта, достигающей до 45%. Именно поэтому в период с 1935 по 1937 годы пневматические ударные шпалоподбойки были

заменены электрическими шпалоподбойками вибрационного действия (ЭШП), которые на тот момент обладали значительными технико-экономическими преимуществами перед пневматическими шпалоподбойками.

## 1.2 Вибрационный способ уплотнения

Уплотнение с помощью вибрации осуществляется путем передачи колебательного движения рабочему органу, который контактирует с балластным слоем. Это движение передается частицам балласта, что приводит к резкому снижению коэффициента внутреннего трения балласта. В результате частицы балласта становятся более подвижными и занимают устойчивое положение, заполняя пустоты. Вибрационный способ уплотнения имеет ряд преимуществ по сравнению с ударным способом. Он более интенсивно создает уплотнение, снижает дробимость более чем в два раза, обладает более подвижной и надежной энергетической базой, менее утомителен для работающих и экономичнее. Поэтому в настоящее время основным способом уплотнения балластного слоя является вибрационный метод, который полностью вытеснил ударный способ за короткий период. На его основе были разработаны и внедрены шпалоподбойки: ЭШП-1, ЭШП-2, ЭШП-3. В дальнейшем, в ЦНИИ и конструкторском бюро Калужского завода транспортного машиностроения, были разработаны и внедрены шпалоподбойки ЭШП-6, ЭШП-9, которые отличаются от предшествующих шпалоподбоек в лучшую сторону, как по производительности, так и по меньшему воздействию вибрации на нервную систему и внутренние органы человека.

На железных дорогах были разработаны различные шпалоподбивочные машины агрегатного типа, использующие электровиброшпалоподбойки. Среди них были машины системы Балашенко, Мироновича, шпалоподбивочное приспособление Папко и однопиточный подбивочный агрегат СД - 8 от Калужского завода транспортного машиностроения. Однако ни один из этих образцов не был доведен до серийного производства из-за недостаточной

проработки конструкции и экспериментальных исследований. По предложению Л.Н. Горохова, Ю.С. Огарь и А.Г. Чугунова Калужский завод транспортного машиностроения создал двухниточный подбивочный механизм типа ОПМ -1, на который устанавливались электрошпалоподбойки, что значительно облегчало работу работающих на текущем содержании пути. Большая работа была проведена по изучению, обобщению и дальнейшему развитию вибрационного способа подбивки шпал, проведенная кандидатом технических наук Н.А. Карповым [25]. Механизмы для уплотнения балласта в шпальных ящиках и на откосе призмы были созданы на основе принципа вибрации. Среди них можно выделить вибрационный уплотнительный механизм Крыловской дистанции пути СевероКавказской железной дороги, Мгинской дистанции пути Октябрьской железной дороги, а также машины для уплотнения балласта в шпальных ящиках системы Г.М. Ловяковича, К.Е. Иванова и типа «МИИТовец». Однако из-за большого веса и недостатков в конструкции, эти машины не получили широкого распространения.

### **1.3 Уплотнение с помощью прессования**

Исследования д.т.н. профессора П.А. Никифорова [29] показали, что прессование является наиболее выгодным и качественным способом уплотнения балласта, при этом экономические затраты минимальны. Для этого используются различные типы катков, которые применяются при уплотнении балластной призмы без путевой решетки. Однако опыты по уплотнению балласта под шпалами с использованием высокой статической нагрузки, проведенные Н.С. Павлюком и его коллегами, не дали положительных результатов. Это направление было признано нецелесообразным.

Современные шпалоподбивочные машины основаны на эффекте совместного использования нагрузки и вибрации. В мировой практике наиболее эффективными и перспективными признаны вибропрессовое и вибропульсаторное уплотнение щебня. Вибрационный способ уплотнения в настоящее время используется в основном для средств малой механизации.

### 1.4 Вибропрессовый способ уплотнения

Вибропрессовый метод уплотнения балласта основан на сочетании вибрации и прессования. На основе этого метода были разработаны различные шпалоподбивочные машины, включая ШПМ-02 (рисунок 1.1), которая была выпущена серийно на Кировском заводе и использовалась в комплексе машин для реконструкции, капитального и текущего ремонта пути [11], [40].



Рисунок 1.1 - Шпалоподбивочная машина ШПМ-02

### 1.5 Вибропульсаторный способ уплотнения

Вибропульсаторный способ уплотнения отличается от вибропрессового тем, что дополнительные усилия по уплотнению создаются за счет результирующей возмущающей силы вибраторов. Эта сила изменяется по закону, близкому к гармоническому, и действует вдоль направления ударных импульсов [12]. ЦНИИ МПС разработал ряд машин для путевого хозяйства, основанных на этом принципе. В частности, была создана самоходная машина непрерывного действия для уплотнения откосов и плеча балластной призмы пути с совмещенным

самосинхронизирующимся дебалансным вибратором направленного действия, щебнеуплотнительная машина шагающего типа, вибропульсаторная шпалоподбивочная машина ЦНИИ МПС и выправочно-подбивочно-отделочная машина непрерывного действия ВПО-3000, разработанная Н.А. Плохотским, Е.Р. Ивановым и Г.В. Солоновым. Эти машины механизировать трудоемкие работы по выправке и подбивке пути с производительностью 3000 шпал в час. Создание специальной машины для выправки и уплотнения пути решило проблему, связанную с его реконструкцией и ремонтом. ВПО - 3000-М, включенная в общий технологический процесс с другими, такими как путеукладочный кран УК-25, щебнеочистительная машина, хоппер-дозаторами, электробалластёром и ДСП стала основной при выправке и уплотнении балластной призмы. Было доказано, что одним из серьезных недостатков рассмотренных способов уплотнения балластного слоя является то, что около 53% засорения балласта обусловлено подбивкой [57].

Исследования Британских железных дорог показывают, что разрушение балласта при разном размере частиц, вызванное подбивкой, имеет различную тенденцию. Например, в общем гранулометрическом составе балласта количество частиц размером 38-51 мм уменьшилось на 15-45%. Кроме того, после 20 проникновений в балласт подбивочных бойков, число частиц размером 13 мм увеличилось на 1-5%. Другое исследование показывает, что при каждой подбивке образуется 2-4 кг мелких (менее 14 мм) частиц. Для балластного материала, гранита или иного балласта 20 выправок приводят к увеличению количества мелких частиц на 6-10%. Другое исследование показывает, что мелочь (менее 14 мм) составляет 0,05 кг и 0,25 кг для двух различных типов гранитов (за один процесс подбивки) [52].

Из приведенного выше видно, что подбивка негативно влияет на единичные балластные частицы. Однако, в предыдущих исследованиях есть некоторые пробелы в отношении влияния подбивки на разрушение балластных частиц. Разрушение единичной балластной частицы не было изучено в ранее проведенных экспериментах или полевых испытаниях. Механизм излома во время подбивки не был подтвержден, хотя были проведены моделирования с использованием метода

конечных элементов (МКЭ). В этих исследованиях использовались тесты на раздавливание одной частицы или истирание балластных гранул Лос-Анджелес (ЛАА) [67], которые не являются точным представлением излома. Деформация, вызванная сжатием подбивочных бойков, была смоделирована как трехосное испытание в [60] для более реалистичного моделирования условий сжатия сыпучей среды.

До настоящего времени не было точно определено количество излома балласта во время подбивки на основе изменений гранулометрического состава или процентного содержания частиц размером менее 14 мм (для гранулометрического состава, принятого в ЕС). Эти методы могут лишь частично оценить поломку балласта, но неадекватно представить тип, механизм и влияние разрушения балласта на характеристики балластного слоя после подбивки.

Балластные свойства проверяются испытаниями на истираемость, испытаниями на ударную нагрузку и т.д. Однако, устойчивость балласта с различными характеристиками к подбивке до сих пор оставалась неизвестной. Недостаточно изучено влияние гранулометрического состава, формы балластных частиц и прочности балластных гранул на излом балласта во время подбивки. Гранулометрический состав балластных частиц играет важную роль из-за своего влияния на объемную плотность и количество контактов между подбивочными зубьями и частицами балласта [51].

Ранние исследования разрушения балласта, вызванного подбивкой, показаны на рисунке 1.2. На рисунке 1.2а изображена балластная коробка со шпалой в процессе подбивки. Было проведено испытание 13 видов балластных материалов, и было установлено, что нет корреляции между количеством циклов и формой частиц или результатами теста на истираемость. Это исследование также подчеркивает сложность предсказания полевых характеристик подбивки на основе лабораторных результатов из-за множества факторов, влияющих на балластное подшпальное основание в полевых условиях.

На рисунке 1.2б показаны полевые испытания экспериментальной линии в процессе подбивки. Частицы балласта были помещены в мешок, чтобы изучить как

разрушение балласта в целом, так и разрушение отдельных частиц. Был проведен сравнительный анализ гранулометрического состава различных размеров балластных частиц до и после подбивки. Это исследование показало, что частицы балласта размером примерно 50 мм наиболее подвержены разрушению, так как они являются основой балластного слоя и поглощают большую часть энергии от уплотнения. Процесс подбивки не сильно изнашивает частицы балласта, что указывает на то, что поломка балласта является основным типом разрушения во время подбивки.

На рисунке 1.2в показано лабораторное испытание натурной модели пути, которое проводилось для изучения влияния процесса подбивки на разрушение балласта, оседание и засорение подбалластного слоя [56]. В ходе испытаний были использованы два типа гранита и один вид известняка. Результаты показали, что наиболее часто поломка происходит при проникновении подбивочных блоков, а не на стадии уплотнения. Подбивка ускоряет оседание балластного слоя, достигая быстро устойчивой стадии оседания, которая полностью осажена и уплотнена. Гидравлический вибропривод подбивочного устройства оказался более эффективным, чем механический, так как амплитуда гидравлической вибрации уменьшается при проникновении и сдавливании, что снижает разрушение частиц балласта [55].

На рисунке 1.2г показана модель процесса подбивки, учитывающая различное распределение частиц по размерам и формам. В этой модели сравнивается разрушение балластных частиц на разных участках, вызванное подбивкой. Исследования показали, что наибольшее воздействие подвергаются частицы балласта в шпальном ящике, и степень их разрушения составляет 1,65%. Частицы балласта с лещадными формами рекомендуется иметь менее 20%, так как они легко ломаются во время подбивки. Широкие гранулометрические составы с использованием крупных, близких по форме к кубу частиц обладают более высокой стойкостью к разрушению, чем узкие и тонкие (лещадные) [8].

Подбивка является низкоэффективным техническим обслуживанием. Например, для достижения высокого качества уплотнения и производительности

около 600 м/час, используются 16 подбивочных бойков и двойной роликовый зажим, в зависимости от условий рабочего места и настроек машины. Даже для ВПР MATISA-B-45 D, оснащенного двухроликовым зажимом для плоской линии и 32 подбивочными инструментами с высокочастотной эллиптической подбивкой, его максимальная производительность составляет примерно 1200 м/час. Максимальная скорость подбивки в настоящее время составляет 2600 м/ч, что соответствует подбивке Плассер 09-4X (четыре шпалы за один раз) в сочетании с динамической стабилизацией пути [7]. Это относительно медленно и малоэффективно для обслуживания, например, высокоскоростных железных дорог.



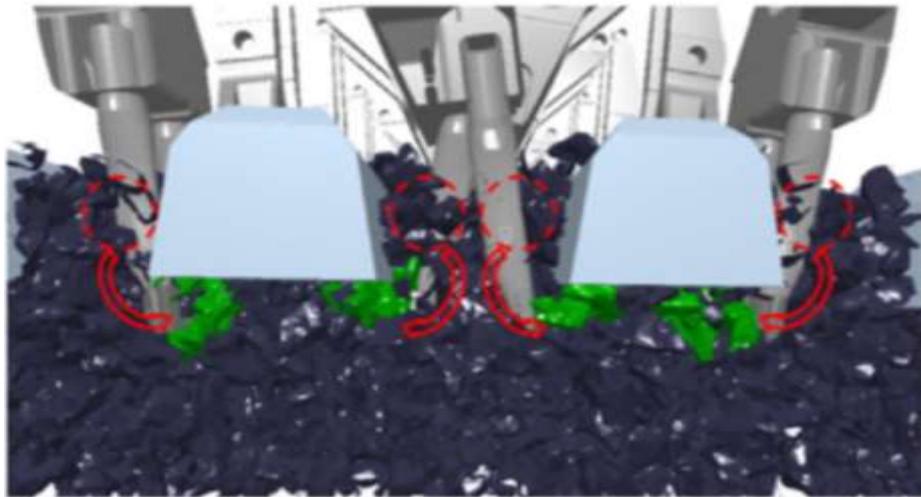
а - Лабораторные испытания подбивки (малый балластный ящик); рисунок воспроизведен из [72]



б - Полевые испытания подбивки (балластный мешок); рисунок воспроизведен из [68]



в - Лабораторные испытания подбивки (модель пути); рисунок воспроизведен из [68]



г - Матричное моделирование подбивки (3D модель одиночной шпалы); рисунок воспроизведен из [62]

Рисунок 1.2 - Экспериментальные или полевые исследования разрушения балласта, вызванного подбивкой

Низкая эффективность подбивки связана с необходимостью выполнения специальных конструкций, таких как стрелочные переводы и переходные участки,

а также новых элементов пути, например, рамная конструкция, путь с шлаковым балластом, уширенные шпалы, шпалы из стали или полиуретана. Подбивочная машина для стрелок и переездов обычно оснащена 16 подбивочными бойками, но подбивается только одна шпала за раз. Подбивочное устройство должно перемещаться горизонтально для полного покрытия балластного основания стрелочных переводов. Переключение и переходы требуют неоднократного уплотнения. Квалификация оператора ВПР также влияет на эффективность. Опытный машинист может достигать скорости 1,2-1,5 км/ч. На некоторых особых участках может потребоваться повторная подбивка, что занимает дополнительное время. В последние годы стали важными исследования в области приводных устройств для подбивки так, как они определяют эффективность и качество процесса подбивки при техническом обслуживании железнодорожного пути. Кроме того, они влияют на развитие подбивочных машин в направлении автоматизации и интеллектуализации.

Влияние шума. Подбивочная машина использует гидравлическую или механическую вибрацию для уплотнения балласта. В процессе работы она генерирует высокий уровень шума, и пока нет стандартов или методов, регулирующих уровень шума. Существующие подбивочные машины не имеют средств для снижения шума или его изоляции, что может быть вредно как для окружающих работников, так и для оператора машины.

Снижение бокового сопротивления. Подбивочные работы существенно снижают сопротивление балластной постели шпал как в поперечном, так и в продольном направлении, что может привести к проблемам с безопасностью и комфортом перевозок. Это происходит из-за того, что после уплотнения балластный слой становится более рыхлым и однородным. Вытаскивание подбивочных бойков из балласта приводит к образованию отверстий в балласте под рельсовой зоной шпального ящика, что также уменьшает боковое сопротивление. Подбивка замедляет движение поездов, что требует последующей обработки для восстановления сопротивления балластного слоя, например, динамической стабилизации пути.

Кроме того, скорость движения по обслуживаемому железнодорожному пути ограничивается из соображений безопасности после подбивочных работ. Ограничения скорости зависят от того, проводится ли проверка геометрии пути сразу после подбивки. В зарубежных нормативах ограничение скорости для первого поезда после подбивки и динамической стабилизации составляет 35 км/ч, для второго поезда - 45 км/ч, для третьего и последующих поездов в день выполнения работ по выправке - 60 км/ч. На вторые сутки после подбивки скорость первого поезда не должна превышать 60 км/ч, а для остальных поездов - 80 км/ч. На третий день после подбивки скорость первого поезда не должна превышать 80 км/ч, а для остальных - 120 км/ч. После четвертого дня скорость поездов может вернуться к нормальной, при условии обязательного осмотра изменения геометрии пути. Если рабочая скорость превышает 120 км/ч, поезда ограничиваются максимальной скоростью 120 км/ч, если скорость ниже, поезда могут двигаться в обычном режиме [69].

На практике после подбивки точное определение сопротивления балластного слоя затруднительно [53]. В полевых условиях эффективность подбивки оценивается по продольному и поперечному сопротивлению. Однако из-за ограничений по требованиям к проводимым испытаниям, стоимости испытаний и технологий проверки, полученных результатов часто недостаточно для точного определения параметров сопротивления [59].

С учетом этого, необходимо более детально изучить способы выправки, которые не затронут уже стабилизированный балласт щебеночной балластной призмы.

## **1.6 Укладка подрельсовых (подшпальных) прокладок**

Метод укладки прокладок заключается в заполнении свободного пространства между рельсом и подкладкой, или между подошвой шпалы и балластной постелью, специальными прокладками. При использовании жестких прокладок, их толщина должна быть равна требуемой подъемке, а при

использовании упругих прокладок - немного больше. Этот метод широко применяется для выправки пути в зимний период после образования ям, а также для текущего обслуживания пути на основаниях из щебня, с отдельным скреплением железобетонных шпал и на монолитных подрельсовых основаниях. Метод укладки прокладок между подошвой шпалы и постелью балластной призмы был впервые предложен Ф.Д. Барыкиным, а опытные работы по его применению начались под руководством А.К. Шафрановского в 1954 году [42]. Вначале прокладки изготавливались из обычной фанеры, но через четыре года они разрушались. В 1955 году на Московско-Смоленской дистанции пути успешно использовались твердые прокладки из кровельного эternита или плоского шифера для исправления небольших просадок и перекосов. Эти прокладки укладывались под шпалу в зоне рельса.

В 1958 году на Пушкинской дистанции Московской железной дороги были проведены опытные работы по выправке пути с использованием прокладок. В качестве прокладок использовалась фанера, пропитанная креозотом и фтористым натрием. Технология выполнения работ была аналогична технологии выправки пути методом подсыпки.

Путь, выправленный с помощью прокладок, оказался более устойчивым, чем при выправке пути подбивкой или подсыпкой. В следующем опыте, проведенном в 1957 году на Александровской дистанции Московской железной дороги, на участке со струнобетонными шпалами С-55 с отдельным скреплением К-4, после сдачи пути в эксплуатацию, выправка производилась с помощью карточек-амортизаторов, укладываемых между рельсом и подкладкой. После прохода около 26 миллионов тонн груза, толщина уложенных карточек достигла 12-16 мм, поэтому под эти шпалы были уложены прокладки из плоского шифера размером 20x30x0,6 см, по две прокладки под каждый конец. Укладка шиферных прокладок стала единственным средством выправки пути в течение трех лет. Общий расход труда на выправочные работы сократился примерно в два раза. Общий расход прокладок составил 200 штук на километр в год. После прохода 80 миллионов тонн груза брутто состояние пути оставалось хорошим. Качество выправки пути в

продольном профиле и по уровню было высоким, шпалы под проходящими поездами лежали плотно, отрясений совсем не было [34].

На участках с железобетонными шпалами наиболее эффективным способом выправки пути является комбинированный метод с использованием прокладок и карточек. Этот метод не нарушает уплотненную балластную постель. На Казатинской дистанции пути Юго-Западной железной дороги, где путь содержится на монолитном подрельсовом основании, также применялся способ выправки пути с использованием карточек. За трехлетний период эксплуатации не потребовалось подсыпать путь, так как еще не полностью использовалась возможность выправки с помощью карточек-амортизаторов марки "К". При выправке стрелочных переводов, уложенных на железобетонных плитах, также использовались карточки-амортизаторы. Профессор Г.М. Шахунянец [44], [46], [45] последовательно подтверждал необходимость, возможность и перспективность выправки пути с использованием прокладок. При проектировании новых скреплений также учитывается необходимость регулировки положения рельса по высоте с помощью прокладок.

Исходя из этого опыта, можно сделать вывод, что выправка пути до 10-20 мм путем укладки прокладок является эффективным и перспективным способом выправки пути с железобетонными и деревянными шпалами, имеющими раздельное скрепление марки "К", особенно на участках пути для скоростного движения с монолитным подрельсовым основанием, включая участки бесстыкового пути. Выправку пути укладкой или заменой прокладок можно проводить в течение всего года. При внедрении этого метода на участках бесстыкового пути можно расширить применение конструкции температурно-напряженного типа. Одну выправку при пропуске 50-80 млн. тонн груза всегда можно провести в достаточно холодное время года, когда риск выброса пути при производстве будет полностью исключен [16]. Согласно А.К. Шафрановскому, переход к методу укладки прокладок позволит уменьшить ежегодные объемы выправочных работ при текущем содержании пути на щебеночном балласте как минимум в шесть раз [43].

### 1.7 Способ подсыпки или суфляж

Способ подсыпки балласта под шпалу впервые был применен английским инженером Камбри и еще до 1910 г. получил распространение на железной дороге Лондон — Северо-запад; затем он был быстро распространен и на другие английские железные дороги. В первые годы применения английский способ суфляжа состоял в определении просядок пути «на-глаз» и выправке их подсыпкой под каждый конец просевшей шпалы четырех порций балласта, которые также брались «на-глаз». Рабочие бригадами по 3 человека проходили выправкой определенный участок, возвращались обратно и снова производили подсыпку. Эти операции повторялись до тех пор, пока не достигались удовлетворительные результаты. Подсыпка балласта производилась с одной стороны шпалы с предварительной отрывкой шпальных ящиков на длину до 1 м в шахматном порядке, как указано на рисунок 1.3 [48].



Рисунок 1.3 - Порядок отрывки шпальных ящиков

Англичане затем стали применять более точные методы, так, как частые выправки пути не обеспечивали полной устойчивости и неподвижности ГРК при проходе поездов. С 1925 г. на английской железной дороге (от Лондона через

центральную Англию до Шотландии) и частично французской (дорога Париж—Лион—Средиземное море) для измерения просадок применялись специальные визирки (рисунок 1.4), а для проверки возвышения одного рельса над другими — специальные рейки [48].

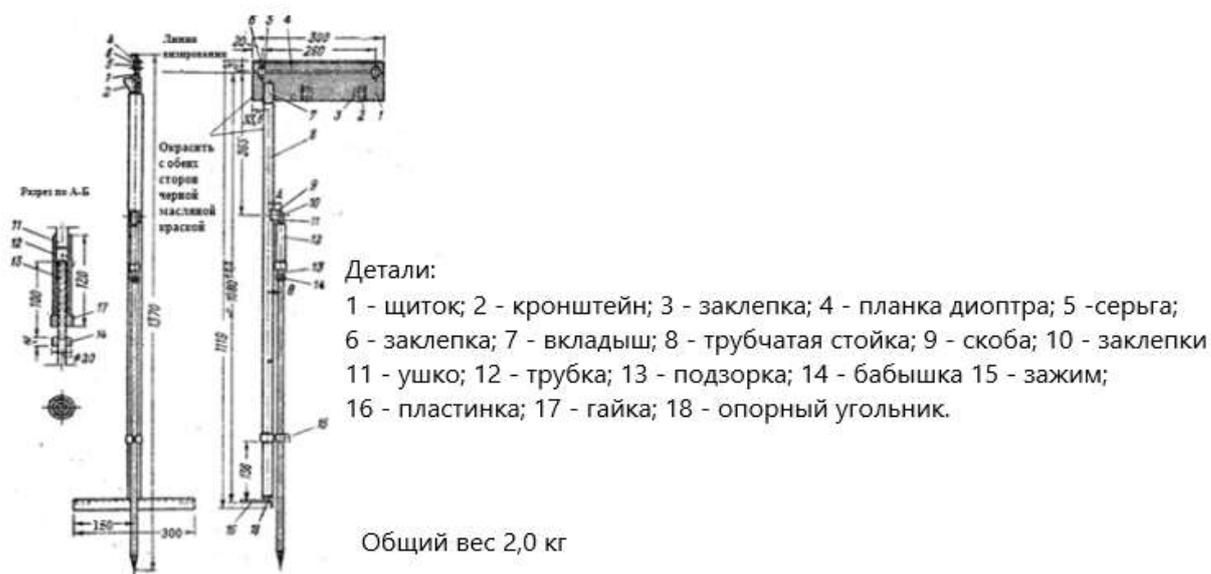


Рисунок 1.4 - Специальная визирка

Суфляж на французских железных дорогах.

Вскоре после первой мировой войны способ суфляжа из Англии был перенесен во Францию французским инженером Теттелином, где и получил очень быстро широкое распространение. Путем тщательного изучения и испытаний английского способа суфляжа французским инженером Леммером был разработан метод подсыпки, получивший тогда во Франции широкое применение под названием измеренной подсыпки. Этот способ заключался в подсыпке под каждую просевшую шпалу определенного количества балласта, измеряемого по величине просадки; при этом исправления производились значительно быстрее и достигалась большая устойчивость пути. На французских железных дорогах применялся следующий измерительный и рабочего инструмент. (рисунок 1.5).

- восемь дансометров для измерения величины потайных толчков (по четыре в одном футляре) (рисунок 1.6).

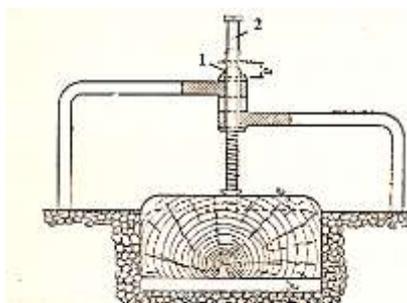
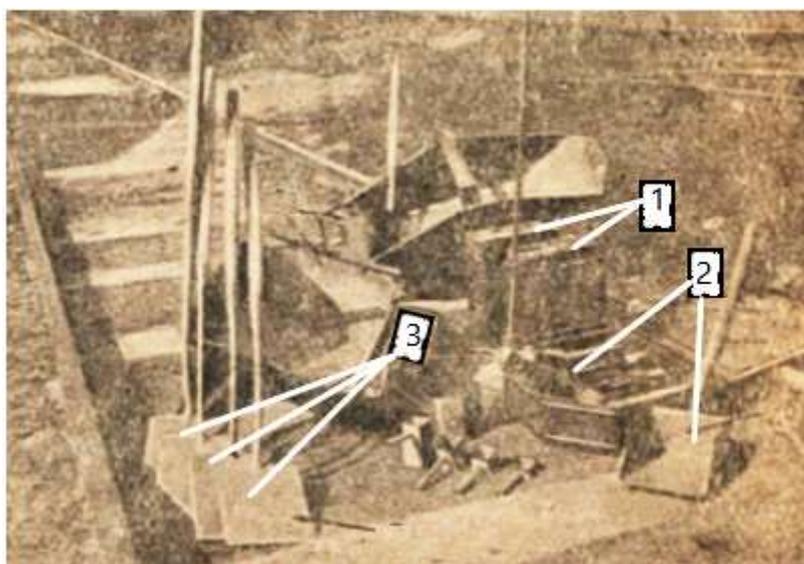


Рисунок 1.5 - Дансометр (прибор для измерения потайных толчков)

1 – резиновое кольцо 2 – стержень – шток



Рабочий инструмент:

1- два корыта для подачи дробленой щебенки;

2- две совковые лопаты для насыпки в корыта дробленой щебенки;

3- четыре суфляжные лопаты для подсыпки мелкой щебенки под шпалу

Рисунок 1.6 - Инструмент для производства суфляжа на французских железных дорогах

Метод суфляжа получил в то время широкое применение на дорогах Северной, Париж — Лион — Средиземное море и некоторых других государственных дорогах. Способ измеренной подсыпки применялся на стабилизированных путях. Везде, где подъемка не превышала 20 мм, подсыпка делалась за один прием; если приходилось делать подъемку более чем на 20 мм, то

балласт подсыпался под шпалу в два приема с обязательной обкаткой пути хотя бы одним поездом после первой подсыпки.

Подсыпка балласта под шпалу производилась одновременно под обе нитки. Для подсыпки применялся мелкий щебень или гравий твердых пород, имеющий следующие размеры: при первичной выправке, когда балластная постель под шпалой имела значительное количество пустот, применялась крупная щебенка 20—45 мм, при последующих выправках применялась щебенка размером 5—15 мм или 5—20 мм. Мелкий щебень распределялся под одним концом шпалы в виде четырех рядом укладываемых порций, Мерная кружка диаметром 10 см и высотой 12 см, наполненная до краев, давала объем балласта в 942 см<sup>3</sup>. Это соответствовало одной четверти объема балласта, необходимого для подъемки шпалы на 10 мм.

Суфляж на аргентинских железных дорогах.

С 1934 г. суфляж начал применяться и в Южной Америке. Впервые его стали применять на аргентинской железной дороге Буэнос-Айрес—Пасифик. Первый этап работы заключался в проектировании целого ряда специальных лопат для подсыпки балласта и в разработке способа подсыпки. После длительных испытаний аргентинцы остановились на способе подсыпки балласта под шпалу с торца. Аргентинцы считали, что при подсыпке с торца шпалы балласт укладывается на балластной постели более равномерно и не просыпается. Кроме того, при этом способе ящики не освобождались от балласта, благодаря чему сопротивление пути угону не ослаблялось.

Только в тех случаях, когда подсыпка с торца шпалы была невозможна из-за возникающих препятствий (стенок платформ, опор путепроводов, устоев мостов и др.), подсыпка производилась с боковых граней шпал, с отрывкой ящиков на длину до 1 м в шахматном порядке.

Производство работ по подсыпке балласта под шпалу.

На аргентинских железных дорогах щебень, лежащий в пути, имел фракционный состав от 25 до 70 мм: Суфляж применялся на щебеночном и песчаном балласте с подсыпкой балласта под шпалу преимущественно с торцевой части шпалы. Для подсыпки применялись следующие виды балласта: на путях со

щебеночным балластом — мелкий щебень, на путях со шлаковым или песчаным балластом — либо мелкий просеянный шлак, либо сухой песок. Мелкий щебень для подсыпки брался из твердых горных пород, преимущественно из гранита с крупностью зерен от 5 до 18 мм. Песок для подсыпки применялся крупнозернистый и обязательно сухой. Балласт для подсыпки заготавливался заблаговременно и складывался на обочинах кучами на расстоянии 0,5 км одна от другой.

В 30-х годах 20 века и на железных дорогах СССР начали также применять способ подсыпки или суфляж [47].

По опыту зарубежной практики суфляж применялся при выправках просадок пути на различном балласте, т. е. песке, гравии, щебне. На дорогах СССР суфляж впервые был применен в 1936 г. на щебеночном балласте и выполнен по способу французских железных дорог с подсыпкой сбоку шпал. В 1937 г. на двух дорогах был применен суфляж на песчаном балласте, выполненный по способу аргентинских железных дорог с подсыпкой с торца шпалы. В 1938 г. ряд дистанций пути полностью перешел на применение суфляжа с подсыпкой с торца шпалы на балластах песчаном и щебеночном и частично на гравелистом и ракушечном [3].

Суфляж применялся взамен исправления толчков и просадок рельсовых ниток подбивкой величиной до 25мм подсыпкой определённых порций балласта под шпалы специальными лопатами (рисунок 1.7).

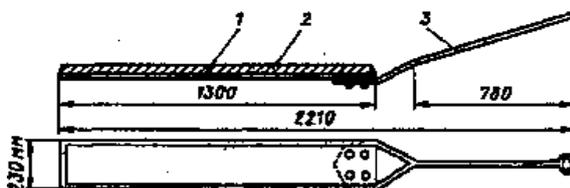


Рисунок 1.7 Лопата для выправки пути подсыпкой балласта под шпалы (суфляжная лопата):

1- полотно лопаты, 2 - подсыпаемый слой балласта; 3 – ручка

При применении суфляжа необходимо было соблюдать следующие требования:

- а) точно определять видимые просадки и потайные толчки;

б) точно отмеривать порции балласта и правильно подсыпать балласт лопатами под шпалы.

Суфляж применялся при выправке видимых просадок и потайных толчков величиной до 20 мм на различных балластах: песчаном, щебёночном, гравийном и ракушечном.

До производства работ способом суфляжа путь должен был быть соответственно подготовлен, а именно:

- а) не должно было иметься слитых зазоров;
- б) путь должен был быть достаточно укатан поездами;
- в) в местах выплесков грязная корка балласта должна была быть предварительно вырезана и путь подбит свежим балластом;
- г) шпалы, передвинутые вдоль пути более чем на 3 см, должны были быть предварительно подбиты.

Применять суфляж позволялось только бригадам, усвоившим технологический процесс и имеющим необходимое оборудование, получившим разрешение на применение суфляжа.

Балласт для суфляжа должен был удовлетворять следующим требованиям.

1. Песчаный балласт должен был быть чистым, отвечающим требованиям технических условий.

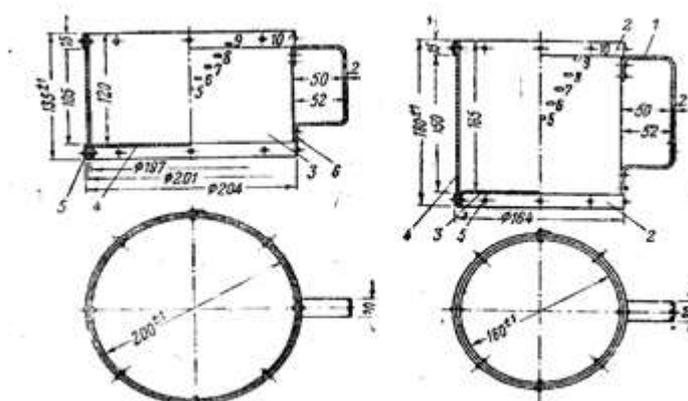
2. Мелкий щебень из материалов: базальта, гранита или твёрдых песчаников, должен был иметь форму, близкую к кубу. Размеры зёрен: от 10 до 25 мм — для подсыпки в течение первого года после реконструкции пути и от 5 до 10 мм для подсыпки в последующие годы.

3. Гравий должен был быть чистым, дроблёный с зёрнами размером до 20 мм.

Путь вывешивался домкратом не более чем на 1 см выше величины просадки. Домкраты для подъёмки устанавливались с наружной стороны ниток один против другого, обеспечивалось их строго вертикальное положение. Подъёмка обеих ниток производилась одновременно во избежание порчи рихтовки. Для пропуска поезда во время работы делался отвод 5%.

С одной установки домкрата подсыпали не более 4 шпал (по 2 шт. от домкрата в ту и в другую сторону).

При щебёночном балласте лопата заполнялась балластом на длину 1 м до конца по направлению к ручке и подводилась под шпалу на длину 1,1 м. Извлекалась лопата из-под шпалы быстрым рывком. Балласт отмерялся мерной кружкой (рисунок 1.8).



Детали: 1- ручка; 2 - кольцо; 3 - дно; 4 - цилиндр

Рисунок 1.8 - Мерные кружки для балласта подсыпки: слева для щебёночного и ракушечного балласта; справа для песчаного и песчано-гравийного балласта

Для щебёночного и ракушечного балласта диаметр кружки был 20 см, высота 12 см; объём балласта в полной кружке равен  $750 \text{ см}^3$  и являлся нормой под один конец шпалы при просадке в 10 мм. [3]. В 1938 и 1939 гг. Институтом пути и строительства НКПС были выпущены специальные пособия, где подробно анализировался отечественный и зарубежный опыт применения этого способа, в том числе на щебёночном балласте. В 1939 году через журнал «Путеец» была организована дискуссия, в которых приняли участие дорожные мастера, инженеры путейцы. По итогам дискуссии летом 1939 года было проведено широкое совещание работников пути, где был одобрен способ подсыпки, обобщён опыт его применения и намечены основные контуры технологического процесса подсыпки. В дальнейшем после утверждения в 1940 году «Инструкции по выправке толчков, просадок и перекосов пути способом подсыпки» /Суфляж/ ЦП/1252 [3] способ

подсыпки был распространён повсеместно и стал одним из основных способов выправки пути при текущем содержании.

До производства работ способом суфляжа путь должен был быть соответственно подготовлен, а именно:

- а) не должно было иметься слитых зазоров;
- б) путь должен был быть достаточно укатан поездами;
- в) в местах выплесков грязная корка балласта должна была быть предварительно вырезана и путь подбит свежим балластом;
- г) шпалы, передвинутые вдоль пути более чем на 3 см, должны были быть предварительно подбиты.

Применять суфляж позволялось только бригадам, усвоившим технологический процесс и имеющим необходимое оборудование, получившим разрешение на применение суфляжа.

Балласт для суфляжа должен был удовлетворять следующим требованиям.

В правилах ЦПТ-52, отмененных относительно недавно (2019 г.) [36] подобный способ был рекомендован к применению на участках звеньевого пути с чистым асбестовым или песчаным балластом при просадках величиной до 15 мм или при снятии пучинных карточек такой же толщины

В чем же заключалось преимущество выправки суфляжем перед выправкой подбивкой? Как отмечал Г. М. Шахуняц: «необходимость исправления местных просадок и толчков посредством подбивки балласта под шпалы при многократных подбивках по сути, ведет к разрыхлению уже несколько уплотнившегося под шпалами балласта, к повышению неоднородности пути, к повторному образованию толчков и просадок. Постепенно интенсивность их нарастания увеличивается и ведет к назначению вновь ремонта» [44].

Уже в настоящее время, в исследованиях Ерёмушкина А.А. [32], которые были проведены в условиях экспериментального кольца ВНИИЖТ, и, в свою очередь, были подтверждены экспериментами Васильченко Г.М. [18], проведёнными на эксплуатируемом пути полигона Московской железной дороги,

доказано, что суфляж даёт наименьшую интенсивность роста просадки пути во времени.

В 70-х годах 20 века была сделана попытка модернизировать способ выправки подсыпкой или суфляж внедрением пневматического суфляжа. Испытания проводились Путьиспытательной лабораторией МИИТ под руководством Г.М. Шахунянца в 1975 году [20] в качестве способа исправления пути на плитном основании.

В 50х-60-х годах 20 века со способом выправки суфляжем случилось следующее. В результате успешного внедрения способа подсыпки, который был принят работниками пути без каких-либо значимых затруднений, суфляж был лишен научного и технологического сопровождения, требования по соблюдению технологии и выполнению требований по составу и качеству балласта перестали исполняться должным образом. Изготовление и усовершенствование инструмента не было выполнено, соответствующего обучения низовых кадров не проводилось.

Всё вышперечисленное привело к тому, что на ряде дорог в результате нарушения технологии было констатировано ухудшение состояния пути и, фактически, способ подсыпки был дискредитирован. Вместо выявления истинных причин руководство путевой инфраструктуры ввело временные, а затем и постоянные ограничения применения суфляжа и усилило контроль за исполнением этих ограничений

Суфляж был запрещён на песчаном и щебеночном балласте, и работники путевой инфраструктуры были лишены хорошего способа работы по текущему содержанию пути.

### **1.7.1 Вибрационная подсыпка**

На принципе, использования направленного вибрирования для перемещения и создания скорости движения твёрдым телом, в технике создан и внедрён ряд машин и механизмов, таких как вибро - пневматические транспортные устройства,

вибрационные транспортёры и другие, которые за последнее время получили всё большее распространение.

В путевом хозяйстве этот принцип широко используется в подбивочных и уплотнительных машинах. Не исключена возможность использования этого принципа и для подсыпки. По утверждению кандидата технических наук Н.А. Карпова наиболее целесообразным является использование направленного вибрирования при перемещении и уплотнении балласта с применением дебалансных вибраторов, которые получают всё большее применение.

Конструкторы Калужского завода транспортного машиностроения А.Н. Горохов и Ю.С. Огарь разработали конструкцию лопаты для подсыпки на принципе направленного вибрирования, однако она не получила положительных результатов.

### **1.7.2 Пневматическая подсыпка или пневматический суфляж**

В 70-х годах 20 века была сделана попытка модернизировать способ выправки подсыпкой или суфляж внедрением пневматического суфляжа. Испытания проводились Путьиспытательной лабораторией МИИТ под руководством Г.М. Шахунянца в 1975 году [20] в качестве способа исправления пути на плитном основании.

На принципе использования направленного воздушного потока для перемещения и придания скорости твёрдым телам в технике было разработано, и применяется на практике много устройств таких, как пескоструйные аппараты, эксгаустеры эжекторно-пневматические метательные машины и др.

Построенная на этом принципе на железных дорогах США применялась шпалоподбивочная машина Вульфа для выправки на песчаном балласте, состоящая из компрессора с центробежным вентилятором и специального воздухометательного иньектора (рисунок 1.9)

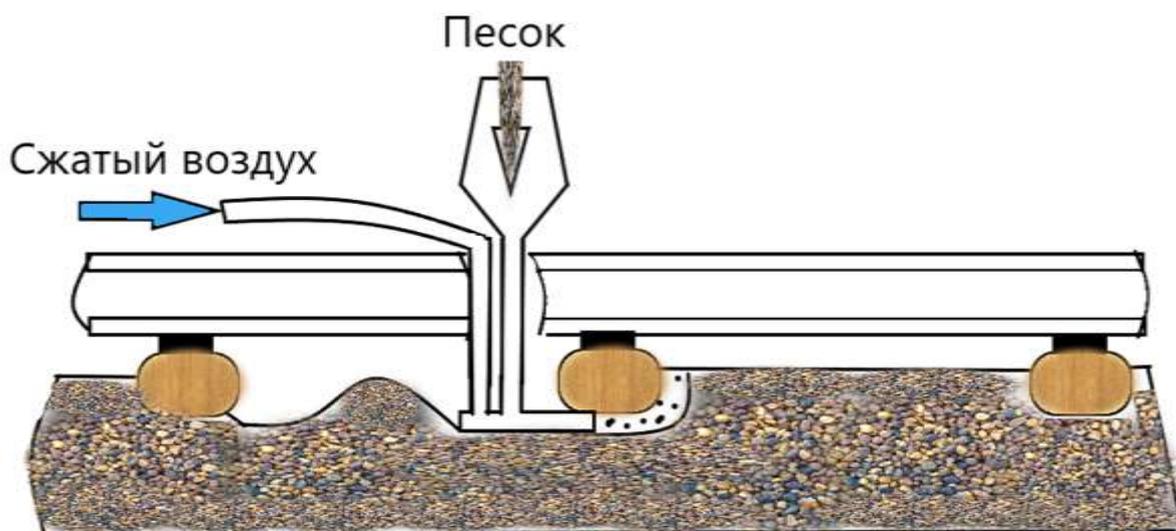


Рисунок 1.9 - Выправочная машина Вульфа

Принцип пневматического суфляжа состоит в нагнетании мелкого щебня в образующуюся между нижней поверхностью и постелью шпалы полость давлением сжатого воздуха, взамен традиционной выправки [66].

На рисунке 1.11а показана пневмосуфляжная машина [61], которая нагнетает воздух для вдувания мелких частиц (примерно 14-20 мм) в пустоты между шпалой и балластной постелью. Его преимущество заключается в сохранении прежнего уплотнения балласта под зазором (между шпалой и слоем балласта) [9]. Другими словами, он не нарушает работу сложившегося балластного слоя. Для этого не требуется динамическая стабилизация пути после пневматического суфляжа. К тому же осадка после пневмосуфляжа не такая высокая, как после выправки подбивкой и уплотнения [9]. Его можно использовать для балластного слоя с сильным загрязнением, чтобы избежать остановки движения по участку и очистки балласта [49], [10].

Машинизированный пневматический суфляж имеет четыре следующих недостатка.

- Низкая производительность. Производительность машины пневматического суфляжа составляет 350 м / ч, что намного ниже подбивки.

- Коррекция небольших отступлений геометрии пути. Машина не может исправить небольшую (менее величины минимальной фракции пневмосуфляжного щебня) неровность пути, потому, что балластная постель не ослаблена.

- Неопределенное боковое сопротивление. Добавление мелких частиц (14-20) может снизить поперечное сопротивление, в то время как ненарушенный балластный слой сохраняет более высокое поперечное сопротивление. Результирующее боковое сопротивление не определено. Согласно ранее выполненным исследованиям [70], машинный пневматический суфляж снижает боковое сопротивление на 50-65% [63].

- Вертикальная жесткость может исправлена только при небольших продольных отклонениях.

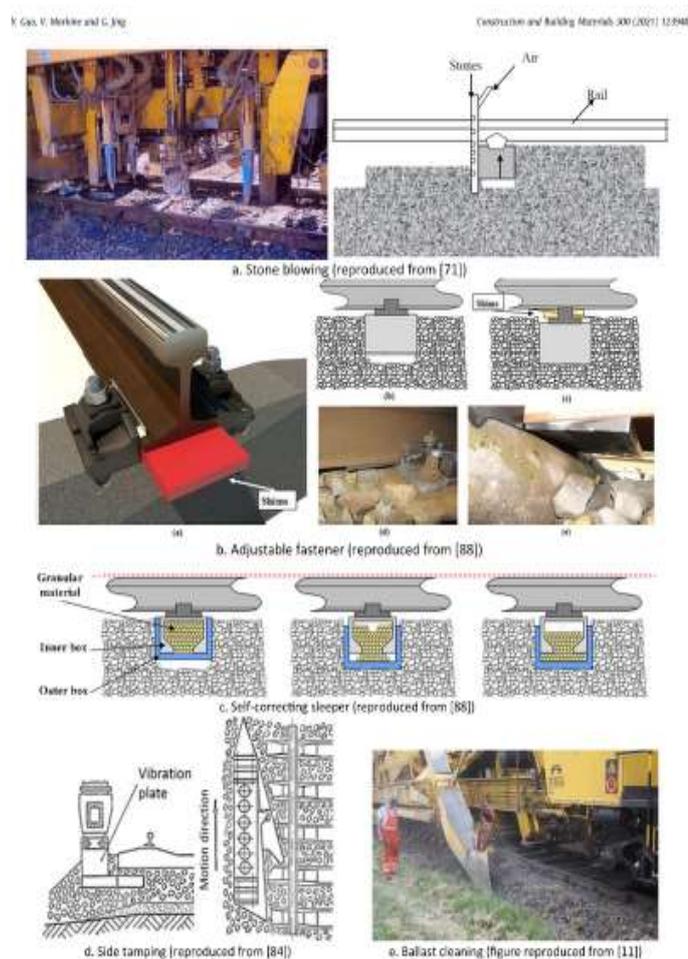


Рисунок 1.10 - Примеры бесподбивочных методов выправки пути

## 1.8 Другие бесподбивочные способы выправки

На рисунке 1.11б показана регулируемое скрепление, которое используется для подъема рельса на равномерную продольную высоту пути [70]. Построена модель переходной зоны методом конечных элементов с использованием регулируемого скрепления вместе с экспериментальными испытаниями (испытание на неограниченное давление), которые доказывают, что регулируемые скрепления могут уменьшить изменение геометрии пути в переходных зонах [63].

Недостатком регулируемых скреплений является то, что оно теряет свои полезные свойства при слишком большой осадке. Другими словами, прокладки имеют недостаточную толщину, чтобы обеспечить больший подъем рельса.

На рисунке 1.11в показана самокорректирующаяся шпала, которая используется для подъема шпалы при возникновении дифференциальной осадки. Впервые она была предложена в [63] для автоматического заполнения зазоров подвесной шпалы. Состояние геометрии пути при испытании на циклическую нагрузку показывает, что при использовании самокорректирующейся шпалы не было обнаружено висящих шпал. Недостатком этого метода является то, что при слишком большой осадке самокорректирующаяся шпала не может обеспечить достаточную опору для рельса. Самокорректирующаяся шпала по принципу действия аналогична пневматическому суфляжу. Поэтому достоинства и недостатки аналогичны пневматическому суфляжу.

На рисунке 1.11г показана боковая подбивка, при которой применяется другая машина для технического обслуживания (машина с боковой подбивкой) или ВПО – 3000 [4]. Эти машины используются на территории бывшего Советского Союза. Частицы балласта перемещаются к днищу поднятых шпал пластиной клиновидной формы (с вибрацией), и машина непрерывно движется по рельсам, не останавливаясь. Частицы балласта, которые перемещаются к днищу шпалы, однородны и уплотнены из-за горизонтальной вибрации и сложной формы клиньев [64]. Этот метод уплотнения имеет следующие преимущества:

- высокая производительность - максимальная производительность составляет 3000 м /час, что выше, чем при техобслуживании с использованием подбивочных бойков;
- низкое разрушение балласта - виброплиты не проникают в балластный слой, что снижает его излом;
- высокая подъемка пути - путь можно приподнять на 10 см, что позволяет уплотнять различные слои, прижимная лапка короткая и может достигать до 10 см под шпалой;
- подходит для многих типов шпал - этот метод может использоваться для многих новых шпал, таких как шпалы с шипами, шпалы в форме крыла и шпалы-со ступенями.

Имеет следующие недостатки:

- этот метод не подходит для уплотнения стрелочных переводов;
- после использования бокового уплотнения необходима динамическая стабилизация пути;
- этот метод не подходит для исправления геометрии пути.

На рисунке 1.11е показана щебнеочистительная машина для очистки балласта, которая используется для отсеивания балластных загрязнителей и засорителей и засыпки новых частиц балласта. Применяется, когда выправка не дает эффекта или происходит слишком быстрое разрушение балластного слоя после уплотнения. Очистка балластного слоя снижает боковое сопротивление примерно на 50% [58].

Тенденция к созданию высокопроизводительных машин для интенсификации выполнения работ, в том числе работ текущего содержания железнодорожного пути привела к тому, что непосредственно машин для текущего содержания пути практически не осталось. Появились механизированные комплексы для работ текущего содержания пути, которые были приданы отдельным подразделениям. Техника для этих подразделений была изъята из линейных подразделений путевой инфраструктуры. В результате, линейные подразделения лишились возможности выполнять механизированную выправку

на точечных участках. Эта тенденция проявилась не только в машинах для текущего содержания, ремонт путевого инструмента также пока выполняется централизованно. В результате оптимизации расходов и введения тендерных процедур на ремонт путевого инструмента, получается следующая картина: по мере поломки инструмент копится на местах хранения до того, как не скапливалась достаточно большая, «товарная» партия неисправного инструмента. После этого инструмент централизованно отвозится на ремонтное предприятие, которое, увы, часто не отвечает за качество сделанного ремонта. В итоге отремонтированный инструмент работает короткое время и вновь ломается. После этого он отправляется на место хранения и дожидается следующей отправки на ремонт. Ситуация доведена до того, что даже «вытянуть» или заострить острие лома стало невозможно – во многих линейных подразделениях отсутствуют мастерские и кузнечные цеха.

Все вышперечисленное приводит к тому, что часто на линейных подразделениях путевой инфраструктуры возникает дефицит не только людских ресурсов, но и элементарно исправного инструмента.

Наибольшие проблемы возникают с выполнением работ текущего содержания на «тяжелых» ходах там, где интервал времени для выполнения работ текущего содержания составляет всего 10-15 минут, а при «скречивании поездов» до 7-10 минут. Учитывая то, что постановка домкратов составляет 2-3 минуты остается не более 3 минут на работу, учитывая то, что 1 минута требуется на снятие домкратов и уборка инструмента в габарит.

Отсюда вытекает необходимость создания новой технологии для устранения неровностей в профиле при текущем содержании железнодорожного пути и наиболее перспективной технологией с этой точки зрения выглядит пневматический суфляж.

Дело в том, что при пневматическом суфляже возможно разделение выправочных работ на подготовительные основные и заключительные, причем наиболее трудоемкими являются именно подготовительные работы, а именно:

- частичная отрывка шпальных ящиков;

- подтягивание креплений;
- подготовка мест для установки домкратов;
- возможная перегонка шпал при их угоне, и т.д.

Все эти работы могут быть выполнены «под поездами» в короткие интервалы. Основные же работы занимают 3-4 минута на 2 шпалы. Кроме того, работы могут быть прерваны и возобновлены после пропуска поезда без ущерба в качестве.

Заключительные виды работ достаточно легки и не требуют много времени. Выполняются «под поездами».

Преимущества пневматического суфляжа в текущем содержании пути кроме возможности выправки железнодорожного пути на «тяжелых» ходах состоит в том, что появляется возможность выправки просядок и перекосов за счет использования мелкой фракции (5-10 мм), которая позволяет выправлять небольшие отступления геометрии рельсовой колеи (II степень и II степень, близкая к III). Это является немаловажным по двум основным аспектам:

- во-первых, можно предотвратить развитие просядок, переход просядок II степени в III и IV степени;
- во-вторых, более ровный путь, с более сглаженной ГРК создает меньшее сопротивление для движения подвижного состава, что позволяет экономить затраты энергии на тягу.

И, одним из существеннейших преимуществ пневматического суфляжа является то, что согласно Инструкции по обеспечению безопасности движения поездов при производстве путевых работ [4] допускается на железобетонных и деревянных шпалах оставлять шпальные ящики незаполненными балластом внутри колеи при условии, что на бесстыковом пути, ширина плеча балластной призмы обеспечивается не менее 25 см, а на звеньевом - не менее 10 см, то есть, при частичном раскопе шпальных ящиков для выполнения выправки пневматическим суфляжем и последующего проведения операции выправки, снижения скорости не требуется [31].

## Выводы к главе 1

1. Основным направлением в текущем содержании пути должно быть устранение отступлений геометрии рельсовой колеи в начальной стадии их развития и осуществляться щадящими методами, не нарушающими сложившуюся постель шпалы.

2. Из рассмотренных способов устранения профильных неровностей для современных условий наиболее перспективными являются укладка прокладок и суфляж. Быстрое и повсеместное распространение способа подсыпки в первой половине XX века было обусловлено рядом ценных преимуществ, которые он имеет по сравнению с подбивкой:

1) Не нарушается уплотнённая балластная постель под опорой.

2) Устраняется неизбежное при подбивке измельчение балласта.

3) Увеличивается производительность труда в 2 — 3 раза.

4) Обеспечивается введение наиболее чистого балласта.

5) Облегчается труд обслуживающего персонала.

6) Обеспечивается сохранность шпалы при производстве работ

7) Не требуется снижения скорости движения поездов по выправляемому участку при подготовке и после выполнения выправки пути пневматическим суфляжем.

8) Не разрыхляется балласт в шпальных ящиках и, тем самым, не уменьшает сопротивляемость пути угону.

9) Загрязнённый верхний слой балласта не перемешивается с более чистым, нижним слоем.

10) Даёт высокую точность работы и тем самым обеспечивается лучшее содержание пути по уровню.

Исторический анализ способов выправки пути показал целесообразность возобновления исследований по выбору оптимальных способов устранения неисправностей, рассмотрению которых посвящена данная работа и определил структуру и последовательность исследования способа выправки пневматический суфляж, как возможного способа, входящего в комплекс

мер по снижению деформативности пути в процессе его эксплуатации . Данная работа направлена на изучение параметров выправки для дальнейшего развития этого способа, в том числе для разработки механизированного текущего содержания пути.

## ГЛАВА 2 СТЕНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСАДКИ РЕЛЬСОШПАЛЬНОЙ РЕШЕТКИ, ВЫПРАВЛЕННОЙ СПОСОБОМ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СУФЛЯЖА

При проведении экспериментов, предназначенных для изучения механической прочности или деформируемости конструкций, в основу исследования может быть положен «критерий механического подобия», который выражает геометрическое и силовое подобие изучаемых систем. На этом критерии построены различные методы моделирования конструкций. В большинстве случаев размеры опытной модели назначают только из условия геометрического подобия, а вместо силового подобия ставится условие равенства напряженных состояний модели и реальной конструкции [21].

Рассмотренные положения отражаются в основных теоремах теории подобия.

### 2.1 Принципы физического моделирования

Физическое моделирование (ФМ) - это моделирование, с заменой изучения какого-либо объекта или процесса экспериментально - лабораторным исследованием его модели, обладающей той же физической природой.

Под ним подразумевают методику исследования на моделях, имеющих аналогичную с объектом физическую природу и обладающими всем комплексом свойств изучаемых явлений.

ФМ зиждется на физическом сходстве, которое подразумевает геометрическое сходстве, подобие скоростей, сил, сред. Научной базой физического моделирования является теория подобия. В механике основными величинами считают обычно длину  $l$ , время  $t$  и массу  $m$ . Тогда, скорость  $v = l/t$ , коэффициент подобия скоростей  $k_v = v_n/v_m$  (индекс «н» у величин для объекта, «м» — для модели), можно выразить через коэффициенты подобия длин  $k_l = l_n/l_m$  и времён  $k_t = t_n/t_m$  в виде  $k_v = k_l/k_t$ . Аналогично, т. к. на основании второго закона

Ньютона сила  $F$  связана с ускорением  $w$  соотношением  $F = mw$ , то  $k_F = k_m * k_w$  (где, в свою очередь,  $k_w = k_v / k_t$ ).

Преимущества Физического моделирования:

- полное воспроизводство процесса;
- наглядность процесса;
- возможность регистрации наблюдений без преобразующих устройств;
- изучение явлений, не поддающихся математическому описанию.

Недостатки физического моделирования:

- для исследования каждого нового процесса необходимо создавать новую модель;
- изменение параметров оригинала часто требует физической переделки или полной замены модели;
- высокая стоимость изготовления моделей сложных объектов;
- в ряде случаев имеются ограничения или оно вообще не применимо.

При моделировании  $1g$  можно избавиться от коэффициентов подобия по длинам  $L$  и времени  $t$ , что позволяет считать полученные результаты наиболее приближенным к натурным [21].

Именно по этим причинам, исследование начиналось с стендовых испытаний. Изначально, необходимо было получить ответ на вопрос – насколько реальна промышленная выправка пути пневматическим суфляжем и является ли она эффективной на железных дорогах. Для ответа на этот вопрос необходимо было произвести ряд лабораторных исследований. На рисунке 2.1 показана блок-схема последовательности проведенных экспериментальных исследований с анализом результатов и определением параметров осадки пути после выправки пневматическим суфляжем.

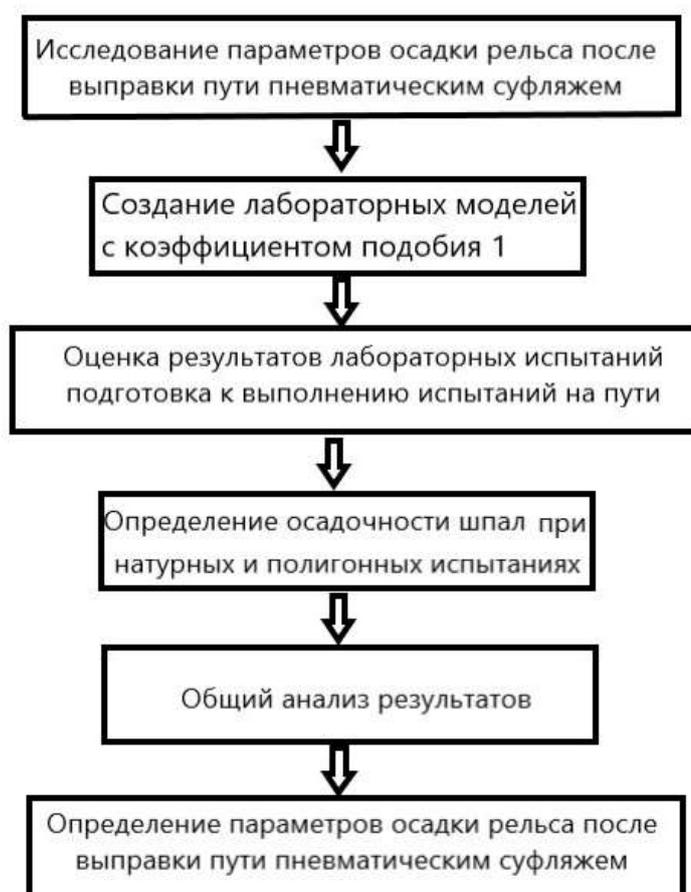


Рисунок 2.1 - Блок-схема последовательности проведенных стендовых и натуральных испытаний

## 2. 2. Программа стендовых испытаний осадки РШР в профиле

Цель исследования – определение изменения осадки РШР, выправленной способом пневматического суфляжа в зависимости от количества циклов нагружения.

Объект исследования – модель конструкции ВСП, в частности балластный слой, шпалы и промежуточного выправочного слоя щебня из фракции щебня 5 -10 мм ГОСТ 8267-93 и фракции 25-60 мм ГОСТ 7392-2014 [1] Место проведения исследований – лаборатория кафедры «Путь и путевое хозяйство» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ).

Стендовые испытания проводились в следующей последовательности:

- создание стендовой модели;
- проведение серии стендовых испытаний;
- разборка модели;
- создание и испытание следующей стендовой модели
- обработка данных и анализ результатов.

По результатам исследований были составлены функциональные зависимости изменения остаточной осадки балластного слоя от количества циклов нагружения.

### **2.3 Методика стендовых испытаний осадки модели шпалы в зависимости от количества циклов нагружения**

Порядок подготовки балластного основания

В металлический ящик размером в плане 300×600 мм и высотой 400 мм засыпали навеску 100 кг загрязненного щебеночного балласта специально подобранного зернового состава. Состав выбран из расчета минимальной предполагаемой осадочности после 1000 циклов нагружения [Отчет о научно – исследовательской работе 6.3.00 «Организация высокоскоростного движения на участке Москва – Санкт-Петербург», МИИТ, Москва - 2005 г. [30] (таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Зерновой состав балласта в испытательном ящике

Размер частиц, мм	60-70	40-60	25-40	10-25	2-10	0,1-2	Менее 0,1
Масса, кг	3,0	33,0	24,0	30,0	5,7	3,0	1,3
Доля в %	3	33	24	30	5,7	3	1,3

Далее, устанавливали ящик на рабочий стол испытательной машины и подвергали однократному обжатию через жесткий штамп размером 290×590 мм по всей горизонтальной поверхности, исходя из давления под штампом 319 кПа/см<sup>2</sup>. Нагрузку выдерживали в течение 5 мин, после чего производили разгрузку и замер осадки штампа. Повторные нагружения производили до достижения остаточной осадки менее 0,5 мм.

Порядок подготовки и проведения испытаний осадки шпалы после выправки

После создания щебеночной модели балластного основания, нижнюю поверхность шпалы моделировали жёстким штампом и, прикладывая нагрузку через штамп, моделировали воздействие шпалы на балласт.

Приложение нагрузки к щебеночной модели осуществлялось через прямоугольный штамп длиной 24 см, шириной (размер вдоль пути) 25 см. Схема модели приведена на рисунке 2.2. Размеры модели позволяли производить испытания на динамическом прессе.

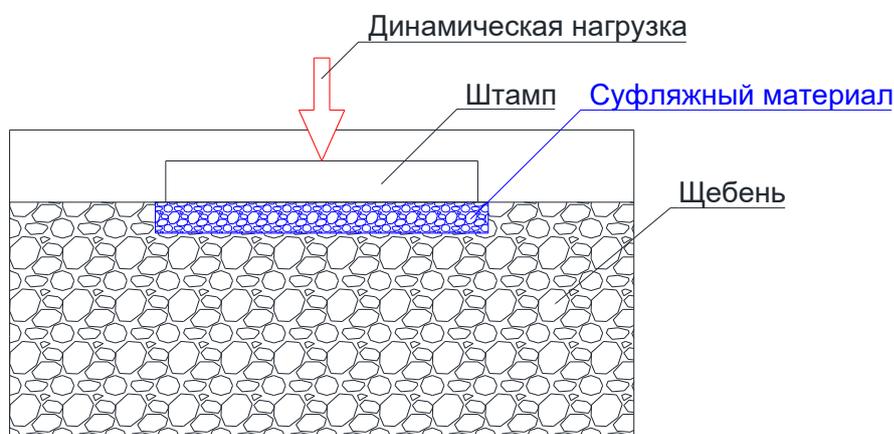


Рисунок 2.2 - Схема модели балластной призмы для испытаний

Величину максимальной нагрузки назначали, таким образом, чтобы обеспечить под штампом напряжения  $\sigma_6=319$  кПа/см<sup>2</sup> (напряжения в балласте от вагонной нагрузки при нагрузке 25 тонн/ось). Величина напряжений при разгрузке составляла 10 % от максимальных напряжений. Частоту приложения нагрузки принимали в диапазоне от 6 до 12 Гц, а продолжительность испытаний 1,0 млн.

циклов нагружений, что соответствует обычно периоду максимальной реализации осадки штампа в балласте [30] для аналогичных испытаний. При этом, предполагалось что одно приложение максимальной нагрузки в реальных условиях соответствует прохождению одной тележки вагона, принимают, что 1,0 млн. нагружений соответствует в натуре пропуску примерно 50 млн. т брутто грузов.

В ходе испытаний измеряли как величину нарастающей во времени остаточной осадки под штампом и строили ее график, так и мгновенную упругую осадку в разные периоды времени.

#### **2.4 Порядок проведения испытаний осадки штампа, имитирующего шпалу, после выправки пневматическим суфляжем**

На поверхность уплотнённого загрязненного щебня укладывали жесткий штамп размером 240×250 мм, и вывешивали его специальным приспособлением (рисунок 2.3) на необходимую высоту от предварительно обжатой поверхности балластного основания. Вокруг штампа, с трёх сторон, засыпали путевой щебень примерно до уровня верхней плоскости штампа, при этом одну стенку штампа длиной 240 мм оставляли свободной для пневматического суфляжа мелким щебнем фракции 5- 10 мм. (рисунок 2.4).



Рисунок 2.3 - Приспособление для вывешивания штампа над поверхностью уплотненного щебеночного балласта



Рисунок 2.4 - Свободная стенка для пневматического суфляжа мелким щебнем

В зазор между нижней плоскостью штампа и уплотнённой поверхностью щебня выполнили ПС щебня, фракции 5 – 10 мм после чего сняли специальное приспособление.

Далее, оставшуюся стенку штампа заложили окрашенным путевым щебнем (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 - Подготовка модели после пневматического суфляжа мелким щебнем.

Для того, чтобы отделить щебень основания от щебня для пневматического суфляжа и щебня путевой фракции вокруг штампа щебень для суфляжа и щебень вокруг штампа был окрашен.

К штампу прикладывали нагрузку таким образом, чтобы обеспечить под штампом напряжение  $\sigma_6 = 319$  кПа. Нагрузку выдерживали в течение 5 мин, после чего производили разгрузку и замер осадки штампа. Повторные нагружения производили до достижения остаточной осадки менее 0,1 мм.

Испытательную машину включали в режиме переменного нагружения с частотой 12 герц (моделировались колебания при скорости подвижного состава 70 км/час) и изменением нагрузки от 1950 кг (напряжение 319 кПа) до 195 кг (напряжения 31,9 кПа). Общее количество нагружений составило 1,0 млн. циклов (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 - Испытания образца модели шпалы, выправленной пневматическим суфляжем на испытательной машине

По окончании испытаний модели снимали штамп, убирали окрашенный щебень и переходили к созданию следующей модели.

Испытания производились на четырёх моделях:

- 1 модель – испытывали модель шпалы и балластной призмы без укрепления, продолжительностью испытаний 1,0 млн. циклов нагружений (1 цикл);
2. модель - испытывали модель шпалы и балластной призмы без укрепления, продолжительностью испытаний 1,0 млн. циклов нагружений, после чего штамп вывешивают его специальным приспособлением на высоту 30 мм

производилась выправка подсыпкой мелкого щебня, далее проводились испытания продолжительностью 1 миллион циклов (3 модели);

Для испытаний была создана физическая модель балластной призмы из загрязненного щебня подобранного зернового состава который, согласно испытаниям, ранее выполненных МИИТ в 2005 году [30] обеспечивал быструю реализацию уплотнения и минимальную осадочность модели загрязненного балластного слоя после уплотнения.

Было выполнено две серии испытаний:

1 серия – Модель шпалы и балластной призмы без укрепления, продолжительностью испытаний 1,0 млн циклов нагружений;

2 серия – Аналогично 1 серии, после чего штамп вывесили на высоту 30 мм, произвели инъекцию мелкого щебня и испытания продолжили ещё 1,0 млн. циклов. По данному алгоритму выполнили испытания 5 моделей (две с деревянным штампом, три со стальным, имитирующим нижнюю поверхность жесткой железобетонной шпалы штампом), щебеночное основание оставалось одним и тем же для всех 5 моделей;

Для моделирования поведения балластного подшпального основания на пути с железобетонными шпалами после нескольких выправок пневматическим суфляжем одна поверх другой в моделях со стальным штампом. Под штамп проводилось несколько инъекций одна поверх другой. Результаты проведенных испытаний приведены на рисунках 2.7 и 2.8.

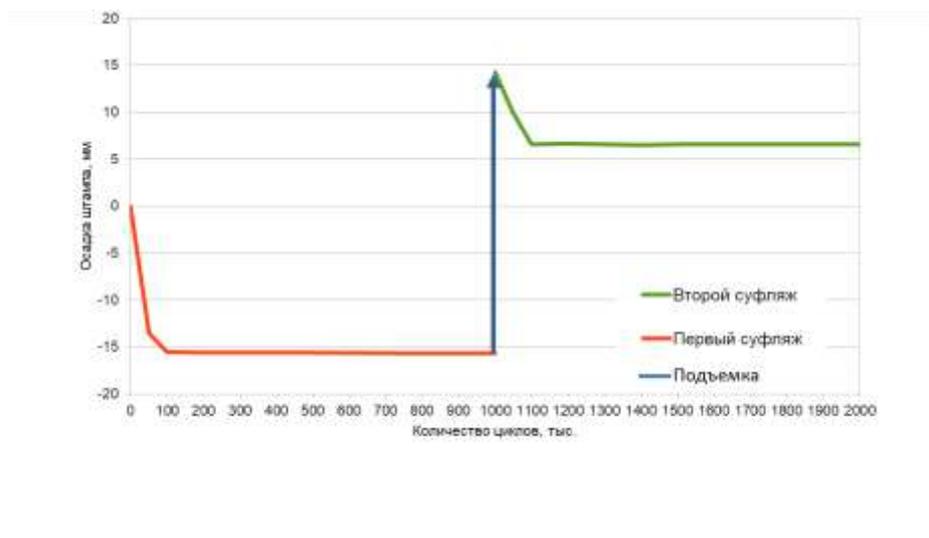


Рисунок 2.7 - Осадка суфляжного щебня под стальным штампом

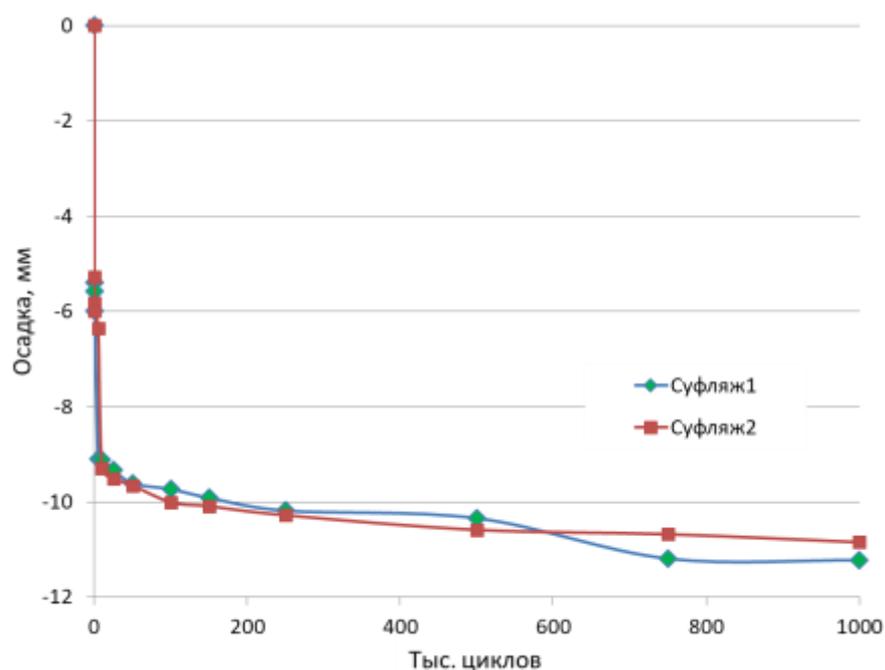


Рисунок 2.8 - Осадка суфляжного щебня под деревянным штампом

Максимальная осадка под деревянным штампом составила 11 мм, под стальным штампом (выправка в один слой) составила 17 мм, при выправке поверх первого слоя в обоих случаях 7-8 мм.

Проведенные стендовые испытания позволили сделать несколько выводов:

- технология пневматического суфляжа представляется рабочей и необходимо продолжить её испытания на испытательном полигоне и на действующем участке пути;

- способ выправки более успешно работает под деревянным штампом, чем под жестким стальным, что, скорее связано с особыми свойствами дерева как упругого материала.

По результатам стендовых испытаний была разработана методика испытаний пневматического суфляжа на действующем пути.

## **2.5 Оценка миграции суфляжного камня в щебеночный балласт**

При совместной работе суфляжного и балластного щебня существует опасность миграции мелких частиц суфляжного щебня в балластные пустоты и блокирование пустот в балластной призме. Это явление приводит к снижению пористости балласта и увеличению, вследствие этого, жесткости балластной призмы что, в свою очередь ведет к повышению скорости истирания и излома балластных гранул. Кроме того, заполнение балластных пор более мелкими частицами при интенсивной работе балласта может привести к быстрой потере частью балластного слоя дренирующих свойств и спровоцировать появление сначала сухого, а затем и мокрого выплеска.

Вопросами миграции мелких частиц несвязного сыпучего материала в пустоты более крупного несвязного сыпучего материала в нашей стране занимались при проектировании обратных фильтров гидротехнических сооружений, в частности при проектировании многослойных обратных фильтров грунтовых плотин.

Подбор слоев обратного фильтра решался из условия непрохождения частиц защищаемого грунта через поры прилегающего слоя фильтра, а те, в свою очередь, не должны были проникать через поры следующего слоя и т.д.

Существует несколько способов подбора слоев многослойного обратного фильтра, отличающиеся методическим подходом к оценке непроходимости мелких

частиц материала через крупные поры. Наиболее простым и доступным способом является методика, разработанная В.С. Истоминой [28].

### 2.5.1 Расчет суффозионности материалов по методике В.С. Истоминой

Для мелкого и крупного сыпучего материалов по кривой гранулометрического состава вычисляют параметры, необходимые для построения соответствующей точки на графике допустимости использования материалов в качестве соседних слоев обратного фильтра.

Если координаты этих параметров располагаются в области допустимых характеристик, рассматриваемый грунт считается пригодным для использования в фильтре. Если же координаты параметров попадут в область недопустимых характеристик, рассматриваемый грунт для фильтра применять нельзя.

Для подбора слоев обратного фильтра в дренажах по методу В.С. Истоминой исходными данными служат кривые гранулометрического состава защищаемого грунта и отдельных слоев фильтра. Параметры этих кривых:

$$\eta = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.1)$$

коэффициент неоднородности, представляющий собой отношение где  $D_{60}$ ,  $D_{10}$  – диаметры, определяющие границу, ниже которой находится 60 % частиц и 10 % частиц соответственно рассматриваемого слоя фильтра или защищаемого грунта;

$$\xi = \frac{D_{50}}{d_{50}} \quad (2.2)$$

межслойный коэффициент, представляющий отношение среднего диаметра частиц первого слоя фильтра к диаметру частиц защищаемого грунта или отношение среднего диаметра частиц грунта второго слоя к диаметру частиц первого слоя?

где  $D_{50}$ ,  $D_{10}$  – диаметры, определяющие границу, ниже которой находится 50 % частиц и 10 % частиц соответственно,  $d_{50}$  диаметр частиц мелкого грунта, определяющий границу, ниже которой находится 50 % частиц.

Для оценки возможности миграции мелких частиц в поры более крупного сыпучего материала были выстроены кривые гранулометрического состава для путевого щебня фракции 25-60 мм и щебня, используемого в технологии пневматического суфляжа фракции 5-10 мм (рисунок 2.9).

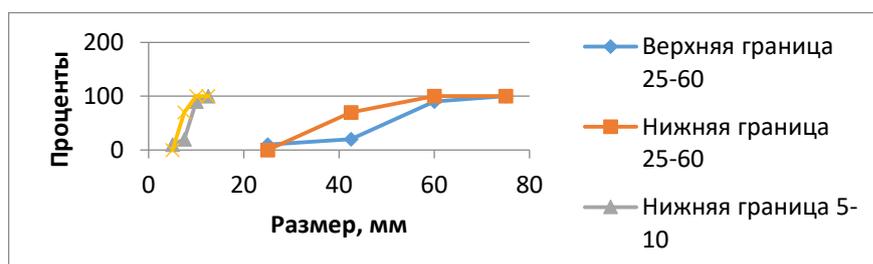


Рисунок 2.9 - Гранулометрические составы щебня фракции 25-60 мм и фракции 5-10 мм

После получения расчетных значений была сделана оценка суффозии согласно методу В.С. Истоминой (рисунок 2.10).

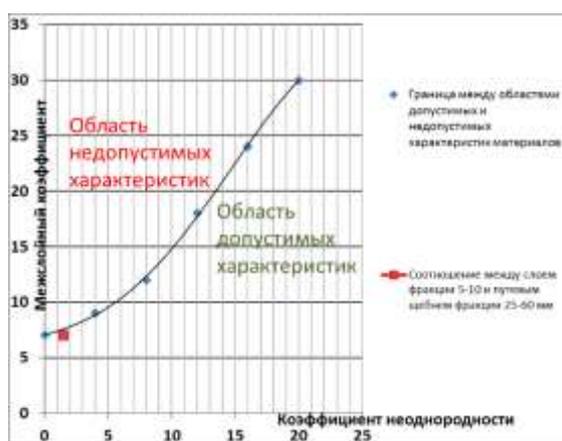


Рисунок 2.10 - Соотношение между слоями щебня фракции 5-10 мм и путевого щебнем фракции 25-60 мм по методу В.С. Истоминой

Вывод: использование данной пары материалов в качестве соседних слоев обратного фильтра допустимо.

### 2.5.2 Расчет суффозионности материалов по методике ВНИИГ

Для оценки суффозионности грунтов по заданным параметрам грунта

1. Определяем максимальный размер пор; в которые могут пройти частицы грунта (формула М.П. Павчича) [59]

$$d_0^{max} = 0.455 \cdot X \sqrt[n]{\eta} \frac{n}{1-n} d_{17}, \text{ мм} \quad (2.3)$$

где  $\eta$  — пористость грунта;

$d_{17}$  мм - диаметр частиц гранта, которых содержится в грунте 17 %;

$X$  — коэффициент неравномерности раскладки грунтов в сооружении определяется по формуле:

$$X = 1 + 0,5 \eta \quad (2.4)$$

2. Определяем максимальный размер частиц, которые могут пройти поры диаметром  $d_0^{max}$ :

$$d_{cl}^{max} = 0,77 d_0^{max} [\text{мм}]$$

3. Определяем наличие данных частиц  $d$  в грунте (по кривой гранулометрического состава):

если  $d_{cl}^{max} < 3-5\%$ . то механической суффозии не будет или она будет не опасна для сооружения.

если  $d_{cl}^{max} > 5\%$ , то будет механическая суффозия.

По кривым гранулометрического состава:  $d_0^{max} = 7,22$

$$d_{cl}^{max} = 5,56$$

Вывод: использование данной пары материалов в качестве соседних слоев обратного фильтра допустимо.

### 2.5.3 Расчет контактного выпора несвязных материалов по методике ВОДГЕО

По методике ВОДГЕО [2] контактного выпора несвязного грунта не случится, если одновременно выполняются два условия:

у мелкого грунта  $\eta \geq 10$  и

$$d_{50} \geq a_n * D_{10} \quad (2.5)$$

где  $a_n$ -коэффициент перехода от размера частиц к соответствующим порам ( $a_n=0,155$ )

Получаем:

$$7,5 \geq 0,155 * 28;$$

$$7,5 \geq 4,34$$

Вывод: использование данной пары материалов в качестве соседних слоев обратного фильтра допустимо.

### 2.5.4 Геометрический метод Седергрена

В 1989 году Harry R. Cedergren в разделе: «On the degradability of granular material» (О разрушаемости гранулированных материалов) [54] постулировал что, если три идеальные сферы имели диаметр более чем в 6,5 раз больше диаметра меньшей сферы, тогда меньшая сфера сможет пройти через них (рисунок 2.11). Хотя это очень обобщенное утверждение, оно подразумевает, что для 65-мм балласта максимальный размер частиц проходить через него будет менее 10 мм в диаметре.



Рисунок 2.11 - Прохождение меньшей сфера через три сферы большего диаметра

Условие не выполняется

Ввиду противоречивости полученных результатов и сомнения в применимости расчетных методик, созданных для расчетов обратных фильтров из сыпучих материалов, потребовалась опытная проверка возможности миграции суфляжного камня фракции 5-10 мм в щебеночный балласт на полигоне Экспериментального кольца ВНИИЖТ.

## **2.6 Стендовые испытания проверки миграции суфляжного щебня различных фракций в путевой балласт**

Оценка возможности миграции мелкого щебня в балластную призму проводилась по трем методикам проектирования многослойных обратных фильтров грунтовых плотин, принятых в России - методике В.С. Истоминой [58], по методике ВНИИГ [37] и был произведен расчет контактного выпора несвязных материалов по методике ВОДГЕО [2] по всем трем методикам допускалось применение щебня размером фракции 5-10 мм для укладки его поверх щебня балластной призмы фракции 25-60 мм. Однако, согласно геометрическому методу оценки, предложенному Седергреном, [54] минимальный размер частиц пневмосуфляжного материала должен составлять 7,7 мм.

Разночтение в методиках оценки миграции мелкого щебня в балластную призму привело к необходимости выполнить дополнительное исследование и окончательно выяснить какой же фракционный состав суфляжного щебня является наиболее оптимальным для суфляжа на щебеночном балласте фракции 25-60 мм (30-60).

В марте 2020 года В РУТ МИИТ была выполнена серия лабораторных экспериментов для проверки миграции суфляжного щебня различных фракций в путевой балласт. Были две причины для лабораторного исследования миграции щебня мелких фракций в путевой балласт:

- неудовлетворительная осадка щебня фракции 5-10 мм в путевой балласт вследствие миграции основной массы частиц в путевой щебень;

- наличие прямого указания в «Инструкции по выправке толчков, перекосов и просадок способом подсыпки (суфляж») на использование фракции 10-25 для первой выправки суфляжем [15].

Ввиду того, что стандартные размеры фракций с 1939 года прошлого века изменились в лабораторных испытаниях, использовался щебень фракционных составов 5-10 мм и 10-20 мм.

Испытания были выполнены на универсальной испытательной машине EUS-40, производства фирмы Werkstoffpruefmachinen, Лейпциг (рисунок 2.12).

Динамические характеристики универсальной машины:

- частота приложения нагрузки 5 – 25 Гц
- максимальное усилие 89,55 кН;
- минимальное усилие 19,85 Кн.



Рисунок 2.12 - Испытательная машина EUS-40

Было испытано две модели по три образца каждой:

- 1 модель имитация суфляжа фракцией 10-20 мм поверх балластной призмы;
- 2 модель имитация суфляжа фракцией 5-10 мм поверх суфляжа фракцией 10-20 мм.

Модели выполнялись следующим образом в ящике размером 300мм\*600мм, высотой 350 мм засыпался путевой щебень следующего фракционного состава навеской в 100 кг (таблица 2.2)

Таблица 2.2 - Зерновой состав балласта в испытательном ящике

Размер частиц, мм	60-70	40-60	25-40	10-25
Масса, кг	2,0	53,0	40,0	5,0
Доля в %	2	53	40	5

Для уплотнения балласта путевой фракции устанавливался штамп из многослойной клеевой фанеры размером 290мм\*590мм. Щебень в лабораторном ящике уплотнялся динамической нагрузкой 100 тысяч циклов из расчета 31,85 Ньютона на см<sup>2</sup> или 5400 кН. Затем, после уплотнения путевого щебня, под меньший штамп размером 310 мм\*210 мм, выполненный из толстого стального листа (имитация опорной поверхности железобетонной шпалы) насыпался слой 25 мм из щебня фракции 10-20 мм. К нему также прикладывалась динамическая нагрузка в 1 миллион циклов (рисунок 2.13).

Величина динамической нагрузки составила 20734 Н при максимальном нагружении и 2073 Н при разгрузке. Всего к каждой модели прикладывалось 1 миллион циклов нагружения. После испытаний моделей с суфляжем 10-20 мм, те же самые модели, не разбирая, подвергались суфляжу фракцией 5-10 мм и также была приложен 1 миллион циклов нагружения тем же штампом 310\*210 мм (рисунок 2.15).

Более наглядно этапы моделирования приведены на рисунках 2.13 – 2.15



Рисунок 2.13 - Отсыпка слоя фракции 10-20 мм поверх щебня путевой фракции



Рисунок 2.14 - Отсыпка слоя фракции 5-10 мм поверх щебня фракции 10-20 мм.

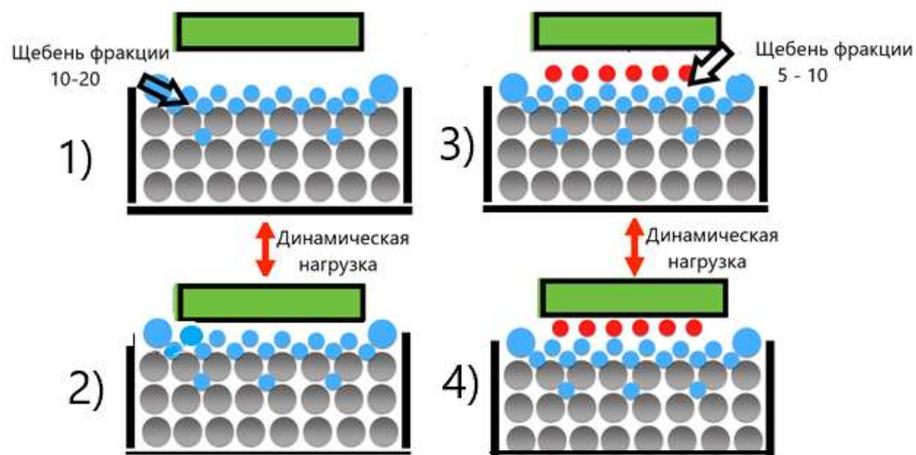


Рисунок 2.15 - Создание испытательных моделей (4 этапа моделирования).

В результате испытания 3 моделей получены усредненные графики осадки слоев фракции 10-20 мм и 5-10 мм под динамическим нагружением (рисунок 2.16).

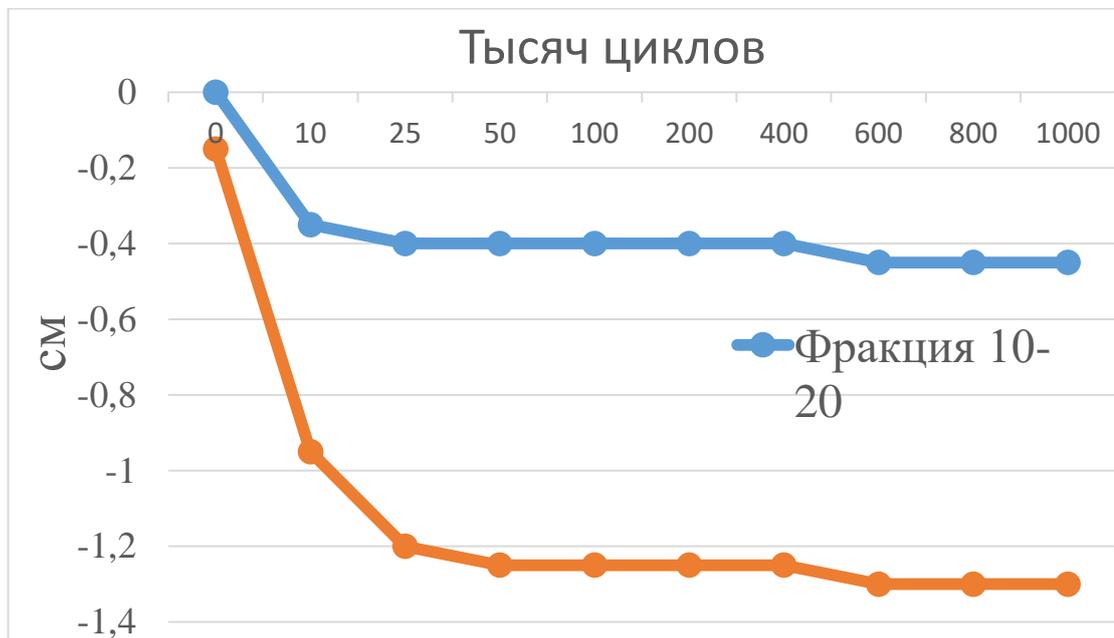


Рисунок 2.16 - Осадка слоев щебня фракции 10-20 мм и фракции 5-10 мм под динамической нагрузкой

Общая осадка слоев щебня составила у щебня фракции 10-20 мм 4,5 мм при толщине слоя 25 мм и щебня фракции 5-10 мм 10-20 мм при толщине слоя 25 мм.

После окончания динамических испытаний модель частично разбиралась для визуальной оценки взаимопроникновения частиц щебня различных фракций друг в друга (рисунок 2.17).



Рисунок 2.17 - Взаимная миграция щебня путевой фракции, щебня фракции 10-20 мм и щебня фракции 5-10 мм на частично разобранной модели

### **Выводы к главе 2**

Суфляж для выправки следует производить с учетом быстрой осадки:

- фракция 5-10 мм 10 – 15 мм;
- фракция 10-20 мм 4 – 5 мм.

Промежуточная фракция 10-20 мм, обеспечивает препятствие для миграции щебня фракции 5-10 мм в путевой балласт.

Щебень фракции 10-20 мм целесообразно применять при первой выправке при величине просадки 20 мм и более.

Для выправки просадки 10-15 мм целесообразно использовать щебень фракции 5-10 мм.

При выправке просадок в стыках целесообразно использовать фракцию 10-20 мм, а в дальнейшем фракцию 5-10 мм.

В целом способ выправки пневматическим суфляжем подтвердил свои положительные качества как низкую осадку после в сравнении с выправкой подбивкой и уплотнением.

Подтвердилась возможность использовать его для балластного слоя с сильным загрязнением, чтобы избежать остановки движения по участку и очистки балласта.

### **ГЛАВА 3. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА УЧАСТКЕ ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБА ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СУФЛЯЖА НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ ПУТИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИИ СПОСОБА ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СУФЛЯЖА НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ КОЛЬЦЕ ВНИИЖТ**

#### **3.1. Эксплуатационные наблюдения на участке применения способа пневматического суфляжа на действующем пути**

В конце июля – конце октября 2017 года были проведены испытания технологии выправки пути методом пневматического суфляжа на 3 участке Жилевской дистанции 1-го пути, перегона Яганово – Непецино. Грузонапряженность участка - 113 миллионов тонн брутто на километр, пропущенный тоннаж - более 500 млн. тонн, установленная скорость грузовых поездов - 80 км/ч. Капитальный ремонт производился в 2014 году.

В качестве первого опытного объекта был выбран невырезанный мокрый выплеск 32 км, ПКб в изолирующем стыке в зоне автомобильного переезда. В стыке имел место потайной толчок на 4 шпалах с просадками 10-15мм. По обе стороны от стыка были расположены отрясенные шпалы, по две с каждой стороны. Раскоп показал, что постель шпал прочная. Между шпалами наблюдались высохшие следы выплеска пульпы грязно - белого цвета, которые покрывали пространство в 8 шпал: три с отдающей стороны стыка и пять с принимающей.

На полевой нити на отрясенных шпалах эксплуатировались по две деформированные резиновые прокладки под каждой шпалой. (рисунки 3.1, 3.2).



Рисунок 3.1 - Выплеск 32 км ПК6



Рисунок 3.2 - Деформированные подрельсовые прокладки

Для отработки технологии, выправки пневматическим суфляжем было использовано испытательное оборудование, разработанное автором на кафедре «Путь и путевое хозяйство» МИИТ

Список оборудования приведен в таблице 3.1

Таблица 3.1 - Перечень оборудования для проведения испытаний.

Название оборудования	Количество
Компрессор «Авас», производительность 490 л/сек	1 шт
Электростанция «Elitech», мощность 6 квт	1 шт
Частотный преобразователь серии ED 3100	1 шт
Насадка со шлангом	1 шт
Нивелир Sokkias 410 3 класса точности	1 шт
Рейка геодезическая	1 шт
Штатив	1 шт

24.07.2017 г. была произведена выправка объекта пневматическим суфляжем с заменой подрельсовых прокладок.

Выправка производилась в следующем порядке:

предварительно были раскопаны части шпальных ящиков (по ширине ящика, 37,5 см по длине) внутри колеи в шахматном порядке (через ящик) по обеим нитям на глубину до подошвы шпалы.

После подъемки рельсошпальной решетки на 40 мм по обеим сторонам, произведен пневматическим суфляжем мелким (фракция 5-10 мм) щебнем непосредственно под шпалу в обводненную зону (рисунки 3.3, 3.4).



Рисунок 3.3 - Выправка пневматическим суфляжем



Рисунок 3.4 - Обводненная зона мокрого выплеска

В дальнейшем уровень головки рельса по внутренней головке нити контролировался нивелировкой по каждой шпале. Была выполнена нивелировка после снятия домкратов, сразу после прохода 1-го поезда, а в последующем, через каждую неделю после выправки.

Результаты нивелировки приведены на рисунке 3.5

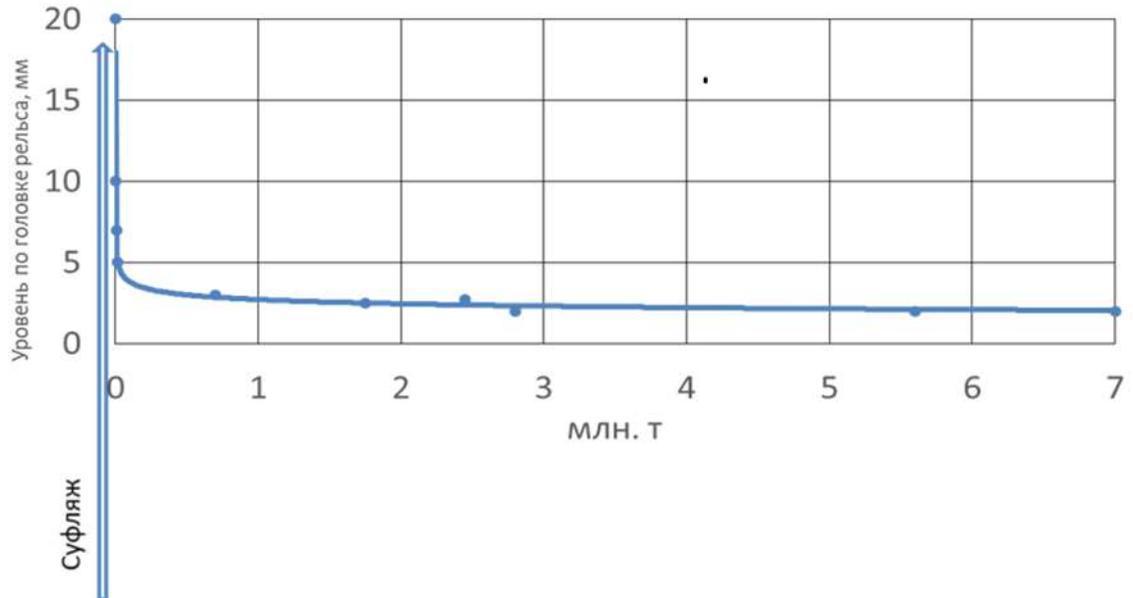


Рисунок 3.5 - Осадка полевой и внутренней нити после пневматического суфляжа 24.07.2013 на мокром выплеске (общий пропущенный тоннаж после выправки 7 млн тонн брутто)

Нивелировки показали, что осадка рельсовых нитей после пневматического суфляжа происходит следующим образом: после прохода первого поезда на 10 мм, затем происходит осадка ещё на 10-15 мм за первую неделю эксплуатации, после чего путь стабилизируется.

Следы пульпы вновь появились в шпальном ящике через 3 недели после выправки (рисунок 3.6), что свидетельствовало о необходимости проведения, в дальнейшем, повторной выправки.



Рисунок 3.6 - Появление следов пульпы в шпальном ящике

Вместе с тем следует отметить, что в опытном стыке до суфляжа приходилось выполнять неоднократные выправки электрошпалоподбойками, в связи с тем, что потайные толчки после выправки подбивкой проявлялись вновь через 2 – 3 дня.

В качестве второго опытного объекта был выбран вырезанный мокрый выплеск 24км, ПК4 перед 15 стрелкой, расположенной около нечетной горловины станции Яганово в стыке с принимающей стороны. В этом стыке путь со скреплениями АРС переходил на путь со скреплениями КБ

В стыке имел место потайной толчок на 6 шпалах с просадками 23-25 мм (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 - Раскопанная скрытая просадка 25 мм под шпалой

Предварительно сделанный раскоп у торца шпал показал, что постель шпал прочная. 22.08.2017 г. была произведена выправка объекта пневматическим суфляжем без замены подрельсовых прокладок. В процессе выправки было израсходовано 100 кг мелкого щебня на 7 выправленных шпал, однако последующие наблюдения показали, что полностью ликвидировать потайную просадку не удалось. Это, кстати, подтвердило методику выправки потайных толчков, приведенную в работе А.К. Борисова [15]. Данная методика предполагала выправку пути методом суфляжа в два этапа при величине потайного толчка более 20 мм. 03.10.2017 г. была произведена повторная выправка объекта пневматическим суфляжем без замены подрельсовых прокладок (замена не требовалась). Было израсходовано 60 кг мелкого щебня на 6 выправленных шпал дополнительно. Последующие наблюдения показали, что при повторной выправке также не удалось ликвидировать скрытую просадку.

### **3.2 Оценка соотношения пропущенного тоннажа на пути и количества циклов нагружения при стендовых испытаниях моделей с пневматическим суфляжем**

Для того, чтобы получить соотношение осадки на стендовой модели, имитирующей шпалу, выправленную пневматическим суфляжем, и данные, полученные в стыке, выправленном пневматическим суфляжем на действующем пути (3 участок Жилевской дистанции, 32 км ПКб, 1-й путь, перегон Яганово – Непецино), данные стендовых моделей и данные осадки на действующем пути сравнивались между собой.

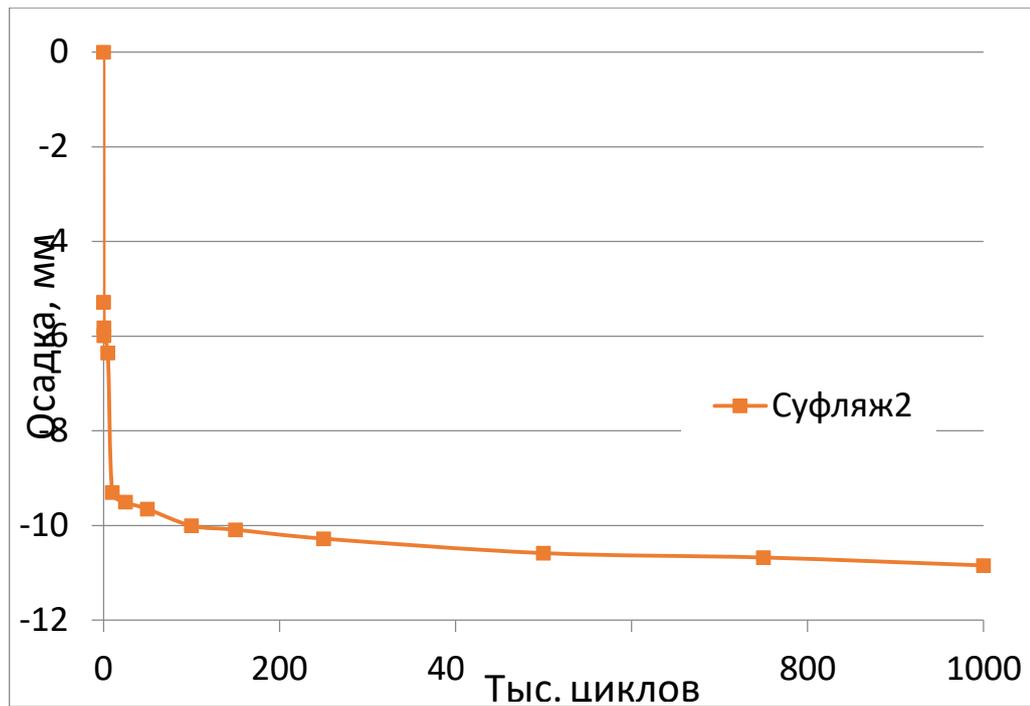


Рисунок 3.8 - Осадка после выправки суфляжем для лабораторных моделей

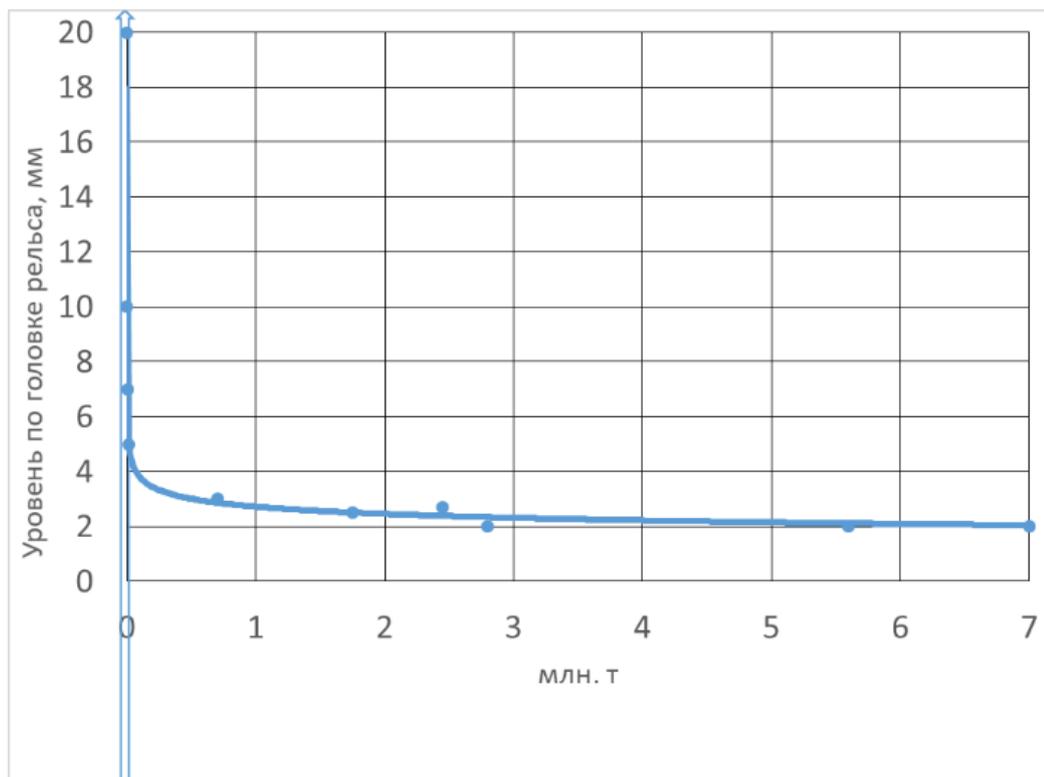


Рисунок 3.9 - Осадка после выправки суфляжем на действующем пути

Результат сравнения показывает, что сравниваемые объекты ведут себя практически одинаково, кроме того, что окончательная осадка на реальном пути оказалась на 5 мм больше. Эту разницу следует отнести к тому, что на

действующем пути замеры производились на изолирующем стыке. Разницу в величине осадки следует отнести к особенности работы железнодорожного пути в стыках. Кроме того, на действующем пути был зафиксирован мокрый выплеск, находящийся в начальной стадии развития. Исходя из вышеуказанного, следует отнести лабораторную модель к адекватной.

Нельзя не указать на тот факт, что механизм развития осадки полностью коррелируется с результатами, полученными Дж Вотерсом в 1981 году [71] (рисунок 3.10).

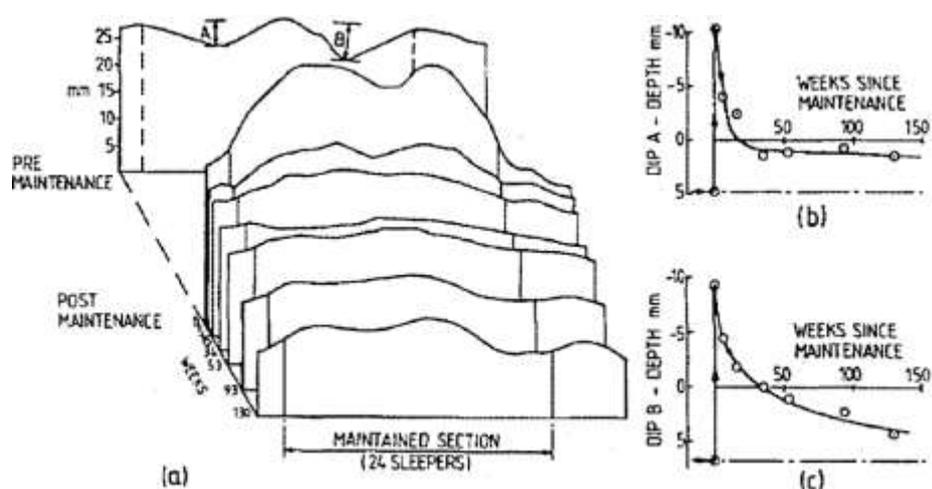


Рисунок 3.10 - Осадка выправленных пневматическим суфляжем просядок А и В во времени на опытном участке 24 шпалы согласно [71]

На рисунке, взятом из источника показано развитие осадки на опытном участке при выправке просядок А и В пневматическим суфляжем от времени. В обоих случаях фиксируется высокая скорость развития осадки на начальном этапе с последующим замедлением скорости развития осадки. Сопоставив все рассмотренные факторы, следует признать лабораторную модель 1g адекватной и подходящей для моделирования выправки пневматическим суфляжем.

Сравнивая результаты, полученные лабораторно, и на реальном пути можно уверенно сделать вывод о том, что созданные в работе стендовые модели являются адекватными и, в достаточной мере соответствуют поведению реального

железнодорожного пути при осадке после проведенной выправки пневматическим суфляжем.

Однако, стендовые испытания, проведенный РУТ (МИИТ) в 2017 году [50] показали, что при совместной работе суфляжного и балластного щебня существует опасность миграции мелких частиц суфляжного щебня в балластные пустоты и блокирование пустот в балластной призме. Результатом этого должно стать снижение пористости балластной призмы и увеличение, вследствие этого, жесткости балласта что, в свою очередь ведет к повышению скорости истирания и излома балластных гранул [19]. Это могло привести к быстрой потере частью балластного слоя дренирующих свойств и спровоцировать появление сначала сухого, а затем и мокрого выплеска. На участках с высоким загрязнением балластной призмы, которое часто возникает тогда, когда пропущенный по участку тоннаж близок к нормативному межремонтному тоннажу или превышает его, имеет место повышенное истирание частиц щебня балластной призмы вследствие интенсивной работы его в подшпальном основании. Это явление характерно, прежде всего, для пути на железобетонных шпалах так, как в длительно эксплуатируемой балластной призме балластный материал вследствие излома и истирания балластных гранул максимально уплотняется, крупные поры закрываются более мелкими частицами, жесткость балласта увеличивается [26] Результатом этого процесса часто является образование так называемого «сухого» выплеска.

Согласно разработанной методике пришлось изменить конструкцию экспериментальной модели (рисунок 3.11). Чтобы легко было оценивать миграцию щебня 5-10 мм в путевой балласт в эксперименте для выполнения пневматического суфляжа применялся окрашенный щебень этой фракции. В качестве разделительной сетки использовалась двуслойная пластиковая сетка верхний слой кладочная сетка отверстием 5 мм; нижний - георешетка TriAx со стороной 40 мм (рисунок 3.12, 3.13).

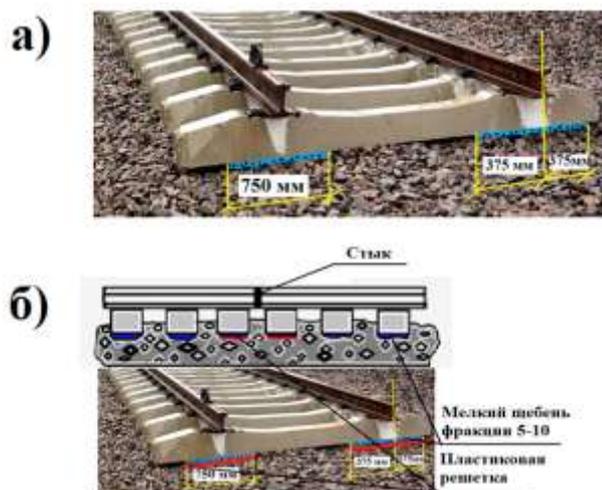


Рисунок 3.11- Предполагаемая конструкция экспериментального подшпального основания: а) без разделительной пластиковой решетки; б) с разделительной решеткой

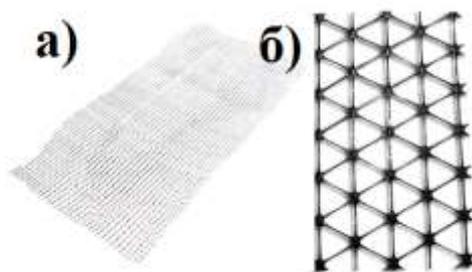


Рисунок 3.12 - Конструкция разделительной решетки: а) 1 слой кладочная сетка 5x5 мм; б) 2 слой георешетка TriAx со стороной 40 мм

Нижний слой разделительной решетки был использован, как основа для кладочной сетки, позволяющая безопасно уложить разделительную конструкцию под шпалы (рисунок 3.13).

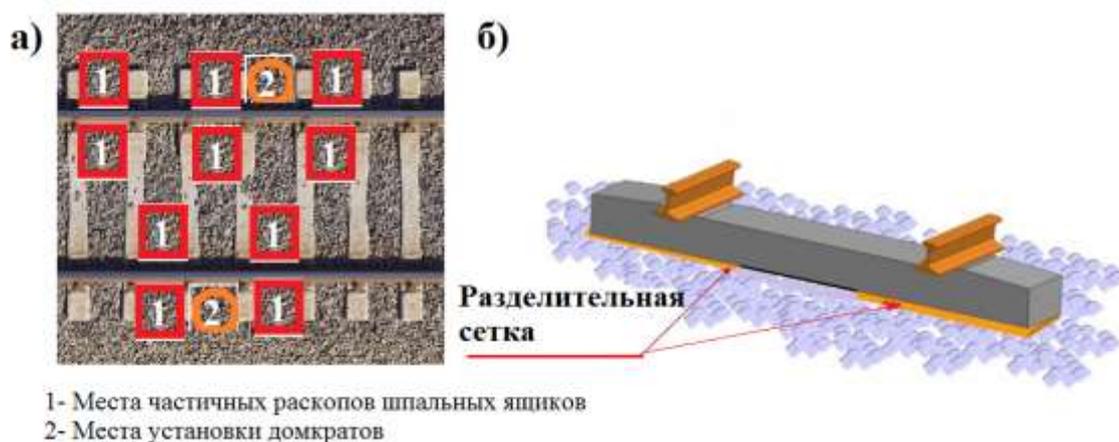


Рисунок 3.13 - Установка разделительных сеток, а) Места раскопа шпальных ящиков и установки домкратов б) Установка разделительных сеток из шпального ящика

### 3.3 Испытания на опытном участке Экспериментального кольца ВНИИЖТ

Испытательным центром ОАО «ВНИИЖТ» в содружестве с кафедрой «Путь и путевое хозяйство» РУТ «МИИТ» в октябре 2018 года был повторно заложен опытный участок на Экспериментальном кольце ВНИИЖТ в г. Щербинка. В качестве экспериментальных стыков использовались стыки между рельсами № 291-292 и 292-293 6 км ПКЗ Испытательного кольца. Те же самые стыки были задействованы как экспериментальные осенью 2017 года [24].

Стыки расположены на 6 километре 2 пути, на расстоянии 12,5 метров друг от друга и имеют следующую конструкцию верхнего строения пути (таблица 3.2):

Скорости обращающихся на участке поездов:

пассажирские - до 140 км/ч

грузовые - до 90 км/ч

Грузонапряженность 230 млн. тонн брутто на км. в год

Таблица 3.2 - Конструкция верхнего строения пути опытных участков

Стык №	Километр пикет	Тип рельсов	Конструкция пути	Скрепление, тип шпал	Положение в плане
291-292	6 ПКЗ	Р-65	Звеньевой	КБ, ЖБ	Прямая
292-293	6 ПКЗ	Р-65	Звеньевой	КБ, ЖБ	Прямая

Пропущенный по участку тоннаж на момент испытаний составил 2 миллиарда 200 миллионов тонн брутто (нормативный межремонтный тоннаж превышен в 3 раза, нормативный тоннаж между очистками балласта превышен более чем в 6 раз).

Высота необходимой подъемки определялась с помощью нивелира возможно использовать прибор регистрации пучин (ПРП) (рисунок 3.14), величина скрытой просадки определяется при помощи флексометров.

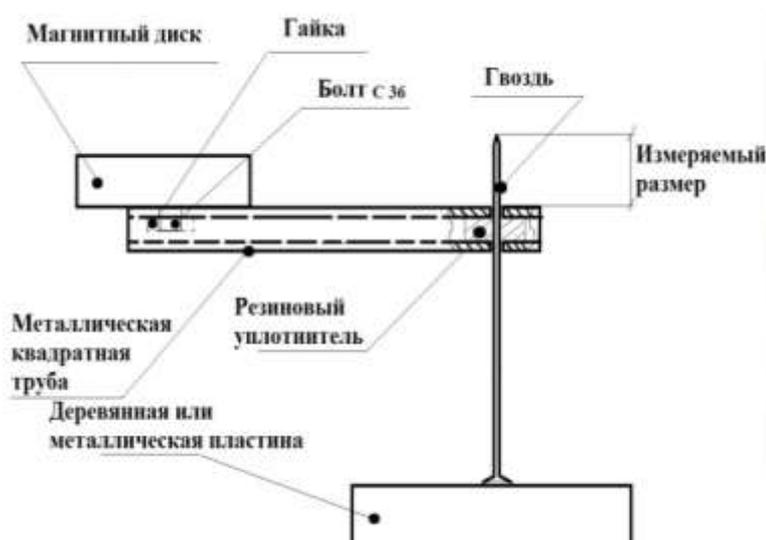


Рисунок 3.14 - Построение силового профиля пути сочетанием данных нивелировки и флексометров

### Результаты замеров после проведения испытаний

По результатам измерений профиля в сочетании данных нивелировки и величин прогиба рельса были получены силовые профили головки рельса под подвижным составом. Наиболее характерный силовой профиль получен на левой нити стыка 293-294 (рисунок 3.15).

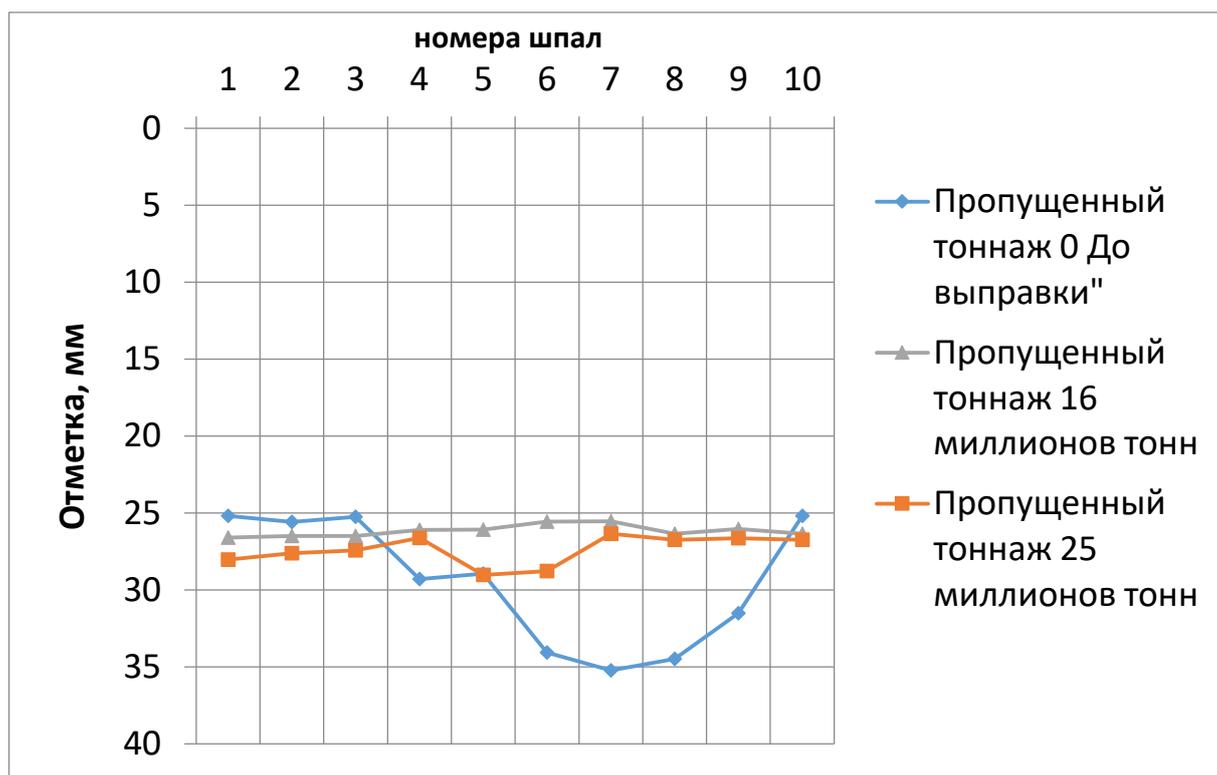


Рисунок 3.15 - Силовой профиль левой нити стыка 293-294

В результате визуальных осмотров и осмотра после удаления балласта из шпальных ящиков, выправленных пневматическим суфляжем шпал было установлено:

1. В стыке видны признаки интенсивной работы пневмосуфляжного щебня под выправленными шпалами (рисунок 3.16а);
2. Пневмосуфляжный щебень не мигрировал в нижележащие слои балластной призмы только там, где под него была уложена разделительная сетчатая конструкция, даже после пропуска 25 миллионов тонн трафика (рисунок 3.16 б);



Рисунок 3.16: а) признаки интенсивной работы пневмосуфляжного щебня под выправленными шпалами; б) пневмосуфляжный щебень под шпалой после пропуска 25 миллионов тонн трафика; в) миграция пневмосуфляжного материала после 6 миллионов тонн трафика при отсутствии под ним разделительной сетчатой конструкции

### 3.4 Выводы по главе 3

- пневматический суфляж может успешно применяться для выправки стыковых просадок на железнодорожном пути с просроченным капитальным ремонтом по наработанному тоннажу, что подтверждают ранее выполненные опытные исследования [33];

- технология пневматического суфляжа с использованием мелкого щебня, несомненно будет наиболее эффективной при работе на железнодорожном пути, с высокими грузонапряженностью и осевыми нагрузками 25 тонн на ось и выше при определенном соотношении размеров частиц путевого и суфляжного щебня [27];

- в рамках пневматического суфляжа всю номенклатуру работ можно разделить на подготовительные, основные и заключительные работы. Подготовительные и заключительные работы могут быть выполнены «под поездами», что касается основных работ – они могут выполняться также «под поездами» в случае выправки «хватками» по одной- двумя шпалами на участках интенсивного движения (межпоездной интервал 5-7 минут); При этом, такая

частичная выправка не сказывается на качестве выправки подготовленного к выправочным работам участка в целом [26, 24];

- если размеры материалов балластной призмы и пневмосуфляжного материала не соответствуют друг другу по геометрическим соображениям, они могут быть уложены при наличии разделительного слоя из пластиковой сетки с ячейей соответствующей необходимому размеру для удержания пневмосуфляжного материала от миграции в балластную призму, однако, более технологично для первой выправки пневматическим суфляжем использование щебня более крупных фракций, например, 10-20 мм;

- в дальнейшем, возможно рассмотреть использование способа выправки пневматическим суфляжем в сочетании с использованием подшпальных прокладок, как работу текущего содержания пути при выправке скоростного пути на балласте [41].

## **ГЛАВА 4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СУФЛЯЖА**

Расчет затрат на выполнение работ по выправке пути монтерами пути с применением гидравлических инструментов и электрошпалоподбоек [5].

### **4.1 Расчет трудозатрат на выправку пути ЭШП (Норма времени № 1.1)**

Наименование работы - исправление просядок и перекосов пути на щебеночном балласте подбивкой шпал электрошпалоподбойками ЭШП-9.

Условия работы.

1. Участок пути бесстыковой или звеньевой.
2. На бесстыковом пути работа выполняется при температуре рельсовых плетей, не превышающей температуру их последнего закрепления на величину, установленную техническими указаниями по укладке и содержанию бесстыкового пути.
3. Подбивка производится четырьмя электрошпалоподбойками ЭШП-9.
4. Питание электрошпалоподбоек электрической энергией производится от передвижной электростанции.
5. В процессе работы для вывешивания пути до 20 мм используются два гидравлических домкрата, устанавливаемых попарно.
6. Измерительные работы с записью величин исправления пути и регулировка шпал по меткам производится заранее.
7. Балласт для добавления находится на обочине или междупутье.
8. Рельсы типов Р50, Р65 и Р75, шпалы железобетонные или деревянные с эпюрой 1840 шт. и 2000 шт. на 1 км пути, крепление раздельное КБ, КД (К - 4) и смешанное костыльное ДО.
9. При исправлении просядок и перекосов пути, требующих отрывки балласта (на глубину 40 - 50 мм ниже подошвы шпал) из шпальных ящиков перед

подбивкой, в норме времени монтеров пути на каждую шпалу следует учитывать 0,155 нормо-ч. (время на отрывку и заброску балласта с трамбованием).

10. Исправление просадок и перекосов пути на бесстыковом пути более чем в пяти шпальных ящиках подряд не допускается.

11. При наличии в пути регулировочных прокладок в норме времени монтеров пути на каждую снятую прокладку следует учитывать 0,118 норм/ч.

Таблица 4.1 - Количество и состав исполнителей при выправке

Состав группы	Количество исполнителей, чел.,		
	участок пути		
	звеньевой	бесстыковой	пневмосуфляж
Монтер пути 3 разряда	1	1	1
Монтер пути 4 разряда	6	1	3
Монтер пути 5 разряда	-	5	1
Итого	7	7	5
Тарифный разряд работ, выполняемых монтерами пути	3,8	4,5	3,2
Измеритель работы - 10 шпал			
Норма времени, нормо-ч			
тип скреплений			
КБ	КД (К - 4)	ДО	
2,4	2,6	2,0	1,57

Таблица 4.2 - Расчет трудозатрат при выправке пути ЭШП-9, количество 10 шпал.

N п/п	Содержание работы	Единица измерения	Количес тво исполнит елей, чел.	Применяемые машины, механизмы, инструменты и приспособления	Учтенный объем работы	Оперативное время, нормо-мин	
						на единицу измерения	всего
1.	Подтягивание гаек клеммных болтов при скреплении КД (К - 4), КБ	гайка	2	ключ путевой	40	0,215	8,6
2.	Подтягивание гаек закладных болтов при скреплении КБ	болт	1	ключ торцовый	40	0,215	8,6
3	Довертывание шурупов при скреплении КД (К - 4)	шуруп	2	ключ торцовый	80	0,311	24,9
4	Добивка костылей с подвешиванием шпал при скреплении ДО	костыль	2	молоток костыльный	40	0,126	5,04
. Установка пары гидравлических домкратов и вывешивание пути:							

Продолжение Таблицы 4.2

Подбивка шпал:							
7	шпалы железобетонные	шпала	5	ЭШП - 9	10	6,7	67,0
8	шпалы деревянные	то же	5	ЭШП - 9е	10	6,04	60,4
9	Подброска балласта при подбивке	шпальный ящик	1	вилы щебеночные	10	1,36	13,6
10.	Переноска распределительной коробки и кабеля	шпала	1	-	10	0,65	6,5
11	Снятие пары гидр. домкратов и переноска к следующему месту уст-ки	снятие	2	-	1,25	1,04	1,3
Регулировка в плане выправленного участка пути:							

Продолжение Таблицы 4.2

12	шпалы железобетонные	м пути	5	РГ - 12Б	5,43	1,8	9,77
13	шпалы деревянные	то же	5	РГ - 12Б	5,43	1,29	7,01
14	Перемещение электростанции в пределах рабочей зоны	перемещение	5	-	0,164	33,7	5,53
ИТОГО							
	шпалы железобетонные, балласт щебеночный, КБ						125,1
	шпалы деревянные, балласт щебеночный, КД						131,3
	шпалы деревянные, балласт щебеночный, ДО						102,9

## 4.2 Предлагаемая норма времени выправка пути пневматическим суфляжем

Наименование работы - исправление просадок и перекосов пути на щебеночном балласте подсыпкой мелкого щебня под шпалу воздуходувкой ВР - 200

Условия работы

1. Участок пути бесстыковой или звеньевой.
2. На бесстыковом пути работа выполняется при температуре рельсовых плетей, не превышающей температуру их последнего закрепления на величину, установленную техническими указаниями по укладке и содержанию бесстыкового пути.
3. Подсыпка производится одной воздуходувкой ВР - 200
4. Питание от двигателя внутреннего сгорания
5. В процессе работы для вывешивания пути до 20 мм используются два гидравлических домкрата, устанавливаемых попарно.
6. Измерительные работы с записью величин исправления пути и регулировка шпал по меткам производится заранее.
7. Балласт для добавления находится в специальных мешках или ведрах.
8. Рельсы типов Р50, Р65 и Р75, шпалы железобетонные или деревянные с эпюрой 1840 шт. и 2000 шт. на 1 км пути, крепление раздельное КБ, КД (К - 4) и смешанное костыльное ДО.
9. При выправке требуется отрывка балласта (на глубину 5 мм ниже подошвы шпал) из части шпальных ящиков перед суфляжем, в норме времени монтеров пути на каждую шпалу следует учитывать 0,08 нормо-ч. (время на отрывку и заброску балласта с трамбованием).
10. Исправление просадок и перекосов пути на бесстыковом пути более чем в пяти шпальных ящиках подряд не допускается.

Трудозатраты при применении выправки пневматическим суфляжем меньше, чем при выправке электрошпалоподбойками не менее 25-29 процентов в зависимости от конструкции верхнего строения пути (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Расчет трудозатрат при выправке пути пневматическим суфляжем, количество 10 шпал.

N п/п	Содержание работы	Единица измерения	Количество исполнителей, чел.	Применяемые машины, механизмы, инструменты и приспособления	Учтенный объем работы	Оперативное время, нормо-мин	
						на единицу измерения	Всего
1.	Подтягивание гаек клеммных болтов при скреплении КД (К - 4), КБ	гайка	2	ключ путевой	40	0,215	8,6
2.	Подтягивание гаек закладных болтов при скреплении КБ	болт	1	ключ торцовый	40	0,215	8,6
3.	Подтягивание гаек закладных болтов при скреплении КБ	болт	1	ключ торцовый	40	0,215	8,6

Продолжение таблицы 4.3

Пневматический суфляж							
4	Шпалы железобетонные	шпала	3	БР -200	10	1,67	16,7
5	Шпалы деревянные	шпала	3	БР -200	10	1,67	16,7
6	Снятие пары гидр. домкратов и переноска к следующему месту установки	снятие	2	-	1,25	1,04	1,3
Регулировка в плане выправленного участка пути:							
7	шпалы железобетонные	м пути	5	РГ - 12Б	5,43	1,8	9,77
8	шпалы деревянные	М пути	5	то же	5,43	1,29	7,01
ИТОГО							
	шпалы железобетонные, балласт щебеночный, КБ						93,97
	шпалы деревянные, балласт щебеночный, КД						99,43
	шпалы деревянные, балласт щебеночный, ДО						69,03

Нормы времени монтеров пути находим также из выправки 1 км пути /1840 шпал / будет затрачено при выправке ЭШП скрепление КБ на щебеночном балласте (2.4\*60) 144 ч/часа из расчета 250-300 м на километр. Затраченное время 20,6 часа (7 человек) 3 рабочие смены по 8 часов + 0,75 часа на переходы +1,5 часа на отдых (30 минут/смену)

ИТОГО 22,85 часа

На выправку 1 км пути /1840 шпал / будет затрачено при выправке пневматическим суфляжем при скреплении КБ на щебеночном балласте (1.57\*60) 94,2 ч/часов. Затраченное время – 18,9 часа (5 человек) 3 рабочие смены по 8 часов+ 0,75 часа на переходы +1,5 часа на отдых.

ИТОГО 21,15 часа

Тариф монтерам пути в соответствии с "Положением о корпоративной системе оплаты труда работников филиалов и структурных подразделений открытого акционерного общества "Российские железные дороги" (утв. Решением правления ОАО "РЖД" (протокол от 18-19 декабря 2006 г. N 40) (ред. от 22.05.2015), с учетом индексации составляет.

Монтёры пути 3 разряда - 109,47 рублей в час;

Монтёры пути 4 разряда - 126,93 рублей в час.

Монтёры пути 5 разряда - 147,38 рублей в час.

Тарифная зарплата монтеров пути при выправке пути ЭШП на ЖБ шпалах скрепление КБ

$(1*109,47+1*126,93+5*147,38) *483=122267,0$  рублей

Премия монтеров пути составляет 55% - 67246,85 рублей.

Выплаты за вредные условия труда при производстве работ составляют 4% - 4890,68 рублей.

Районный коэффициент для монтера пути 4 разряда составляет 34% - 41570,78 рублей

Тогда оплата труда равна 235975,31 рублей

Суммы отчислений на социальные нужды составит: 30,4% - 71736,49 рублей

ИТОГО 307711,80

Тарифная зарплата монтеров пути при выправке пути пневматическим суфляжем на ЖБ шпалах скрепление КБ

$$(1 \cdot 109,47 + 3 \cdot 126,93 + 1 \cdot 147,38) \cdot 289 = 60065,96$$

Премия монтеров пути составляет 55% - 33036,28 рублей

Выплаты за вредные условия труда при производстве работ составляют 4% - 2402,63 рублей

Районный коэффициент для монтера пути 4 разряда составляет 34% - 20422,33 рублей

Тогда оплата труда равна 115927,20 рублей

Суммы отчислений на социальные нужды составит: 30,4% - 23185,44 рублей

Итого с начислениями 139112,64

Следовательно, технико-экономический эффект замены ручной выправки ЭШП на ручную выправку пневматическим суфляжем на один километр пути составит:

$$\text{Этэ} = \text{Сэшп} - \text{Ссуфл} \quad (4.1)$$

$$\text{Этэ} = 1183119,90 - 344829,07 = 168599,16 \text{ рублей}$$

Принимая во внимание, что на участках с интенсивным движением поездов работы по выправке железнодорожного пути относятся к I группе процент рабочего времени, сильно сокращается при увеличении количества поездов, проходящих по участку, а работы способом пневматического суфляжа относятся ко II группе, где сокращение времени работ от общей продолжительности смены намного меньше.



Рисунок 4.1 - Процент рабочего времени от общего табельного времени при 8-часовой смене в зависимости от количества поездов в смену для работ текущего содержания железнодорожного пути I и II группы [22]

Тогда для участка со средней грузонапряженностью 33 млн тонн брутто 22,85 часа рабочего времени для выправки шпалоподбойками составят для 1 группы  $22,85 * 100/52$  или 44 часа

А для участка со средней грузонапряженностью 80 млн тонн брутто 22,85 часа рабочего времени для выправки шпалоподбойками составят для 1 группы  $22,85 * 100/4,5$  или 508 часов

В случае использования пневматического суфляжа.

Для участка со средней грузонапряженностью 33 млн тонн брутто 21,15 часа рабочего времени для выправки шпалоподбойками составят для II группы  $21,5 * 100/73$  или 29 часов

А для участка со средней грузонапряженностью 80 млн тонн брутто 21,15 часа рабочего времени для выправки шпалоподбойками составят для II группы  $21,5 * 100/59,75$  или 35,4 часа.

Заработная плата при выправке 1 км электрошпалоподбойками при грузонапряженности 33 и 80 млн тонн брутто составит соответственно: 592530,38 рублей и 6707640,89 рублей

Заработная плата при выправке 1 км пневматическим суфляжем при грузонапряженности 33 и 80 млн тонн брутто составит соответственно:

187640,31 рублей и 229050,58 рублей

Тогда экономический эффект:

$Этэ = Сэшп - Ссуфл$

Для грузонапряженности 33 млн. тонн брутто/км в год

$Этэ = 592530,38 - 187640,31 = 404890,07$  рублей или 220,05 рублей на шпалу

Для грузонапряженности 80 млн. тонн брутто/км в год

$Этэ = 6707640,89 - 229050,58 = 6478590,31$  рублей или 3520,97 рублей на шпалу

Предположим, что выправка электрошпалоподбойками производится в короткие технологические «окна» стоимость одного окна согласно тендеру закупки №32312020853 «Оказание услуг по предоставлению технологических "окон" в

графике движения поездов продолжительностью 2 часа 30 минут каждое (однопутный) по рабочим дням на перегоне Рязань бкм. - Карасево и технологических "Окон" в графике движения поездов продолжительностью 2 часа 30 минут каждое (однопутный) по рабочим дням на перегоне Карасево - Озеры Московской железной дороги в графике движения поездов Московской дирекции управления движением - филиала ОАО "РЖД" для организации и проведения ходовых испытаний подвижного состава», размещенного 10.01.2023 18:42:51 (МСК) [74].

Начальная сумма тендера составляла 3 657 282 рублей за 55 технологических «окон»

Итого стоимость 1 окна составила 66496,04 рубля.

Для выправки 1 километра пути электрошпалоподбойками необходимо 9 окон, тогда стоимость окон для выправки составит  $66496,04 * 9 = 598464,36$

Суммируем стоимость «окон» с стоимостью работ, получаем  $307711,80 + 598464,36 = 906176,16$  или 492,49 рублей за шпалу

Считаем экономический эффект  $Э_{тэ} = С_{эшп} - С_{суфл}$  или  $906176,16 - 229050,58 = 677125,58$  или 368 рублей на шпалу

Для расчета экономического эффекта 1 локального места выправки принимаем длину локального места в 8 шпал, тогда для выправки ЭШП сумма затрат на 1 локальное место составит  $906176,16 / 230 = 3939,90$  рублей

Для выправки пневмосуфляжем сумма затрат на 1 локальное место составит  $229050,58 / 230 = 995,87$  рублей.

Технико-экономическая оценка разработанного способа выправки

Экономическая оценка эффективности метода была выполнена на базе сравнения потерь от выдачи предупреждений об ограничении скорости при наличии в пути неровностей [74]

Потери от выдачи ограничения скорости определяются по формуле:

$$I = \Delta * e_{\Delta(t)} * 1,3, \quad (4.2)$$

где

$\Delta$  - Дополнительный расход электроэнергии (кВт-час) вызванный

снижением скорости при выдаче предупреждений определяется выражением:

$$\mathcal{E} = 3,8 \cdot (V_1^2 - V_2^2) \cdot \Gamma \cdot K_{\mathcal{E}(T)}, \quad (4.3)$$

где,  $V_1, V_2$  - скорости движения соответственно до и после введения ограничения, км/ч;

$$V_1 = 60 \text{ км/ч} \quad V_2 = 40, 25 \text{ км/ч},$$

$\Gamma$  - грузонапряженность, млн. ткм бр км/в год

$K_{\mathcal{E}(T)}$  - расход электроэнергии (условного топлива) на вводах тяговых подстанций на 1 ткм механической работы.

$e_{\mathcal{E}(T)}$  - расходная ставка 1 кВт ч электроэнергии, рублей

Здесь приняты:

Расходная ставка - 7 рублей за 1 кВт ч.;

Если при возникшей в пути неровности требуется ограничение скорости до 25 км/ч (при допустимой 60 км/ч), а после проведения работ скорость можно поднять до 40 км/ч, то разница в потерях определяет экономическую эффективность способа, т.е.

$$I_{(60-25) \text{ км/ч}} - I_{(60-40) \text{ км/ч}}$$

Расчетные величины в зависимости от грузонапряженности приведены в таблице 4.4

Таблица 4.4 - Расчет потерь от выдачи предупреждения при  $V_1=60$  км/ч  $V_2=40$  км/ч и при  $V_1=60$  км/ч  $V_2=25$  км/ч

Расчет потерь от выдачи предупреждения при $V_1=60$ $V_2=40$						
Кэ(т), руб	7	7	7	7	7	7
Г, млн ткм бр/км в год	10	30	50	80	100	150
$V_1$	60	60	60	60	60	60
$V_2$	40	40	40	40	40	40
Кэ(т)	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42
тыс. руб. (год)	2365,3	7095,8	11826,4	18922,2	23652,7	35479,1
тыс. руб. (сутки)	6,5	19	32,4	51,8	64,8	97,2
Расчет потерь от выдачи предупреждения при $V_1=60$ $V_2=25$						
Кэ(т), руб	7	7	7	7	7	7
Г, млн ткм бр/км в год	10	30	50	80	100	150
$V_1$	60	60	60	60	60	60
$V_2$	40	40	40	40	40	40

Расчет потерь от выдачи предупреждения при $V_1=60$ $V_2=25$						
Кэ(т)	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42	3,42
тыс. руб. (год)	3518,3	10555,0	17591,7	28146,7	35183,4	52775,1
тыс. руб. (сутки)	9,6	28,9	48,2	77,1	96,4	144,6

Потери от снижения скорости представлены на рисунке 4.2



Рисунок 4.2 - Зависимость разницы потерь от грузонапряженности при снижении скорости до 40 км/ч и 25 км/ч

Предположим, что выправка ЭШП в 3 раза эффективнее, чем пневматический суфляж, т.е. Выправка ЭШП обеспечивает 75 миллионов тонн брутто пропущенного тоннажа, однако при грузонапряженности 80 миллионов тонн при выправке ЭШП

Необходим заказ «окна» продолжительностью 2,5 часа стоимостью 66496,04, даже предположив заказ «окна» продолжительностью 1 час, его стоимость не может быть ниже 26598,42 рублей. При заказе «окна» оно должно быть спланировано за 1 неделю, соответственно стоимость, с учетом потерь от снижения скорости составят стоимость «окна» + потери от снижения скорости за 7 дней при грузонапряженности 80 миллионов тонн брутто + стоимость выправки. При снижении скорости с 60 до 40 км/ч  $26598,42 + 7 \cdot 51800,0 + 3939,90 = 2\,568\,738,32$

При этом. 3 выправки пневматическим суфляжем составят сумму всего 2 987,61

При грузонапряженности 33 миллионов тонн/километр в год стоимость выправки 1 локального места ЭШП составит 2 576,22 на 75 миллионов тонн брутто/км в год, стоимость выправки пневматическим суфляжем составит 2 987,61

на 75 миллионов тонн брутто/км в год, учитывая гораздо меньшую трудоемкость данного способа выправки, необходимость доставки различных механизмов в виде электростанции и 4 ЭШП, весом по 19 кг разница в стоимости практически нивелируется [6].

#### **4.3 Выводы к главе 4**

1) Сделанный экономический расчет на базе анализа фактических трудозатрат при выправке пути ЭШП-9 показывает, что даже если восстановление геометрии рельсовой колеи будет кратковременным, потери при выдаче предупреждений ограничения скорости многократно перекрывают предполагаемую экономию от более длинного жизненного цикла мероприятий по выправке электрошпалоподбойками по сравнению с выправкой пневматическим суфляжем [23].

2) В случае же интенсивного движения поездов при высоких осевых нагрузках на участке выполнения выправочных работ выгода от применения способа выправки железнодорожного пути пневматическим суфляжем многократно превышает выгоду от применения способа выправки пути электрошпалоподбойками.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертационного исследования получены следующие итоги, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

1. Разработаны предложения по применению способа пневматического суфляжа для оперативного краткосрочного устранения локальных просадок без нарушения целостности постели шпал.

2. Доказана возможность и целесообразность применения способа пневматического суфляжа для оперативного краткосрочного устранения просадок на пути с загрязненным балластом на период пропуска до 25 миллионов тонн пропущенного тоннажа на сухих выплесках, а на мокрых выплесках без вырезки загрязненного щебня на период как минимум 7 миллионов тонн пропущенного тоннажа.

3. Обоснована возможность применения способа пневматического суфляжа для оперативного краткосрочного устранения просадок на участках интенсивного движения поездов за счет сокращения времени производства работ.

4. Экспериментально подтверждена возможность и целесообразности применения способа пневматического суфляжа для оперативного краткосрочного устранения просадок, в том числе, на мокрых выплесках без вырезки загрязненного щебня.

5. Получены зависимости интенсивности осадки пути при выправке способом пневматического суфляжа от зернового состава суфляжного материала, показывающие, что для пути на железобетонных шпалах при выправке пневматическим суфляжем в стыках для первой выправки фракцию щебня 5-10 мм следует заменить на фракцию щебня 10-20 мм.

6. Разработаны предложения по применению способа пневматического суфляжа, для устранения просадок без нарушения целостности постели шпал.

7. Способ выправки железнодорожного пути пневматическим суфляжем в первую очередь рекомендуется для применения при выправке локальных просадок на всех участках, в первую очередь на участках с грузонапряженностью более 90

миллионов тонн, а также рекомендуется при выправке железнодорожных выплесков на ранней и средней стадии их развития. Целесообразно применение способа в местах, при выправке предмостовых ям, выправка переходных участков с балластного на безбалластный путь, выправке в зоне литых крестовин стрелочных переводов, выправке флюгарочных брусьев стрелочного перевода.

8. Рекомендовано в исследованиях по оценке возможности перемещения суфляжного щебня в щебень путевой фракции использовать геометрический метод Седергрена.

Перспективой дальнейшего развития представленной работы является разработка технологии механизированного устранения локальных неровностей способом пневматического суфляжа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 7392-2014 Межгосударственный стандарт. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути.
2. СНиП 33-01-2003. Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования. Госстрой РФ, М. -2003. - 31 с.
3. Инструкция по выправке толчков, просядок и перекосов пути способом подсыпки (суфляж). - М.: Трансжелдориздат, 1944. - 32 с.
4. Инструкции по обеспечению безопасности движения поездов при производстве путевых работ. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2540р.
5. Технически обоснованные нормы времени на работы по текущему содержанию пути. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 30.03.2009 (редакция от 05.08.2015), 7-е издание в 2-х частях, часть 1.
6. Абрамов, А.П. Методические указания, по экономической оценке, показателей эксплуатационной работы железных дорог / А.П. Абрамов. - М.: ВНИИЖТ, 1989. - 112 с.
7. Абрашитов, А.А., Опыт механизированного пневматического суфляжа /А.А. Абрашитов // Путь и путевое хозяйство. - 2014. - № 5. - С. 11 - 13.
8. Абрашитов, А.А., Зайцев, А.А., Семак, А.В., Шаврин, Л.А. «Оценка источников загрязнения балластного слоя из гранитного щебня и моделирование разрушения и истирания частиц щебня при динамическом нагружении» в сборнике: Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. // Труды XIII Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. - 2016. - С. 184-187.
9. Абрашитов, А.А. Пневматический суфляж при выправке пути на щебеночном балласте А.А. Абрашитов // Путь и путевое хозяйство. - 2013. - № 2. - С. 11 - 13.

10. Абрашитов, А.А., Сидраков А.А., Сазонова Т.А. «The innovative surfacing principle of the underground track laid on the gravel ballast International innovation»: ITSI-2021 29 июня 2021 Moscow, Russia AIP Conf. Proc. 2476, 020029 (2023).

11. Алёшин, В. А. Автомат управляет машиной / В.А. Алешин // Путь и путевое хозяйство. - 1961. - № 10 - С. 11-13.

12. Ашеко, С. М. Эксплуатация путевых, строительных и погрузо-разгрузочных машин: учебник / С. М. Ашеко, Ф.М. Ващилов, М.Е. Ильин и др. - М: Транспорт, 1979. - 264 с.

13. Безручко, В. С. Механизация путевых работ на зарубежных железных дорогах / В. С. Безручко. - М.: Трансжелдориздат, 1957. - 139 с.

14. Бокарев, С.А., Ефимов С.В. Вопросы подобия усиленных железобетонных балок при экспериментах на уменьшенных масштабных моделях / С.А. Бокарев, С.В. Ефимов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». - 2014. - № 5(24). - Режим доступа: <https://naukovedenie.ru/index.php?p=issue-5-14> (Дата обращения 2023.12.18).

15. Борисов А.К. Улучшенный способ подсыпки (суфляжа) / А.К. Борисов // Научное инженерно-техническое общество Московско-Киевской железной дороги ДорНИТО. - 1948.

16. Бромберг Е.М. Бесстыковой путь / под ред. Е.М. Бромберга. - М.: Трансжелдориздат, 1962. - 215 с.

17. Варызгин, Е.С. Расчет и конструирование балластной призмы железнодорожного пути / Под общ. ред. Е.С. Варызгина. - М.: Транспорт, 1970. - 190 с.

18. Васильченко, Г.М. Деформативность пути при различных способах выправки / Г.М. Васильченко // Путь и путевое хозяйство. - 2004. - № 6. - С. 11-12.

19. Варызгин, Е.С. Содержание балластной призмы железнодорожного пути / Под общ. ред. Е.С. Варызгина. - М.: Транспорт, 1978. - 142 с.

20. Временные технические указания по производству работ по укладке бесстыкового пути с плитами в подрельсовом основании. - М.: МИИТ, 1975.

21. Иванов, И.Е., Ерещенко В.Е. Методы подобия физических процессов: учеб. пособие / И.Е. Иванов, В.Е. Ерещенко. - М.: МАДИ, 2015. - 144 с.
22. Каменский, В.Б. Направления совершенствования системы ведения путевого хозяйства / В.Б. Каменский. - М.: ОАО НИИТКД, 2009. - 392 с.
23. Каменский, В.Б. Справочник дорожного мастера и бригадира пути / В.Б. Каменский - М.: Транспорт, 1986. - 488 с.
24. Каплин, В.Н. Технология и определение применимости пневмосуфляжа при текущем содержании пути / В.Н. Каплин, А.А. Абрашитов, Е.Н. Гринь. // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. - 2020. - № 2. - С. 74 -79.
25. Карпов, Н.А. Лёгкие вибрационные путевые машины / Н.А. Карпов. - М.: Трансжелдориздат, 1962. - 312 с.
26. Колос, А.Ф. Засорение и загрязнение щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути / А.Ф. Колос // Известия Петербургского университета путей сообщения. - 2022. - Т. 19. - № 3. - С. 558 - 575.
27. Коссов, В. С., Краснов О.Г., Акашев М.Г. Влияние сухих выплесков на динамику взаимодействия подвижного состава и пути / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Путь и путевое хозяйство. - 2019. - № 2. - С. 23 - 25.
28. Ляпичев, Ю.П. Гидротехнические сооружения: учеб. пособие. / Ю.П. Ляпичев - М.: РУДН, 2008. - 302 с.
29. Никифоров, Н. А. Теория и практика уплотнения балластного слоя при производстве путевых работ: автореферат дис. док. техн. Наук / Никифоров Павел Алексеевич. - Москва. 1952. - 20 с.
30. Отчет о НИР «Организация высокоскоростного движения на участке Москва - Санкт-Петербург» (6.3.00). Рук. Темы П.М. Токарев. - М: МИИТ. - 2005.
31. Певзнер, В.О. Показатель скорости для предприятий путевого хозяйства / В.О. Певзнер // Железнодорожный транспорт. Серия Путь и путевое хозяйство. - 1989. - № 5. - С. 15 - 18.

32. Певзнер В.О., Ерёмушкин А.А., Пешков П.Г., Васильченко Г.М. Условия эксплуатации и эффективность выправки / В.О. Певзнер, А.А. Ерёмушкин, П.Г. Пешков, Г.М. Васильченко // Путь и путевое хозяйство. - 2005. - № 8. - С. 29 - 30.

33. Певзнер, В.О., Каплин В.Н., Абрашитов А.А., Семак А.В. Выправка пути на щебеночном балласте установкой подшпальных прокладок и пневматическим суфляжем / В.О. Певзнер, В.Н. Каплин, А.А. Абрашитов, А.В. Семак // Вестник ВНИИЖТ. - 2018. - Т. 77. - № 2. С. 104 -109.

34. Попов, И.Ф., Асбоцементные прокладки / И.Ф. Попов // Путь и путевое хозяйство. - 1957. - № 1.

35. Попов, С.Н., Балластный слой железнодорожного пути. / С.Н. Попов. - М.: Транспорт, 1965. - С.183.

36. Правила и технология выполнения основных работ при текущем содержании пути: ЦПТ-52. Утверждены заместителем начальника Департамента пути и сооружений В.Б. Каменским 30.06.97 / РФ. Министерство путей сообщения. Департамент пути и сооружений. - М.: Транспорт, 1998. - 135 с.

37. Руководство по расчетной фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов П 55-76 / Министерство энергетики и электрификации СССР. ГлавНИИПроект. Всесоюзный НИИ Гидротехники им. Б.Е. Веденеева. - Л.: 1976. - 77 с.

38. Саморукова, Г.Т. Современные тенденции в развитии зарубежных выправочных и шпалоподбивочных машин / Г.Т Саморукова // сборник научных трудов ВНИИЖТ. - 1961. - № 217. - С. 9 - 24.

39. Содержание и эксплуатация железных дорог / составили Блюм, фон Боррис, Баркгаузен; пер. и доп. данными русских железных дорог Н. Б. Богуславский. - Санкт-Петербург: издание К.Л. Риккера, 1902.

40. Татновский, А.М. Петропавловский Б.П. Опыт использования шпалоподбивочных машин ШПМ-02 / А. М. Татновский, Б. П. Петропавловский. - М.: Транспорт, 1964. - 127 с.

41. Третьяков, В.В. Повышение стабильности пути в зоне стыков за счет применения упругих подшпальных прокладок/ В.О. Певзнер, М.М. Железнов, В.Н.

Каплин, В.В. Третьяков, М.Н. Мысливец, А.С. Томиленко // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. - 2016. - № 3. - С. 140 - 146.

42. Шафрановский, А.К. Выправка пути в заключительной стадии стабилизации щебёночной призмы / А.К. Шафрановский // сборник научных трудов ВНИИЖТ. - 1961. - № 217. - С. 99 - 106.

43. Шафрановский, А.К. Закономерности неравномерных осадок пути / А.К. Шафрановский // сборник научных трудов ВНИИЖТ. - 1952. - № 5.

44. Шахунянец, Г.М. Важные вопросы технического прогресса в путевом хозяйстве / Г.М. Шахунянец // Путь и путевое хозяйство. - 1962. - № 1.

45. Шахунянец, Г.М. О перспективах коренного улучшения конструкции верхнего строения пути / Г.М. Шахунянец. - М.: Железнодорожный транспорт, 1955. - 435 с.

46. Шахунянец, Г.М. Работа пути с железобетонными шпалами под нагрузкой / под общ. ред. Г.М. Шахунянца. - М.: Транспорт, 1965. - 252 с.

47. Щербина, Б.А. Выправка толчков и просадок пути суфляжем / Б.А. Щербина. - М.: Трансжелдориздат, 1938. - 44 с.

48. Щербина, Б.А. Суфляж при текущем содержании пути и реконструкции / Б.А. Щербина. - М.: Трансжелдориздат, 1939. - 88 с.

49. Abrashitov A.A., Semak A.V. Experimental Investigation of Railway Maintenance with Stoneblowing Techniques, *Transportat. Soil Eng. Cold Regions*, 2020. pp. 19 - 26.

50. Abrashitov A. A. Experimental study of stoneblowing track surfacing technique procedures of *Transportation Geotechnics and Geotechnology*, 2017.

51. Aingaran S., Le Pen L., Zervos A., Powrie W. Modelling the effects of trafficking and tamping on scaled railway ballast in triaxial tests, *Transp. Geotec*, 2018. vol. 15. pp. 84 - 90.

52. Aursudkij B. A, *Laboratory study of railway ballast behavior under traffic loading and tamping maintenance*», University of Nottingham, 2007.

53. Azema E., Etude numerique des materiaux granulaires a grains polyedriques: rheologie quasi-statique, dynamique vibratoire, application au precedes de bourrage du ballast, Universite Montpellier, 2007.
54. Cedergren H. R. Seepage, drainage and flow nets, Third Edition, John Wiley & Sons, 1989.
55. Descantes Y., Perales R., Saussine G., Milesi N. On the damaging effects of the ballast tamping operation, AIPCR, 2011.
56. Douglas S.C. Ballast Quality and Breakdown during Tamping, Proceedings of the 2013 American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association Conference. Inidanpolis, 2013.
57. Calla C. Two layered ballast system for improved performance of railway track, Coventry University, 2003.
58. Lichtberger B. The lateral resistance of the track (Part 2), J Eur. Railway Rev, 2007.
59. Maintenance safety code for normal speed railway (in Chinese), China Railway Publishing House, Beijing, 2014.
60. McDowell G.R., Lim W.L., Collop A.C., Armitage R., Thom N.H. Laboratory simulation of train loading and tamping on ballast, PI Civil Eng. Transp, 2005. vol. 158 (2). pp. 89 - 95.
61. McMichael P., McNaughton A. The Stoneblower-Delivering the Promise: Development, Testing and Operation of a New Track Maintenance System, 2003.
62. Morgan J., Youngman P. Single shaft tamper with reciprocating rotational output, 2002.
63. Muramoto K., Nakamura T., Sakurai T. A study of the effect of track irregularity prevention methods for the transition zone between different track structures, Quart. Report of RTRI 53, 2012. vol. 4. pp. 211 - 215.
64. Przybyłowicz M., Sysyn M., Kovalchuk V., Nabochenko O., Parneta B. Experimental and Theoretical Evaluation of Side Tamping Method for Ballasted Railway Track Maintenance, Transport Problems, 2020. vol. 15 (3). pp. 93 - 106.
65. Schabert C. Zeitschrift for Banwesen. 1890-1897. Orqan, 1897.

66. Selig, E.T., Waters, J.M. Track Geotechnology and Substructure Management. Thomas Telford Services Ltd., London, 1994.

67. Shi S., Gao L., Xiao H., Xu Y., Yin H. Research on ballast breakage under tamping operation based on DEM-MBD coupling approach, Constr. Build. Mater, 2021. vol. 272.

68. Sol-Sanchez M., Moreno-Navarro F., Rubio-Gamez M., Manzo N., Fontsero V. Full-scale study of Neoballast section for its application in railway tracks: optimization of track design, 2018. vol. 51 (2).

69. Tutumluer E., Huang H., Hashash Y., Ghaboussi J. Aggregate shape effects on ballast tamping and railroad track lateral stability, AREMA Annual Conference, Louisville, 2006. pp. 17 - 20.

70. Wang H., Markine V. Corrective countermeasure for track transition zones in railways: Adjustable fastener, Eng. Struct, 2018. vol. 169. pp. 1 - 14.

71. Waters J.M. British Railways Research and Development division c. Eng., M.L.C.E. Head of track development unit «Pneumatic stone injection a means of adjusting track level» Fourth International Rail Track & Sleeper Conference, Adelaide, 1981.

72. Wentz R., Plasser & Theurer machines and technologies applied for track maintenance of high-speed railway lines: a selection. Rail Eng. Int, 2007. p. 36.

73. Zimmormen. Die Berechnung des Gisenborn-oberbanes. p. 112.

74. Официальный сайт Единой информационной системы в сфере закупок. Режим доступа:

<http://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/notice223/common-info.html?regNumber=32312020853> (дата обращения: 2023.12.18).

**ПРИЛОЖЕНИЕ****Акты внедрения результатов диссертационного исследования****СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ**

результатов диссертационного исследования

**Абрашитова Александра Ахметовича** на тему:

**«Совершенствование выправочных работ пневматическим суфляжем»**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

В работе Абрашитова Александра Ахметовича описываются вопросы, связанные с применением пневматического суфляжа для устранения просадок на участках с высокой плотностью поездопотока.

Данная работа является актуальной, т.к. направлена на применение способа пневматического суфляжа для оперативного устранения локальных просадок на участках интенсивного движения поездов.

Представленные в диссертационном исследовании результаты были использованы в рамках проведения выправочных работ на полигоне Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» на подходах к испытываемым конструкциям безбалластного пути

Пропущенный по участку тоннаж на момент испытаний составил 2 миллиарда 200 миллионов тонн брутто (нормативный межремонтный тоннаж превышен в 3 раза, нормативный тоннаж между очистками балласта превышен более чем в 6 раз).

Сравнение технологий выправки просадок в стыках показало:

- при выправке с помощью ЭШП было пропущено 5 млн т брутто тоннажа до повторного нарастания амплитуды просадки до 12-13 мм, стоимость одной выправки 706,4 рубля;

- при выправке с помощью пневмосуфляжа, было пропущено 25 млн т брутто тоннажа до повторного нарастания амплитуды просадки до 12- 13 мм, стоимость одной выправки 160,75 рубля;

Расчетное количество требуемых выравок на 150 млн т бр. тоннажа составляет:

Тип выправки	Количество выравок на 150 млн т бр.
ЭШП	30
Пневмосуфляж	6

Стоимость выправки просадки на одном стыке составляет:

Тип выправки	Количество выравок на 150 млн т бр.	Стоимость одной выправки стыка (8 шпал)	Затраты на выработку одного стыка на 150 млн т бр.
ЭШП	30	171,75	5152,50
Пневмосуфляж	6	199,17	1195,02

Приведенные данные показывают, что использование пневмосуфляжа позволяет сократить расходы на устранение просадки в одном стыке по сравнению с выработкой ЭШП на 76,8%.

Заместитель начальника  
Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ»



В.Н.Каплин