

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

*На правах рукописи*

**Мироненко Евгений Викторович**

**РАЗРАБОТКА МЕР ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ НЕОБХОДИМОГО  
ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ СО  
СВЕРХДЛИННЫМИ РЕЛЬСОВЫМИ ПЛЕТЯМИ**

Специальность 2.9.2 – Железнодорожный путь, изыскание  
и проектирование железных дорог

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Новакович Василий Иванович

Ростов-на-Дону

2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
Глава 1 ПРОБЛЕМЫ РАБОТЫ СВЕРХДЛИННЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПЛЕТЕЙ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ .....	10
1.1 Основные вопросы обеспечения необходимого температурного режима работы бесстыкового пути со сверхдлинными рельсовыми плетями .....	10
1.2 Выводы по первой главе .....	21
Глава 2 ПОГОННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ БАЛЛАСТА ПРОДОЛЬНОМУ СДВИГУ ШПАЛАМИ И МЕРЫ ПО ЕГО ПОВЫШЕНИЮ.....	23
2.1 Исследования погонного сопротивления балласта сдвигу шпалами .....	23
2.2 Определение максимального и минимального значений погонного сопротивления шпал сдвигу в балласте .....	43
2.3 Сопротивление шпал сдвигу в балласте под действием продольных и поперечных сил и анализ возможных мер по его повышению.....	49
2.4 Выводы по второй главе .....	62
Глава 3 ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ БАЛЛАСТА СДВИГУ ОТ МАССЫ ОПОР И ИХ КОНСТРУКЦИИ .....	65
3.1 Методика и результаты экспериментальных исследований зависимости сопротивления балласта сдвигу шпалами от массы шпал .....	65
3.2 Влияние материала и конструкции подрельсовых опор на их работу в бесстыковом пути .....	73
3.3 Выводы по третьей главе .....	83
Глава 4 ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕОБХОДИМОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ .....	84
4.1 Проблемы ввода рельсовых плетей в установленный температурный режим работы .....	84
4.2 Обоснование уточнённых границ температурного интервала закрепления рельсовых плетей.....	94
4.3 Сварка рельсовых плетей с обеспечением установленного температурного режима .....	102

4.4 Выводы по четвёртой главе .....	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	132

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы исследования**

В настоящее время бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями (длиной до перегона и более) в России является основной конструкцией верхнего строения пути. Предполагается в дальнейшем укладка рельсовых плетей практически неограниченной длины, сваренных со стрелочными переводами. Однако осуществление данного проекта задерживается в связи с отсутствием соответствующих нормативов. В настоящее время на сети железных дорог в большом объёме продолжают эксплуатироваться рельсовые плети длиной до 800 м. Нет разработанных технологий восстановления целостности рельсовых плетей, а также увеличения их длины путём ликвидации уравнильных пролётов алюминотермитной сваркой с обеспечением необходимой температуры закрепления.

### **Степень разработанности темы исследования**

Из-за особенностей климата и условий эксплуатации на отечественных железных дорогах, особое внимание обращается прежде всего на обеспечение необходимого температурного режима работы бесстыкового пути. Непосредственно этому вопросу были посвящены работы М.С. Боченкова, Е.М. Бромберга, В.И. Новаковича. М.С. Боченков разработал и испытал на действующих участках бесстыковой путь с саморазрядкой температурных напряжений, Е.М. Бромберг предложил и более широко внедрил бесстыковой путь с сезонной разрядкой напряжений. В.И. Новакович разработал ряд мер, позволивших широко внедрить на отечественных железных дорогах бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями.

Работы А.Я. Когана, В.А. Грищенко и О.А. Сулова способствовали совершенствованию конструкции бесстыкового пути и методики его расчёта. Разработки Н.П. Виногорова позволили на отечественных железных дорогах использовать бесстыковой путь на мостах, под его руководством в последние десятилетия в рассматриваемой области совершенствовалась нормативная документация.

В работах С.П. Першина и М.Ф. Вериги проанализирован отечественный и зарубежный опыт по особенностям устройства и методам расчета бесстыкового пути.

Развитию бесстыкового пути были посвящены работы таких зарубежных учёных как О. Амман, Ф. Бирман, И. Ваттман, К. Грюневальдт, А. Зарембски, М. Мартине, Г. Мейер, И. Немчек, Э. Немешди, М. Нумато, А. Приуддом, Ф. Рааб, И. Хошино и др.

### **Цель и задачи исследования**

*Целью* диссертации является разработка мер по обеспечению необходимого температурного режима работы бесстыкового пути со сверхдлинными рельсовыми плетями.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие *задачи*:

1. Определены необходимые для расчетов бесстыкового пути минимальные и максимальные значения погонных сопротивлений сдвигу рельсошпальной решетки в поперечном и продольном направлениях.
2. Оценено влияние массы шпал на сопротивление сдвигу рельсошпальной решетки бесстыкового пути в балласте.
3. Разработан способ сварки рельсовых плетей бесстыкового пути при температурах ниже их закрепления с восстановлением установленного температурного режима работы.
4. Обоснована необходимость мер, обеспечивающих прочность стыковых болтов на концах рельсовых плетей в границах установленного температурного режима работы бесстыкового пути в зависимости от климатических условий.

### **Научная новизна:**

1. Впервые произведена оценка необходимых для расчетов бесстыкового пути минимальных и максимальных значений погонных сопротивлений сдвигу рельсошпальной решетки в поперечном и продольном направлениях.
2. Экспериментально определено влияние массы шпал на их сопротивления сдвигу в балласте с учётом воздействия поездов.

3. Разработан способ термитной сварки рельсовых плетей бесстыкового пути при температурах ниже их закрепления с восстановлением установленного температурного режима их работы.

4. Предложены технологические приёмы, обеспечивающие прочность стыковых болтов на концах рельсовых плетей в пределах установленного температурного интервала закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути в зависимости от климатических условий.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методики определения минимальных и максимальных значений сопротивления балласта сдвигу шпал с учётом воздействия поездов в зависимости от цели выполнения расчётов необходимых для обеспечения устойчивости и прочности элементов верхнего строения бесстыкового пути.

Практическая значимость работы заключается в разработке мероприятий, необходимых для обеспечения прочности стыковых болтов на концах рельсовых плетей в пределах границ установленного температурного интервала закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути в зависимости от климатических условий. Разработан новый способ сварки сверхдлинных рельсовых плетей при температурах ниже температуры их закрепления с восстановлением установленного температурного режима работы бесстыкового пути.

### **Методы диссертационного исследования**

Исследования, проведенные в настоящей работе основаны на современных методах планирования экспериментов, математической статистики и анализе результатов, полученных отечественными и зарубежными учёными в области бесстыкового пути, в том числе на методах теории ползучести.

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

1. Метод определения, анализа и оценки необходимых для расчётов бесстыкового пути минимальных и максимальных по вероятности значений погонных сопротивлений сдвигу рельсошпальной решетки в поперечном и продольном оси пути направлениях.

2. Методика проведения, анализа и оценки результатов экспериментов по определению зависимости сопротивления сдвигу железобетонных шпал в балласте от массы шпалы, проведенных с учётом воздействия поездов на действующих участках бесстыкового пути.

3. Способ сварки рельсовых плетей при температурах ниже их закрепления с восстановлением установленного температурного режима работы бесстыкового пути.

4. Комплекс мероприятий по обеспечению безопасности движения поездов по раскрытию зазора и прочности болтов на концах рельсовых плетей в пределах установленных границ температурного интервала закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути в зависимости от климатических условий на различных железных дорогах России.

### **Степень достоверности результатов исследования**

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, основана на проведенном анализе известных практических исследований и теоретических работ отечественных и зарубежных учёных, в числе которых труды О. Аммана, Ф. Бирмана, М.С. Боченкова, Е.М. Бромберга, М.Ф. Вериги, Н.П. Виногорова, К. Грюневальдта, В.М. Ермакова, В.В. Ершова, Н.И. Залавского, А.В. Замуховского, Г.В. Карпачевского, В.В. Карпачевского, А.Я. Когана, Е.В. Корниенко, Е.А. Манюгиной, К.Н. Мищенко, В.И. Новаковича, В.О. Певзнера, Ф. Рааба, Р. Рубина, О.А. Сулова, Г.М. Шахунянца, В.В. Шубитидзе. Достоверность результатов основана также на сравнении и сопоставлении современных и полученных ранее результатов, на применении методов строительной механики, аппарата математической статистики, а также экспериментальных данных, полученных на действующих участках бесстыкового пути.

### **Апробация работы**

Апробация работы произведена в Северо-Кавказской дирекции инфраструктуры – филиале Центральной дирекции ОАО «РЖД» с получением соответствующего акта.

Основные результаты исследований были доложены и обсуждены:

- на Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» («Транспорт-2017», Ростов-на-Дону, 2017 г.);
- на Всероссийской национальной научно-практической конференции «Современное развитие науки и техники» («Наука-2017», Ростов-на-Дону, 2017 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» («Транспорт-2018», Ростов-на-Дону, 2018 г.);
- на II Международной научно-практической конференции «Транспорт и логистика: инновационная инфраструктура, интеллектуальные и ресурсосберегающие технологии, экономика и управление» (Ростов-на-Дону, 2018 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» («Транспорт-2019», Ростов-на-Дону, 2019 г.);
- на Всероссийской национальной научно-практической конференции «Инновационные технологии в строительстве и управление техническим состоянием инфраструктуры» (Ростов-на-Дону, 2019 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» («Транспорт-2020», Ростов-на-Дону, 2020 г.);
- на Всероссийской национальной научно-практической конференции «Современное развитие науки и техники» («Наука-2020», Ростов-на-Дону, 2020 г.);
- на XVII Международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», посвящённой памяти профессора Г.М. Шахунянца (ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ), Москва, 29 октября – 26 ноября 2020 г.)
- на Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» («Транспорт-2021», Ростов-на-Дону, 2021 г.);
- на IV Всероссийской национальной научно-практической конференции «Инновационные технологии в строительстве и управление техническим состоянием инфраструктуры» (Ростов-на-Дону, 11 апреля 2022 г.).

**Личный вклад автора состоит:**

– в оценке необходимых для расчётов бесстыкового пути минимальных и максимальных значений погонных сопротивлений сдвигу рельсошпальной решетки в поперечном и продольном направлениях.

– в разработке методики и проведении экспериментов по определению влияния на продольное сопротивление сдвигу железобетонных шпал в балласте их массы с учётом воздействия поездов на действующих участках бесстыкового пути.

– в разработке нового способа и приспособления для сварки рельсовых плетей бесстыкового пути при температурах ниже их закрепления с восстановлением установленного температурного режима работы.

– в обосновании технологических приёмов, необходимых для обеспечения прочности стыковых болтов на концах рельсовых плетей, закреплённых в верхней границе установленного температурного интервала, в зависимости от климатических условий региона.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 19 печатных работах, в том числе 6 – в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Диссертация изложена на 133 страницах основного текста, содержит 51 рисунок, 4 таблицы, список использованных источников из 183 наименований, 1 приложение.

# 1 ПРОБЛЕМЫ РАБОТЫ СВЕРХДЛИННЫХ РЕЛЬСОВЫХ ПЛЕТЕЙ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ

## 1.1 Основные вопросы обеспечения необходимого температурного режима работы бесстыкового пути со сверхдлинными рельсовыми плетями

Согласно статистике ОАО «РЖД», общая протяженность бесстыкового пути на железных дорогах России в 2020 год составила 98,6 тыс. км (рисунок 1.1). При этом растёт доля участков бесстыкового пути с рельсовыми плетями длиной до перегона и более.

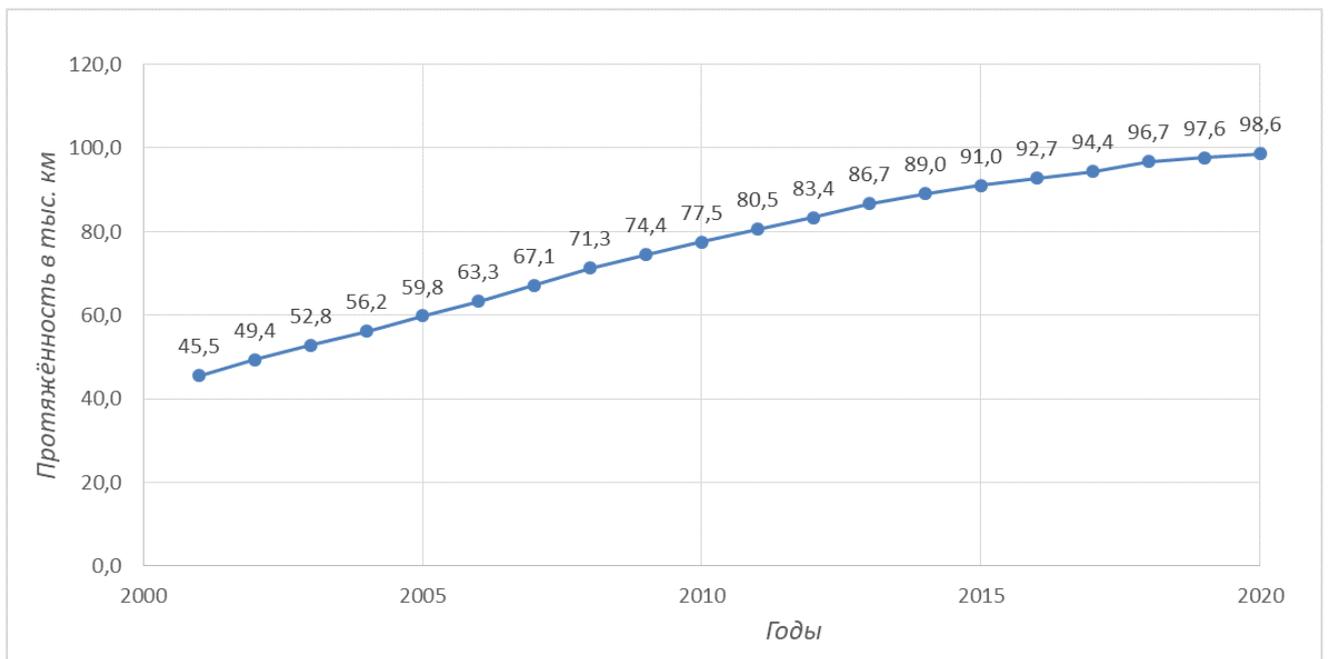


Рисунок 1.1 – Рост протяженности бесстыкового пути на железных дорогах РФ

В то же время доля звеньевоего пути остаётся значительной: на 2018 год протяжённость звеньевоего пути составила около 26 тыс. км, из них 19 тыс. км на деревянных шпалах и 7 тыс. км – на железобетонных, переход на конструкцию бесстыкового пути ещё далеко не завершён. Конструкция звеньевоего пути на железобетонных шпалах может применяться временно, на период производства капитального ремонта пути с разборкой рельсошпальной решетки, последующей

укладкой пути и заменой инвентарных рельсов на новые рельсовые плети [1]. Длительная эксплуатация звеньевого пути на железобетонных шпалах приводит не только к интенсивному расстройству рельсовой колеи, возникновению дефектов элементов верхнего строения пути: рельсов, шпал, креплений, разрушению балласта в зоне стыков, но и возникновению температурных напряжений [1]. При соблюдении всех требований эксплуатации звеньевого пути, проведении своевременной регулировки стыковых зазоров установленный на железных дорогах России конструктивный зазор позволит работать пути с 25 м рельсами без температурных напряжений только при годовых температурных амплитудах менее 70 °С [2]. Таких условий на отечественных железных дорогах нет: это значит, что весной и летом могут образовываться опасные по условию устойчивости места, а в зимний период стыковые болты будут работать на срез. Анализ лент проходов путеизмерительных вагонов, проведенный в [3] показал, что значительная доля стрел изгиба в плане в напряженных неровностях находится на участках звеньевого пути.

Типовой в настоящее время является температурно-напряженная конструкция бесстыкового пути на железобетонных шпалах, при которой предполагается, что продольные силы, возникающие в рельсовых плетях при максимальных годовых колебаниях температуры, будут не в состоянии преодолеть сопротивление сдвигу рельсовых плетей по всей их длине.

Обеспечению установленного температурного режима работы рельсовых плетей бесстыкового пути в большей степени способствует 3 фактора – это сопротивление промежуточных рельсовых креплений продольным перемещениям рельсов, погонное сопротивление балласта и температура закрепления рельсовых плетей. В свою очередь температура закрепления рельсовых плетей должна обеспечивать прочность стыковых болтов (в местах временного восстановления плетей), зазор равный или меньший допускаемого при изломе рельсовой плети, ограничение продольной сжимающей силы при воздействии высоких температур. Описанные факторы можно представить в виде схемы (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Схема факторов, влияющих на обеспечение температурного режима работы рельсовых плетей

Одной из задач является обоснование температуры закрепления рельсовых плетей. Необходимо ограничить продольную сжимающую силу в период воздействия высоких температур посредством достаточно высокой температуры закрепления рельсовых плетей. Для бесстыкового пути согласно нормативным документам [4] допускаемое по условию устойчивости пути повышение температуры рельсовой плети  $[\Delta t_y]$  на железобетонных шпалах с рельсами Р65 принято более  $50^{\circ}\text{C}$  в прямой и более  $30^{\circ}\text{C}$  в кривых, при этом  $\Delta t_y$  было определено на основании опытов на стендовом прямом участке пути ВНИИЖТ длиной 100 м.

Целью опытов являлось воспроизведение процесса потери устойчивости нагревом рельсовых плетей, уложенных на деревянных, а позднее на железобетонных шпалах между двумя концевыми упорами [5]. Ночью, при наиболее низкой температуре перед проведением опыта производилась «разрядка» температурных напряжений с заклиниванием зазоров между концами плетей и упорными подушками. На рельсовые плети устанавливались термометры и по 15 устройств для записи перемещений после чего производился нагрев плетей током 3700-3800 А (24 В) [5].

Результаты стендовых опытов подвергались критике [6], основанной на том, что под воздействием поездов потеря устойчивости происходит при меньших температурах.

В дальнейшем исследования сдвига рельсошпальной решетки при одновременном воздействии поездной и температурной нагрузок, проведенные на Экспериментальном кольце ВНИИЖТ под руководством Е.М. Бромберга [7], позволили определить область применения статического подхода. Допускаемое отклонение от температуры закрепления по условию устойчивости  $[\Delta t_y]$  при воздействии динамики подвижного состава оказалось ниже, чем на испытательном стенде, по которому во время опытов не проходили поезда. В эксперименте рельсовые плети нагревались на  $40^\circ\text{C}$  в два цикла с одновременным пропуском большого числа поездов, при этом, рост стрелы изгиба в плане превысил допускаемое значение [8].

Для обеспечения устойчивости пути скорость нарастания стрел изгиба рельсов необходимо ограничить величиной, позволяющей вовремя обнаружить опасное место и принять меры к ликвидации напряжённой неровности. Расчетами [9] было определено, что при среднем превышении температуры закрепления на  $10^\circ\text{C}$  в течении 16 дней стрела изгиба рельсов в плане изменится незначительно. Однако, в случае среднего превышения температуры закрепления на  $40^\circ\text{C}$  при воздействии поездов рост стрелы изгиба рельсов в плане всего за 8 суток превысит допускаемое значение и потребует закрытия движения поездов [9]. Допускаемое по условию устойчивости пути повышение температуры рельсовой плети  $[\Delta t_y]$  является величиной, не учитывающей время и воздействие поездов, оказывающих влияние на напряжённо-деформируемое состояние бесстыкового пути [7], [9].

Просадки рельсовых нитей, неровности рельсов в плане, степень заполнения балластной призмы влияют на сопротивления балласта сдвигу шпал косвенно, по сравнению с температурой закрепления они оказывают меньшее влияние на условия устойчивости рельсовой колеи [10].

При реальных значениях механических характеристик бесстыкового пути летом было рассчитано [11], что среднесуточное отступление от температуры

закрепления в сторону её превышения в течение двух недель не должно превышать 10 °С. Если в течение двух недель максимальная температура рельсов днём составляет 60 °С, а минимальное ночью 30 °С, то среднесуточное значение составит 45 °С. В этом случае минимальная температура закрепления рельсовых плетей равна:  $45 - 10 = 35$  °С. Температура закрепления  $30 \pm 5$  °С установлена нормативами для всех железных дорог РФ, кроме Северо-Кавказской, Юго-Восточной и Приволжской, где температура закрепления составляет  $35 \pm 5$  °С. При данной температуре закрепления рельсовых плетей в большинстве случаев выполняется не только условие устойчивости бесстыкового пути при его эксплуатации, но и обеспечивается возможность выполнения ремонтных работ без предварительного перезакрепления рельсовых плетей, которое при применении сверхдлинных рельсовых плетей невозможно выполнить без их резки.

Нет единства также в вопросе трактовки максимального допускаемого зазора при сквозном изломе рельсовой плети в период воздействия низких температур. Нормативами принято максимальное допускаемое значение зазора равное 50 мм [4], ранее было принято значение  $\lambda_{max} = 40$  мм и отмечалось [12], что в случае большей величины 50 и 60 мм в кривых участках пути может образоваться угол в плане от 2,5 до 5°, создающий угрозу схода подвижного состава. Оценке подлежит влияние прочности рельсов и величина максимального допускаемого понижения температуры по условию прочности  $[\Delta t_p]$ .

При эксплуатации бесстыкового пути со сверхдлинными рельсовыми плетями мерами обеспечения сохранности установленной температуры закрепления является своевременное обслуживание промежуточных рельсовых скреплений, предотвращение угона рельсовых плетей, обеспечение нормативной степени уплотнения щебёночного балласта, оперативное выявление и устранение напряженных неровностей, содержание всех элементов верхнего строения пути в соответствии нормативам, своевременное проведение выправочно-подбивочных работ, пополнения, оправки и очистки балластного слоя, ликвидация уравнильных пролетов и мест временного восстановления плетей.

Количество мест временного восстановления рельсовых плетей за последние 20 лет выросло практически в 10 раз [13] (рисунок 1.3).

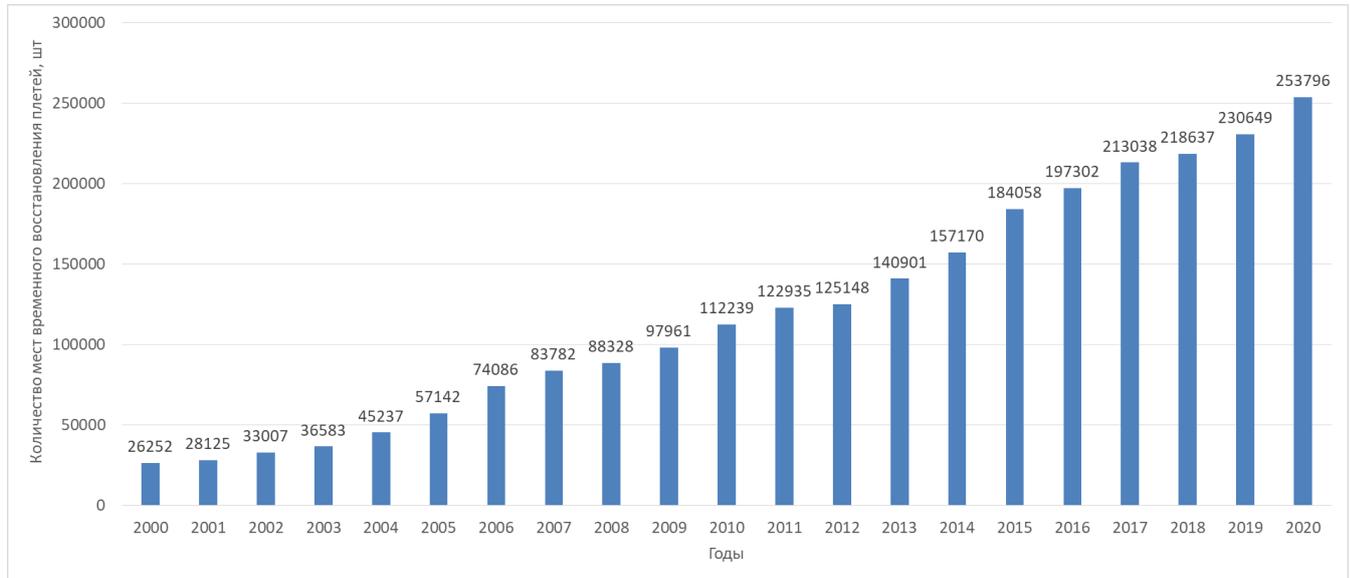


Рисунок 1.3 – Количество мест временного восстановления рельсовых плетей

При сохранении существующих темпов роста мест временного восстановления, каждое из которых, как известно, образует в рельсовой плети 2 стыка, термин «бесстыковой путь» станет условным. Эксплуатация бесстыкового пути в таких условиях помимо более интенсивного накопления остаточных деформаций влечёт ежегодные потери, оцениваемые в не менее чем 3,3 млрд. руб. в год [13]. Сварка рельсовых плетей в большинстве случаев осуществляется при температурах, находящихся в диапазоне установленной для каждой рельсовой плети, однако основное время года фактическая температура рельсов ниже температуры их закрепления. На данный момент существует утверждённая методика восстановления целостности рельсовых плетей при низких температурах электроконтактным способом [4]. Однако недостаточное количество рельсосварочных машин и относительно высокая стоимость производства работ не позволяет снизить рост числа мест временного восстановления. Этим объясняется постановка задачи данного диссертационного исследования о необходимости создания эффективного способа сварки рельсовых плетей при температурах, ниже температуры закрепления рельсовых плетей.

Опасность устойчивости бесстыкового пути представляет его угон. В начале изучения бесстыкового пути в СССР в связи с отсутствием промежуточных рельсовых скреплений, обеспечивающих надёжное прижатие рельса к шпале, угон считался основной проблемой [14], причём более характерной для бесстыкового пути, нежели для звеньевого. Данный тезис был распространён и после внедрения более надёжных промежуточных скреплений КД для деревянных шпал и К-2 для железобетонных, обеспечивающих не только большую силу прижатия рельса к шпале, чем применявшиеся в то время костыльные скрепления, но и более длительную сохранность данной силы. Изучение процесса угона бесстыкового пути проводилось В.Г. Альбрехтом [14], отметившим, что для обеспечения надёжности работы рельсовых плетей и предотвращения их угона недостаточно только одного внедрения новой конструкции скреплений. Необходим контроль за их состоянием, а также подвижками рельсовых плетей, нарушающими температурный режим работы. В начале угоняемого участка образуется растягивающая сила, температура закрепления на концевом участке возрастает, раскрываются зазоры в примыкающем уравнительном пролёте. В случае, если угон ещё не обнаружен, то максимально раскрывшиеся зазоры в уравнительном пролёте могут быть приняты как наоборот понижение температуры закрепления конца плети. В конце угоняемого участка и середине рельсовой плети произойдёт понижение температуры закрепления с возникновением продольной сжимающей силы, исчезновением стыковых зазоров в уравнительных пролётах, образованием торцевого давления. Если угон ещё не обнаружен, а нулевые зазоры объясняются повышением температуры рельсовых плетей в весенне-летний период продольная сила угона суммируется с температурной силой и может привести к потере устойчивости пути во время прохода поезда. Повышению вероятности потери устойчивости способствуют локальные участки рельсовой плети, на которых промежуточные скрепления не обеспечивают необходимого прижатия рельсов к шпалам. Даже при полном отсутствии общего угона плети на таких локальных участках возможно возникновение напряжённых неровностей. Предотвратить их

зарождение и развитие возможно путём обязательного осмотра всех меток, отражающих продольные подвижки по длине рельсовой плети.

Изучению конструкции промежуточных рельсовых скреплений и их влияния на устойчивость и температурный режим работы бесстыкового пути были посвящены работы Н.И. Карпущенко [15], В.И. Новаковича [16], В.М. Ермакова [17], А.Я. Когана [18], Б.Н. Зверева [19], В.О. Певзнера [20]. Основными типами промежуточных рельсовых скреплений, применяемыми на железных дорогах РФ в настоящее время, являются КБ-65, ЖБР-65 и его модификации (ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШ), АРС, КБ-65, Pandrol. ОАО «РЖД» предполагается постепенный переход к так называемым малообслуживаемым типам промежуточных скреплений. Скрепления типа АРС и, особенно, Pandrol, хуже справляются с задачей предотвращения угона, ввиду ограниченной тремя позициями (в АРС-4) возможности регулировки силы прижатия. В Pandrol-350 регулировка силы прижатия не предусмотрена. Клемма, получившая остаточные деформации, полностью теряет силу прижатия, допуская угон, нарушение ширины колеи с образованием углов в плане, разуклонку рельсов. В настоящее время не существует упругих промежуточных скреплений с прутковыми клеммами, работающих без остаточных деформаций, поскольку для этого работа клемм должна производиться только на кручение [21]. Но все прутковые клеммы работают изгиб с кручением [22].

Обеспечение безопасности движения поездов возможно только путём длительного сохранения температуры закрепления на всём протяжении рельсовых плетей. В связи с этим все работы на бесстыкового пути по текущему содержанию и ремонтам должны проводиться только при допустимых отступлениях температуры рельсовых плетей от их температуры закрепления по утвержденным технологическим картам и технологическим процессам. Однако допускаемые отступления от температуры закрепления определяются исходя из погонного сопротивления и сил прижатия рельса к шпале, имеющих большую дисперсию.

Главная опасность эксплуатации бесстыкового пути связана с тем, что в рельсовых плетях возникают продольные температурные силы, обусловленные

изменениями температуры. В случае, если температура рельсов превышает температуру их закрепления в рельсах возникает продольная сжимающая сила, стремящаяся нарушить устойчивость рельсовой колеи. При понижении температуры рельсов относительно температуры их закрепления в рельсах возникают продольные растягивающие силы, стремящиеся вызвать излом плети или срез стыковых болтов. Потеря устойчивости рельсовой плети согласно статистическим данным ОАО «РЖД» происходит в большинстве случаев во время прохода подвижного состава, непосредственно под ним, что приводит к сходу и крушению. Температура рельсовых плетей на участке крушения пассажирского поезда Новосибирск-Адлер в 2013 году составляла +52 °С, балловая оценка километра «отлично» [23] (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Потеря устойчивости бесстыкового пути под поездом на СКЖД (2013 г. перегон Кисляковка-Крыловская)

Согласно [4] с момента закрепления рельсовых плетей на дистанции пути должен быть организован постоянный контроль или, так называемый, мониторинг состояния плетей бесстыкового пути. Контролю подлежат усилие прижатия подошвы рельса к шпале, продольные подвижки рельсовых плетей относительно «маячных» шпал и створов, неровности пути в плане и другие параметры. Продольную силу, действующую в рельсовой плети, можно определить по температурной деформации некоторого её участка с помощью тензометров и

тензодатчиков. Разрабатывались самописцы перемещений, устанавливаемые непосредственно в пути, датчики, определяющие изменение электрического сопротивления рельсов, вызванного деформацией, приборы, основанные на принципе изменения магнитного поля при упругих деформациях стали, ошибочно называемые магнитострикционными (поскольку в приборах применялся эффект Виллари, обратный магнитострикции), приборы, работающие на основе эффекта Баркгаузена и другие. Большая часть устройств не нашла применения на железных дорогах общего пользования ввиду сложности, ненадёжности и неточности в трудных, отличающихся от лабораторных, условиях действующего пути, высокой стоимости внедрения и обслуживания [3]. Систем контроля рельсовых плетей, позволяющих в любой момент времени при любых климатических условиях с требуемой точностью (отклонение не более  $\pm 5^\circ\text{C}$  в выражении температуры) определить продольную силу в мире ещё не создано. Необходимо учитывать, что продольная сила по длине плети не имеет постоянного значения. В силу большого разброса значений погонного сопротивления, сил прижатия рельса к шпале, ввиду применения при текущем содержании и ремонтах пути подъёмных и натяжных устройств фактическая эпюра продольных сил не будет иметь правильной формы и прямых линий.

Методикой комплексной оценки состояния бесстыкового пути [24] по результатам прохода вагона-путеизмерителя, с привлечением программных комплексов ПГРК УРРАН и КАПС БП УРРАН предполагалось выявление проблемных участков бесстыкового пути по наличию одного или нескольких факторов из специального перечня, включающего наличие угона рельсовых плетей, состояние бесстыкового пути в плане, состояние рельсовых скреплений, плеча балластной призмы, наличие неподбитых и отрясённых шпал, заполнение шпальных ящиков. Но на основе предложенных факторов трудно определить вероятность потери устойчивости, т.к. не все участки, имеющие один или несколько из перечисленных неблагоприятных факторов, могут представлять опасность с точки зрения устойчивости. Например, из наличия незаполненных щебнем шпальных ящиков и недостаточной ширины плеча балластной призмы,

нельзя сделать вывод о «предвыбросном» состоянии участка бесстыкового пути, в то время как на другом участке рельсовой плети, имеющем лишь небольшую, но напряженную неровность в плане (фактор, не рассматриваемый методикой), вероятность потери устойчивости может быть выше.

О.А. Сусловым [25] на основе статистических данных было отмечено отсутствие зависимости количества «выбросов» пути от балльности участка на месте «выброса» чем обоснована невозможность прогнозирования состояния рельсовых плетей бесстыкового пути по балловой оценке участка пути и критериям УРРАН.

Был предложен метод контроля устойчивости бесстыкового пути с определением опасных мест по данным проходов путеизмерительных вагонов без дополнительных устройств и программ [3]. Суть метода заключается в сопоставлении данных проходов вагона-путеизмерителя, а именно начальной  $f_1$  и конечной  $f_2$  стрелы изгиба и времени, между проходами для расчета величины продольной силы, действующей в рельсовой плети. Опасными местами в бесстыковом пути являются прежде всего напряжённые неровности, отличительным признаком которых является рост стрелы изгиба во времени под действием продольной силы [26]. Описанный выше метод контроля рельсовых плетей и определения опасных мест в бесстыковом пути рекомендован нормативными документами [4].

Однако, ни одна из применяемых систем контроля устойчивости бесстыкового пути не может обеспечить безопасность движения поездов в случае, если будет допущена «потеря» температуры закрепления рельсовых плетей. Значительно проще обеспечить сохранность установленной температуры закрепления рельсовых плетей, имеющих длину равную перегону и более [27]. Большой объём затрат труда по обслуживанию уравнивательных пролётов может после их ликвидации быть сосредоточен на содержании промежуточных рельсовых скреплений, что в свою очередь, снижает вероятность возникновения угона рельсовых плетей. В.М. Ермаковым [28] была изучена экономическая составляющая вопроса, было выяснено, что при сварке блок-участков в рельсовые

плети длиной до перегона экономический эффективность возрастает практически в два раза [28].

На фактическую температуру закрепления рельсовых плетей оказывает влияние технология их ввода в установленный температурный режим, устройства применяемые для этой цели, а также для восстановления целостности рельсовых плетей сваркой. Однако существующие рекомендации по принудительному вводу рельсовых плетей в установленный температурный режим и сварке рельсов при низких температурах в большой степени зависят от погонного сопротивления, имеющего значительную дисперсию [29]. В случае принятия в расчёт завышенного значения погонного сопротивления при производстве данных работ могут быть допущены ошибки, в результате которых, реальная температура закрепления будет отличаться от записанной в Журнале учёта службы и температурного режима.

## **1.2 Выводы по первой главе**

Сохранение необходимого температурного режима работы бесстыкового пути обеспечивается погонным сопротивлением балласта (вдоль и поперёк), силой прижатия рельса к шпале и ограничением максимальной величины продольной силы, действующей в рельсовой плети за счёт температуры закрепления. Поскольку погонное сопротивление является случайной величиной с большим значением дисперсии, одной из задач диссертационного исследования является определение и оценка минимальных и максимальных значений погонного сопротивления, принимаемых в расчётах бесстыкового пути. В опытной оценке также нуждается влияние различных факторов на величину сопротивления шпал в балласте. Температура закрепления достаточно надёжно обеспечивает устойчивость бесстыкового пути при его эксплуатации и ремонте, в случае, если рельсовые плети имеют длину не менее перегона. Однако в последние десятилетия наблюдается значительный рост числа мест временного восстановления рельсовых плетей, снижающий эффективность и безопасность бесстыкового пути. Этим обусловлена постановка следующей задачи диссертационного исследования – создание способа сварки при температурах ниже температуры закрепления

рельсовых плетей, позволяющего производить их восстановление и удлинение при минимальных трудовых и финансовых затратах.

Поскольку установленный температурный интервал закрепления рельсовых плетей должен с одной стороны обеспечивать возможность проведения путевых работ при относительно высоких температурах без потери устойчивости, а также устойчивость в процессе эксплуатации бесстыкового пути, с другой стороны – не допускать раскрытия зазора в стыках, опасного для движения поездов, и излома рельсовых плетей в период низких температур одной из задач исследования является определение границ интервала закрепления плетей в зависимости от климатических условий.

## **2 ПОГОННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ БАЛЛАСТА ПРОДОЛЬНОМУ СДВИГУ ШПАЛАМИ И МЕРЫ ПО ЕГО ПОВЫШЕНИЮ**

### **2.1 Исследования погонного сопротивления балласта сдвигу шпалами**

Одно из первых документальных упоминаний о железнодорожном пути со сварными стыками относится к 1896 г. и связано с именем инженера И.Р. Стецевича [30]. Развитию конструкции бесстыкового железнодорожного пути на начальном этапе его развития в СССР способствовали труды К.Н. Мищенко [31], признанного в нашей стране родоначальником науки о бесстыковом пути, и М.С. Бочёнкова [32], которым с 1948 по 1950 годы был реализован проект по укладке и опытной эксплуатации конструкции пути с «саморазрядкой температурных напряжений» на действующем участке Томской дистанции при высокой грузонапряженности. На деревянные шпалы с надорванными костылями и отсутствующими противоугонами были уложены рельсовых плети с уравнительными приборами на концах, выполненными из остяков стрелочных переводов. Середина рельсовых плетей закреплялась клиновыми противоугонами к массивной железобетонной плите, предварительно уложенной под балластом. Для компенсации воздействия на рельсовые плети сил угона была применена конструкция пружинного возвращающего устройства, выполненного из ряда вагонных цилиндрических пружин, расположенных по обеим сторонам каждой из рельсовых нитей [32]. Данная конструкция в процессе эксплуатации показала себя достаточно сложной и ненадёжной: невозможно было гарантировать полное возвращение угоняемых рельсовых плетей. Впоследствии М.С. Бочёнков в ходе проведения сравнительных испытаний пути с саморазрядкой температурных напряжений и пути температурно-напряженной конструкции высказался в пользу последнего [32].

В те годы Е.М. Бромбергом была предложена конструкция бесстыкового пути температурно-напряженного типа с периодической сезонной разрядкой напряжений. В СССР начинается активный этап изучения погонных сопротивлений.

Сопротивление балласта сдвигу шпалами в значительной степени влияет на устойчивость бесстыкового пути, поскольку является одной из основных реактивных сил, противодействующих активной продольной температурной сжимающей силе [33].

Изучением вопросов сопротивления балласта продольному и поперечному сдвигу железобетонными и деревянными шпалами в разные годы занимались М.Г. Андреевский [34], П.Ф. Исаков [35], М.Т. Членов [36], В.Г. Альбрехт [14], М.С. Боченков [32], Е.М. Бромберг [8], М.Ф. Вериго [37], Н.П. Виногоров [38], В.В. Ершов [39], Н.Б. Зверев [5], М.А. Маркарьян [5], Н.С. Чирков [40], А.Я. Коган [41], Л.Г. Крысанов [42], В.О. Певзнер [43], В.В. Серебренников [44], В.И. Новакович [45], Г.Л. Аккерман [46], Г.В. Карпачевский [47], В.В. Карпачевский [9], Е.В. Корниенко [48], Н.В. Рессина [49], В.Я. Клименко [50] и другие. За рубежом данный вопрос в большей степени изучался в середине 20 века О. Амманом, Ф. Бирманом, Ф. Раабом, А. Прюддомом, Э. Немешди [51], К. Грюневальдтом [52], И. Ваттманом [53] и другими.

Расчетом бесстыкового пути используется три вида сопротивлений перемещению рельсов: сопротивления перемещению рельсов в стыковых накладках; погонные сопротивления (т.е. сопротивления балласта сдвигу шпалами) и сопротивление повороту рельсов в горизонтальной плоскости относительно оси шпал. Основные исследования были направлены на изучение погонных сопротивлений, оказывающих большее влияние, поскольку в бесстыковом пути в условиях длительной эксплуатации сопротивление в стыковых накладках в расчетах может не учитываться [54]. Обеспечение сопротивления промежуточных скреплений повороту рельсов относительно шпал на практике оказывается невозможным, так как рельс в промежуточном рельсовом скреплении любого типа имеет люфт, необходимый для укладки рельсов в кривых участках пути, а сила прижатия рельса к шпале в процессе длительной эксплуатации может падать до нуля.

В СССР опыты по определению сопротивления балласта сдвигу шпалами, а также поиск оптимального способа и методик измерений начали проводиться с

середины 1950-х годов [5]. Первоначально для получения опытных значений сопротивления шпал в балласте применялись гидравлические устройства типа РН-01, передающие продольное сдвигающее усилие на целое звено. Пара гидравлических устройств устанавливалась в предварительно разобранных рельсовых стыках. Одно из звеньев при этом выполняло роль упора, анкера, усилием же гидравлических разгонных устройств производился сдвиг испытываемого звена. Перемещения шпал в балласте определялись при помощи предварительно установленных мессур. На время проведения экспериментальных исследований участок железнодорожного пути закрывался для движения поездов. В дальнейшем было принято решение отказаться от методики определения сопротивления балласта путём сдвига звена рельсошпальной решетки в связи с трудоёмкостью и необходимостью проведения больших подготовительных и заключительных работ [5]. Было решено проводить изучение сопротивления сдвигу отдельных шпал, а затем полученные результаты относить их к единице длины пути [5]. С этого момента термин «погонное сопротивление» принял известное значение – сопротивление балласта сдвигу шпалами, хотя некоторое время под погонным сопротивлением понималось ещё и сопротивление промежуточных рельсовых скреплений перемещению рельсовых плетей. Подход к определению погонного сопротивления путём проведения сдвига отдельных шпал применяется и в настоящее время.

Опыты по определению сопротивлений одиночных железобетонных шпал проводились лабораторией бесстыкового пути ВНИИЖТ на Белорусской железной дороге, где в качестве экспериментальных устройств применялись четырехтонные гидравлические прессы [5]. Сдвигающее усилие, создаваемое ими, рассчитывалось исходя из показаний манометра. Для сдвига шпалы вдоль оси пути гидравлические прессы устанавливались в шпальных ящиках внутри рельсовой колеи, одна из шпал при этом служила анкером. При сдвиге поперёк оси железнодорожного пути гидравлический домкрат упирался в балку, зацепляемую за подошву рельса (рисунок 2.1).

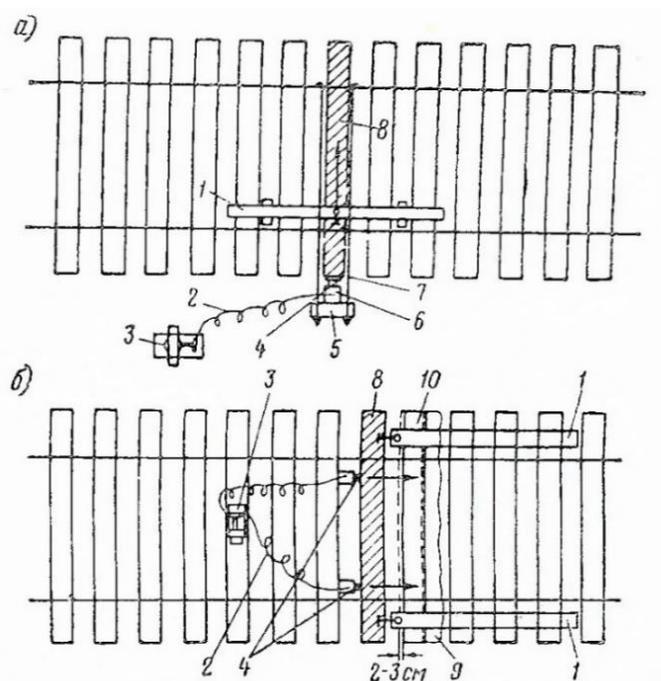


Рисунок 2.1 – Схемы гидравлических устройств для определения сопротивления шпалы сдвигу: а) поперёк оси пути; б) вдоль оси пути [5]

При работе с гидравлическими домкратами отмечалась невозможность определения с достаточной точностью усилия, передаваемого на шпалу, по показаниям манометра, поскольку часть давления масла в системе домкрата уходила на преодоление начального сопротивления плунжера, имели место потери в шлангах [5]. По этой причине в результате первых исследований, был сделан вывод о наличии начальных сопротивлений балласта сдвигу шпалы, опровергнутый в ходе дальнейших наблюдений.

При анализе проведенных лабораторией бесстыкового пути ВНИИЖТ экспериментов был сделан ряд выводов и методических рекомендаций. В частности, решено было отказаться от применения в опытах гидравлических устройств, заменив их силомерами, передающими усилие на шпалу от специальных тарированных цилиндрических пружин [5]. Одним из первых устройств был пружинно-винтовой силомер конструкции инженера Н.А. Смирнова (рисунок 2.2), предназначенный для сдвига шпал в поперечном оси пути направлении.



Рисунок 2.2 – Устройство инженера Н.А. Смирнова [5]

Принцип действия заключался в следующем: специальная сварная рама одним концом упиралась в рельс, а другим концом, где были установлены стальные тарированные пружины, упиралась в торец шпалы. Шпала предварительно освобождалась от подкладок промежуточного скрепления. При затягивании гаек устройства стальные пружины сжимались и передавали усилие на торец испытываемой шпалы. Величина прикладываемого усилия определялась деформацией пружин, измеряемой металлической линейкой с точностью 0,5 мм. Преимуществом таких устройств перед гидравлическими является то, что усилие при перемещении шпалы ослабевает незначительно. Пружинно-винтовой силомер позволял моделировать смещение шпалы в действующем пути не в полной мере, поскольку при его использовании на шпале демонтировалось промежуточное рельсовое скрепление и между рельсом и шпалой возникал зазор, препятствующий передаче динамического воздействия от проходящего подвижного состава на шпалу и балласт под ней.

М.Т. Членовым [55] на основании ряда опытных данных были предложены следующие значения сопротивления продольному смещению шпал: при слежавшемся песчаном балласте 600-700 кГс на шпалу, при слежавшемся щебёночном 800-1000 кГс на шпалу. В пересчёте на погонное сопротивление эти величины составляли 11,0-12,9 кН/м и 14,7-18,4 кН/м.

Е.М. Бромбергом [37] в результате опытов были получены максимальные значения погонного сопротивления для двух рельсовых нитей (таблицы 2.1, 2.2).

Таблица 2.1

Количество шпал на 1 км	Максимальное погонное сопротивление в кГс/см для двух нитей	
	Щебень	Песок
1600	8,0	5,6
1840	9,2	6,4
2000	10,0	7,0

Таблица 2.2

Количество шпал на 1 км	Погонное сопротивление перемещению поперёк пути в кГс/см для двух нитей	
	Щебень	Песок
1600	8,3	5,7
1840	9,3	6,5
2000	10,0	7,0

В результате экспериментов по определению погонных сопротивлений, проводившихся на Закавказской, Октябрьской и Донецкой железных дорогах лабораторией бесстыкового пути ВНИИЖТ были получены зависимости погонных сопротивлений продольным и поперечным перемещениям для деревянных и железобетонных шпал, представленные в виде графиков (рисунок 2.3) [5].

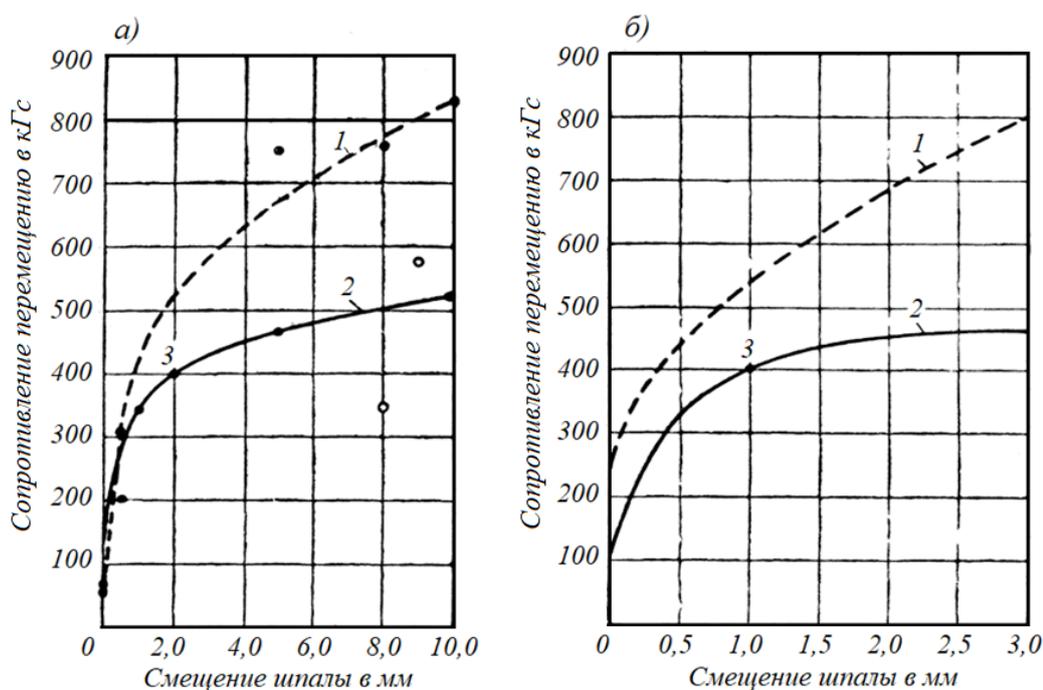


Рисунок 2.3 – Графики сопротивлений перемещениям шпал при обычном профиле балластной призмы [5]: а – деревянных; б – железобетонных; 1– вдоль пути; 2 – поперек пути; 3 – критическая точка

В сборнике научных трудов ВНИИЖТ [5], в котором достаточно большой объём был посвященному вопросу погонных сопротивлений, на основании опытных зависимостей было отмечено, что сопротивления продольным и поперечным перемещениям в щебёночном балласте деревянных и железобетонных шпал практически одинаковы, поскольку «большой вес железобетонных шпал компенсируется большим сцеплением деревянных шпал со щебнем». Также отмечалось, что наибольшее влияние на погонное сопротивление оказывает трение и сцепление подошвы шпалы о балласт [5], а основным путём повышения погонного сопротивления является повышение веса путевой решетки и, ссылаясь на исследования К. Циммермана, придание нижней постели железобетонных шпал рифлёной формы. В сборнике [5] были приведены опытные значения погонных сопротивлений, полученные отечественными учёными: В.В. Григорьевым, М.Т. Членовым, С.Н. Поповым и зарубежными учёными – О. Амманом, К. Грюневальдтом, Р. Рубином, Г. Мейером, Ф. Раабом, Ф. Бирманом.

Осреднённой величиной погонного сопротивления было принято значение 13 кН/м на 2 рельсовые нити. Позднее в результате аппроксимации графиков, полученных лабораторией бесстыкового пути ВНИИЖТа, средняя величина погонного сопротивления была скорректирована и составила 10 кН/м [56]. Отмечалось [57], что во время прохода подвижного состава по участку железнодорожного пути погонные сопротивления на нём снижаются и составляют 0,75-0,5 от их статических значений. Для учёта реального воздействия подвижного состава на путь нужно использовать в расчетах величину погонного сопротивления щебня продольным перемещениям шпал в щебёночном балласте с учётом воздействия проходящих поездов.

Опыты показали, что результаты измерений погонных сопротивлений щебёночного балласта перемещениям шпал имеют большую дисперсию [58]. Средние значения погонных сопротивлений продольному  $r$  и поперечному сдвигу  $q$  в балласте не могут приниматься в расчётах бесстыкового пути в связи с тем, что тогда в половине случаев, где  $r$  и  $q$  меньше среднего, устойчивость пути не будет

обеспечена, в то время как при  $r$  и  $q$ , превышающих среднее значение, потребуется большая сила для сдвига рельсошпальной решетки при ремонтах пути. Возникает необходимость применения в одних условиях минимальных значений погонного сопротивления балласта перемещениям шпал, а в других – максимальных. Минимальные значения погонного сопротивления необходимо применять в расчетах устойчивости бесстыкового пути, а максимальные использовать для расчета необходимой для сдвига рельсошпальной решетки силы во время проведения ремонтных работ [59].

Было разработано устройство для определения сопротивлений шпал продольным перемещениям пути [60], основным отличием которого от гидравлических приборов и некоторых пружинных силомеров являлась универсальность применения для определения статических и динамических погонных сопротивлений сдвигу. Достигалось это следующим образом: на шпале, которую сдвигали смоделированной с помощью сжатия пружин устройства продольной силой, не снимали подкладок промежуточного скрепления, а лишь ослабляли затяжку клеммных болтов. В результате этого, при проходе подвижного состава испытываемая шпала также, как и другие, проседала под колесными парами и поднималась в межтележечном пространстве, но в тоже время имела возможность продольно перемещаться под действием искусственно созданной силы [61]. Усилие, передаваемое устройством на шпалу, при проходе подвижного состава и подвижке шпалы снижалось незначительно (не более 5%) за счёт относительной мягкости пружины, что позволяло с достаточной точностью моделировать воздействие продольной силы, передаваемой от рельсовых нитей на шпалу [60]. Устройство обладало более высокой эксплуатационной надёжностью по сравнению с аналогами, благодаря тому, что полый винт и стержень соединялись с упорами шарнирно для исключения неблагоприятного воздействия изгибающих моментов. Оснащение индикаторами часового типа повышало точность проводимых измерений до 0,01 мм (рисунок 2.4).

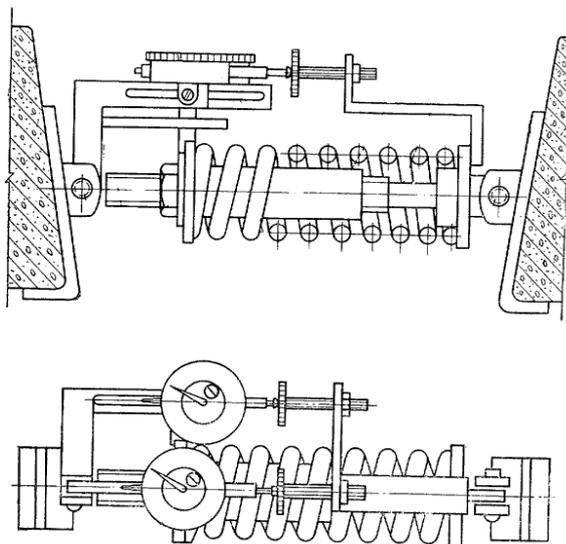


Рисунок 2.4 – Устройство для определения сопротивлений шпал продольным перемещениям пути [60]

При помощи данного устройства и его аналогов были получены величины погонных сопротивлений железобетонных шпал и стрелочных брусьев как в статических условиях, так и в условиях динамики действующего железнодорожного пути [47]. При определении погонных сопротивлений на Ростовской дистанции пути были получены соотношения средних величин сопротивлений железобетонных брусьев длиной 4 и 5 м, и типовой железобетонной шпалы [47], [62]. Было установлено, что если принять сопротивление балласта сдвигу вдоль оси пути типовой железобетонной шпалы за единицу, то сопротивление сдвигу железобетонного стрелочного бруса длиной 4 м составит 1,75, а бруса длиной 5 м – 2,5. Иначе сопротивление балласта сдвигу железобетонного бруса длиной 5 м вдоль оси пути в 2,5 раза больше сопротивления сдвигу железобетонной шпалы [62].

Были разработаны также специальные устройства [63], позволяющие проводить эксперименты по определению сопротивления балласта поперечному сдвигу шпалами с учётом воздействия поездов (рисунок 2.5, 2.6).

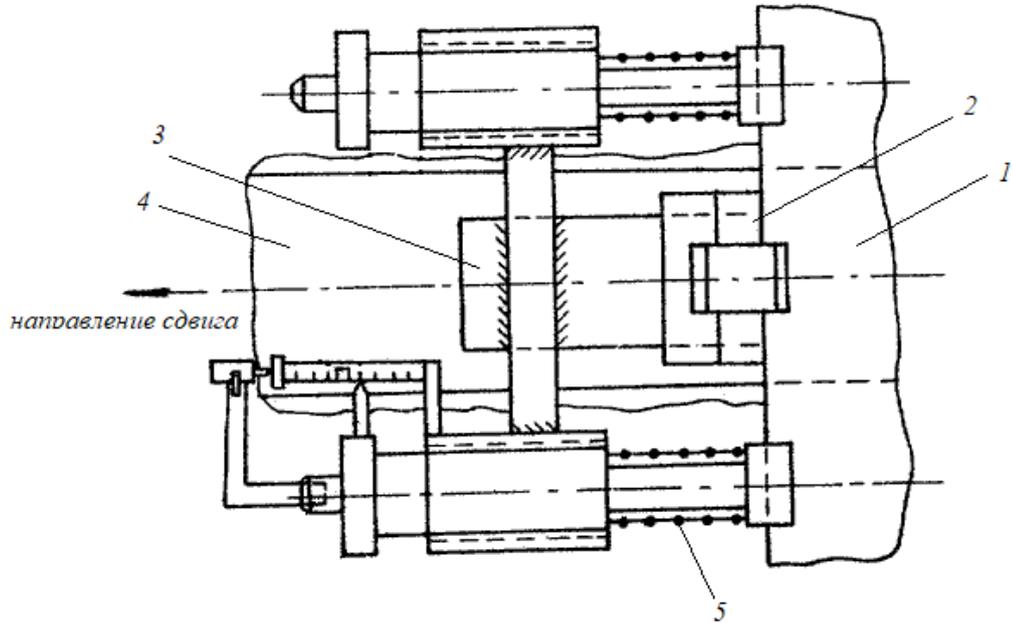


Рисунок 2.5 – Устройство для определения погонного сопротивления сдвигу шпалы поперёк оси пути: 1 – рельс, 2 – верхняя часть подкладки, 3 – нижняя часть подкладки, 4 – шпала, 5 – цилиндрическая тарированная пружина.

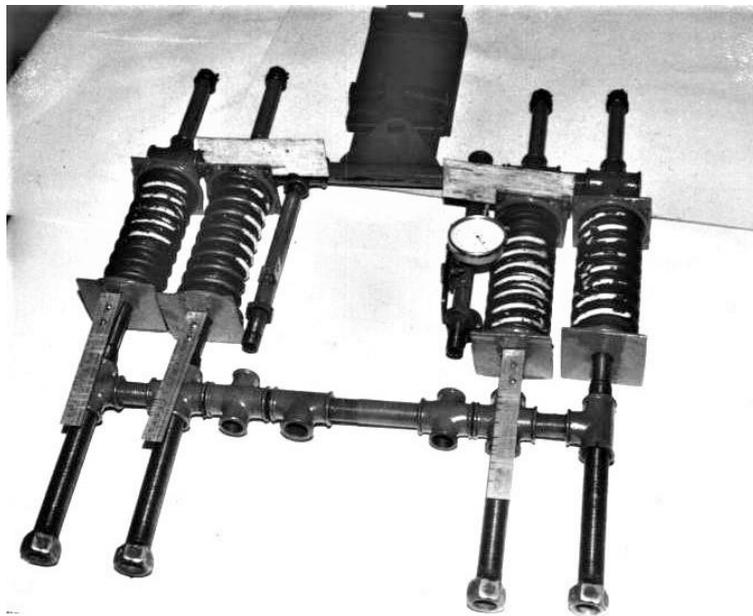


Рисунок 2.6 – Общий вид устройства для определения погонного сопротивления сдвигу шпалы поперёк оси пути

Особенностью устройства является специальная подкладка промежуточного скрепления. Она монтируется на сдвигаемой шпале вместо типовой и состоит из

двух частей. Верхняя часть подкладки соединяется с рельсом, а нижняя со шпалой, при этом обе части могут свободно перемещаться относительно друг друга в поперечном направлении. Устройство прикреплялось к шпале через данную подкладку и, упираясь в рельс, передавало на неё усилие сжатия пружин. Погонное сопротивление, как и в других пружинно-винтовых устройствах определялось расчётом после измерения величины сжатия пружин, характеризующего сдвигающую силу, перемещения шпалы под действием этой силы и времени [61]. Благодаря указанным особенностям, новое устройство для опытного определения сопротивления перемещению шпалы поперек оси пути учитывало воздействие проходящих во время исследования поездов.

Аналог данного устройства был применён при экспериментальном определении погонных сопротивлений сдвигу железобетонных стрелочных брусьев поперёк оси пути на Ростовской дистанции пути [47]. В результате было установлено, что железобетонный стрелочный брус длиной 4 м имеет в 2 раза большее сопротивление, а брус длиной 5 м – в 3 раза большее сопротивление поперечному сдвигу, чем типовая железобетонная шпала [62].

Позднее были разработаны более совершенные устройства, оснащаемые лентопротяжными самописцами перемещений для длительного наблюдения за перемещениями шпал под действием заданной сжатием пружин постоянной силы [64]. Была разработана также новая методика проведения опытов по определению погонных сопротивлений балласта, позволяющая более точно моделировать действие продольной силы, передаваемое на шпалы [39].

Прежняя методика определения сопротивления балласта сдвигу шпалой поперёк оси пути [5] включала в себя:

- Снятие со шпалы подкладок промежуточного скрепления;
- Нагружение шпалы нагрузкой, соответствующей массе рельса и промежуточных скреплений;
- Приложение к торцу шпалы возрастающей по ступеням статической нагрузки с помощью домкратов;

- Измерение перемещений шпалы, соответствующих ступеням статической нагрузки, и определение зависимости от неё.

По полученной зависимости значение погонного сопротивления определялось по величине допускаемого перемещения шпалы.

В качестве приборов, применяемых для определения погонного сопротивления балласта по методике [40] применялись и применяются в настоящее время устройства на основе гидравлических [65], [66] (рисунок 2.7) и винтовых домкратов [67], [68] (рисунок 2.8).



Рисунок 2.7 – Определения сопротивлений шпал поперечным перемещениям пути гидравлическим прибором [66]



Рисунок 2.8 – Устройство для определения сопротивлений шпал поперечным перемещениям пути [67]

Недостатком прежней методики определения сопротивления шпал считалось отсутствие передачи вибрационных воздействий рельсошпальной решетки на балласт от проходящего подвижного состава [39]. Кроме того, сопротивление шпалы в прежней методике зависело от величины сдвигающей силы, значение которой принималось методом экспертной оценки, но без достаточного обоснования. Полученные по прежней методике величины погонного сопротивления с некоторой точностью могли описать сопротивление щебня в условиях малодеятельного пути или ремонтируемого участка, по которому не производится движение поездов.

При обработке материалов исследований сопротивления шпал при постоянной нагрузке вдоль оси пути с учетом воздействия подвижного состава отмечалось [39], что без воздействия поездов шпала оставалась неподвижной, а во время прохождения поезда происходило её перемещение.

При помощи устройств [60], [63] по разработанной методике экспериментального определения сопротивления шпал сдвигу поперёк оси пути [39] были проведены опыты при различной грузонапряженности, различных значениях сдвигающей силы (эквивалентной погонному сопротивлению), показавших, что перемещение шпалы под действием приложенной постоянной силы происходит только во время прохождения подвижного состава. Данный процесс виден на фрагментах записи самописцев перемещений, имеющих вид ступенчатой ломаной линии (рисунок 2.9).

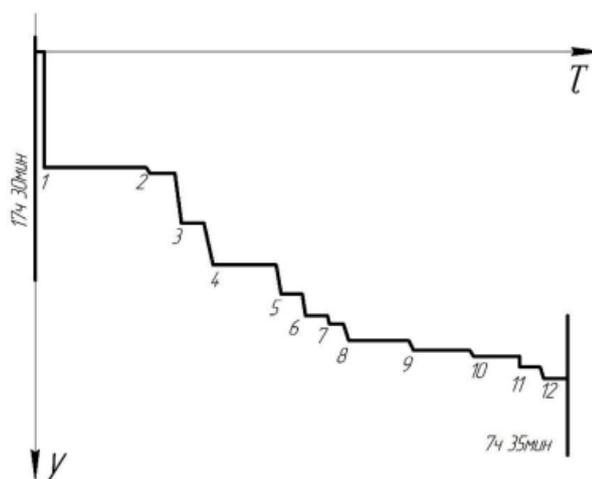


Рисунок 2.9 – Фрагмент записи самописца поперечных перемещений шпалы [39]

Была установлена зависимость между частотой прохождения подвижного состава и перемещением шпалы, при этом сопротивление возрастало пропорционально скорости деформации, что характерно для материалов, обладающих вязкими свойствами [39]. В этом состояло отличие от упругой модели, в которой погонное сопротивление прямо пропорционально деформации, а влияние воздействия поездов на сопротивление шпал в балласте рассматривалось положительным, поскольку повышало силу трения дополнительной массой.

Учёт вязких свойств балласта стал одним из основополагающих принципов нового раздела науки о железнодорожном пути – реологии бесстыкового пути [69], [70]. Сущность данного раздела заключается в учёте при расчётах железнодорожного пути фактора времени, его теоретической базой является теория ползучести [71], [45]. В теории ползучести силы сопротивления представляются в виде вязких элементов, подчиняющихся закону вязкости Ньютона [72]. Закон вязкости для бесстыкового пути, деформируемого вдоль оси пути, записывается как:

$$r = K \cdot \dot{\lambda}, \quad (2.1)$$

где:  $K$  – коэффициент вязкости балласта при смещении шпалы вдоль оси пути в определённых условиях, Н·с/м<sup>2</sup>.

$\dot{\lambda}$  – скорость перемещения шпалы вдоль оси пути, м/с.

Закон вязкости для бесстыкового пути, деформируемого поперёк оси пути, записывается как:

$$q = \xi \cdot \dot{y}, \quad (2.2)$$

где:  $\xi$  – коэффициент вязкости балласта при смещении шпалы поперёк оси пути в определённых условиях, Н·с/м<sup>2</sup>.

$\dot{y}$  – скорость перемещения шпалы поперёк оси пути, м/с.

Коэффициент вязкости балласта, сдвигаемого шпалами – это усилие, необходимое для перемещения шпалы на единицу длины за единицу времени [73]. Коэффициент вязкости в данном случае зависит от грузонапряженности участка

пути, степени уплотнения щебня, его влажности, засорённости, а также от климатических условий. В связи с этим, коэффициент вязкости балласта, сдвигаемого шпалами, следует относить к определённым условиям, в которых он был получен [48].

Для определения величины коэффициента вязкости балласта, характеризующего погонное сопротивление щебня сдвигу шпалами с учётом воздействия поездов, проводятся натурные эксперименты с одиночными шпалами в реальных условиях эксплуатации. Экспериментально в действующем пути коэффициент вязкости балласта наиболее удобно определять проведением серии опытов «на ползучесть» или «на релаксацию» [74].

Опыт на ползучесть заключается в передаче на шпалу постоянной во времени силы, эквивалентной некоторому погонному сопротивлению, и фиксации времени и скорости перемещения под воздействием проходящих поездов. Коэффициент вязкости балласта вдоль и поперёк оси пути определяется из отношений:

$$K = \frac{r}{\dot{\lambda}} \quad \text{и} \quad \xi = \frac{q}{\dot{y}} \quad (2.3)$$

Опыт на релаксацию заключается в постоянном и равномерном перемещении шпалы и непрерывном фиксировании величин усилия, необходимого для перемещения шпалы, и времени с последующей подстановкой полученных значений в уравнения (2.3). Ввиду сложности технического оснащения и проведения опытов на релаксацию, их относительно невысокой точности в основном производились опыты на ползучесть [74].

Опытами, проведенными в разное время [39], [74], было установлено, что наиболее близкой к реологической модели шпалы, перемещаемой в балластном слое, из известных является модель Максвелла (рисунок 2.10).



Рисунок 2.10 – Модель Максвелла

Сравнение полученных экспериментальных данных и расчетов, проведенных по модели Максвелла [75], показали, что упругим элементом возможно пренебречь. Математической моделью бесстыкового пути можно считать упругий стержень, находящийся в вязкой среде [76]. В результате проведения опытов при различных грузонапряженности, числе пропущенных осей подвижного состава, значениях эквивалентной погонному сопротивлению силы были получены значения коэффициента вязкости балласта, сдвигаемого шпалами вдоль и поперёк оси пути [39]. При этом, разброс данных, средние значения начального сопротивления имели достаточно малую величину, а минимальные значения – близки к точности измерения, что подтверждает гипотезу о процессе ползучести рельсошпальной решетки поперёк пути при превышении начального сопротивления под действием продольных сжимающих сил в рельсовых плетях.

Определить наличие вязких свойств балласта, сотрясаемого проходящими поездами, опытом на ползучесть возможно только в случае применения устройств, позволяющих длительно воздействовать на шпалу постоянной во времени силой [77]. Обязательной является применение методики проведения исследований, предложенной в [39] или аналогичной, но позволяющей учитывать воздействие проходящих поездов. При соблюдении этих условий можно получить реальные значения величины погонного сопротивления для некоторых фиксированных условий эксплуатации железнодорожного пути. Применение гидравлических приборов [65], [66], винтовых домкратов [67], [68], теряющих усилие при малейшей подвижке шпалы, а также статической методики проведения опытов [5] в экспериментах, учитывающих влияние проходящих поездов и фактор времени, приводит к получению результатов, не отражающих фактическое значение погонного сопротивления в динамике. Применение статических значений погонного сопротивления балласта оправдано только для расчетов железнодорожного пути, по которому временно не обращается подвижной состав (например, во время проведения ремонтных работ) [58].

В [6] отмечен ещё один способ определения коэффициента вязкости балласта, сдвигаемого шпалами, для участка пути при учёте воздействия поездов. Коэффициент вязкости можно определить по изменениям напряженно-деформированного состояния рельсовых плетей во времени и, в первую очередь, по изменению во времени величины продольной силы при известных перемещениях. Был предложен следующий способ: искусственное создание на опытном участке продольной силы (с помощью вкладыша на конце рельсовой плети или путём сварки рельсов методом предварительного изгиба) и последующий точный контроль за происходящими перемещениями. Для этого на участке бесстыкового пути через каждые 20 м сооружались специальные поперечные створы, относительно которых будет производиться отсчет продольных перемещений рельсов (рисунок 2.11) [6].



Рисунок 2.11 – Участок пути с оборудованными через 20 метров створами

Поперечные створы оборудованы специальными свайками, к которым на кронштейнах закрепляются индикаторы часового типа. Отмечалось [6], что для проведения измерений продольных перемещений с точностью 0,01 мм необходимо защитить свайку от динамического воздействия на неё частиц балласта,

сдвигаемого шпалами. Технология следующая: в балласте просверливалось отверстие, в которое забивалась свайка, представляющая собой длинный металлический стержень диаметром 20 мм. После этого на свайку надевалась и забивалась инвентарная труба, имеющая несколько больший внутренний диаметр. На инвентарную трубу надевалась и забивалась обсадная труба, имеющая ещё больший внутренний диаметр, после чего инвентарная труба удалялась, оставляя свободный и равномерный зазор между обсадной трубой и свайкой (рисунок 2.12) [6]. Благодаря этому, перемещения балласта и обсадной трубы практически не влияли на свайку. К подошве рельса против каждой свайки жестко крепится экран, относительно которого ведётся измерение мессурой.



Рисунок 2.12 – Оборудованный створ с индикатором часового типа

Ранее применяемая технология оборудования поперечного створа без обсадной трубы с устройством свайки на обочине земляного полотна (рисунок 2.13) [41] позволяет проводить только статические опыты, поскольку сотрясения железнодорожного пути при проходе поездов приведут к искажению результатов.

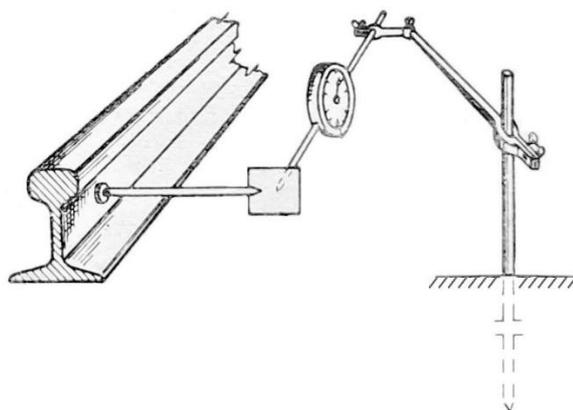


Рисунок 2.13 – Фиксация перемещения рельса с помощью мессуры [41]

Были проведены специальные опыты по определению точности измерений перемещений данной конструкции и определено, что без обсадной трубы при продольных перемещениях от 1 до 10 мм погрешность измерений может составить до 50%, при перемещениях же до 1 мм – до 100% [6].

Для удобства проведения измерений и повышения их точности, вместо индикаторов часового типа могут быть установлены самописцы продольных перемещений или вибрографы.

По опытным данным становится возможным определение реологической константы, называемой коэффициентом относительной вязкости  $N$  [64]:

$$N = \frac{\pi}{2L_0\sqrt{m}} \quad (2.4)$$

где  $m = \frac{\partial \ln(\lambda)}{\partial \tau}$  – скорость изменения  $\ln(\lambda)$

$L_0$  – расстояние от конца рельсовой плети до заданного сечения.

Коэффициент относительной вязкости  $N$  представляет собой, введённую для удобства расчётов величину:

$$N = \sqrt{\frac{K}{E\omega}} \quad (2.5)$$

где  $K$  – коэффициент вязкости балласта вдоль оси пути (Н·с/м<sup>2</sup>);

$E$  – модуль упругости рельсовой стали (Н/м<sup>2</sup>);

$\omega$  – площадь поперечного сечения рельса (м<sup>2</sup>).

Определить коэффициент относительной вязкости можно также по результатам самописцев, фиксирующих суточные измерения перемещений на конечном участке рельсовой плети, а именно по величине запаздывания  $\Delta\tau_i$  (рисунок 2.14):

$$\Delta\tau_i = \tau_{\lambda_0} - \tau_{\lambda_i} = \frac{N \cdot l_i}{\sqrt{2\theta}} \quad (2.6)$$

где  $\theta = \frac{2\pi}{\tau_c}$

$\tau_c = 24$  ч.

$l_i$  – расстояние между самописцами, для которых фиксируется  $\Delta\tau$ .

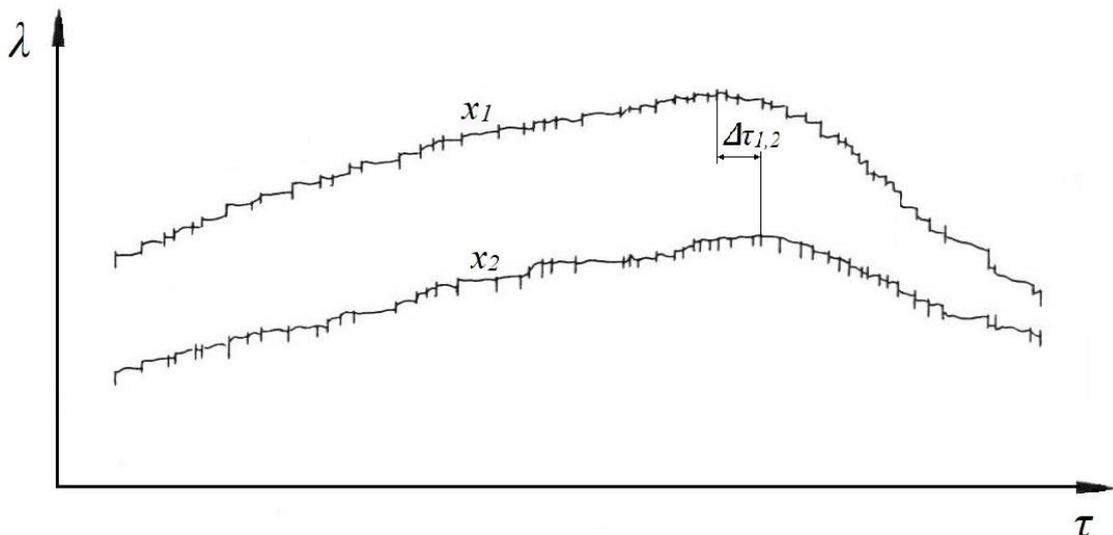


Рисунок 2.14 – Копии диаграмм самописцев, работающих одновременно в нескольких сечениях конечного участка рельсовой плети

По экспериментальным данным о  $\Delta\tau_i$ , достижения максимального перемещения на конце рельсовой плети  $\lambda_{max}$  и в точке  $l_i$  можно вычислить значение коэффициента относительной вязкости:

$$N = \frac{\Delta\tau_i \sqrt{2\theta}}{l_i} \quad (2.7)$$

Результаты экспериментов показали, что закономерности перемещения одиночных шпал, определяемые ранее опытами на ползучесть и релаксацию, подтверждаются и характерны также при исследовании целого участка

бесстыкового пути [64]. Экспериментальное определение коэффициента вязкости с помощью описанных методик достаточно трудоёмко, по сравнению с опытами над одиночными шпалами: с помощью таких опытов можно провести качественную оценку происходящих в бесстыковом пути процессов, в то время как количественную оценку и коррекцию величины коэффициента вязкости проще и удобнее производить путём опытов на ползучесть [64].

## 2.2 Определение максимального и минимального значений погонного сопротивления шпал сдвигу в балласте

В 1968-1975 гг. на действующих участках бесстыкового пути Южной железной дороги проводились [74] достаточно масштабные исследования погонного сопротивления шпал сдвигу в балласте при учёте воздействия поездов, направленные на уточнение его реального значения, а более точно – на определение интервала значений, в котором будет находиться данная величина. В результате были получены зависимости перемещения шпалы от времени при постоянной силе: один из типичных графиков, отражающих опытную зависимость приведен на рисунке 2.15 [74].

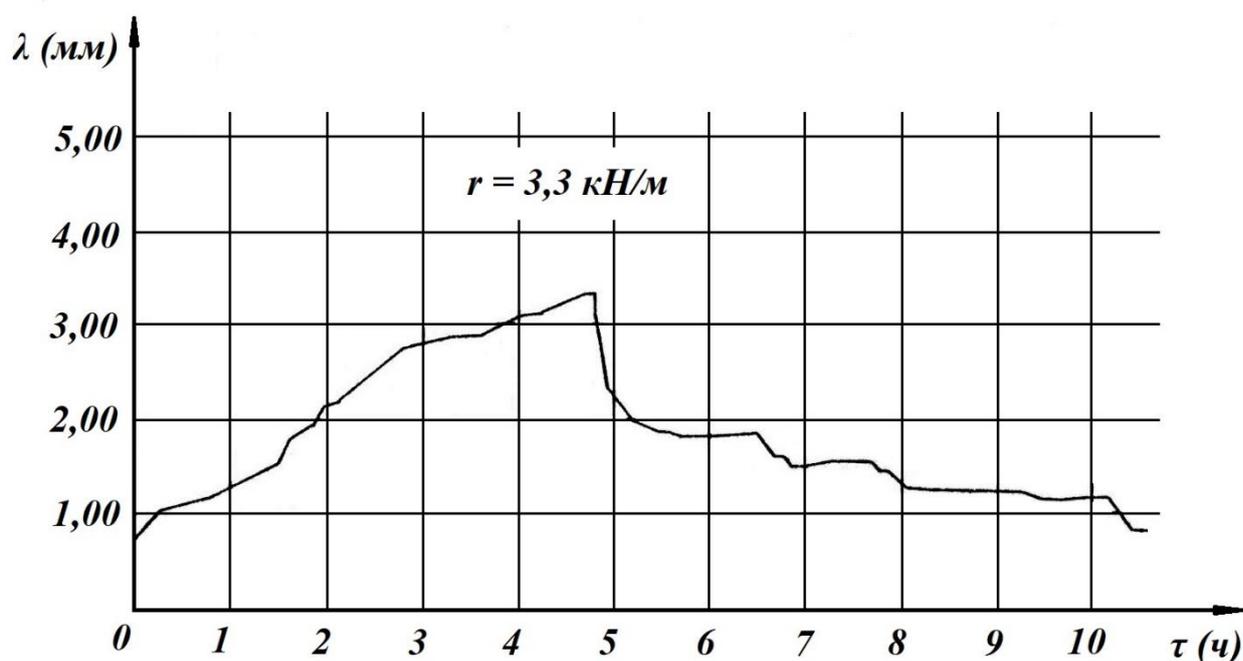


Рисунок 2.15 – Зависимость  $\lambda(\tau)$ , определённая в результате одного из опытов

Как видно из рисунка 2.15, в проведенных опытах присутствует зависимость между деформацией и временем, которая как при сдвиге шпалы в одном направлении, так и в обратном может с некоторой точностью быть представлена в виде прямой линии, характеризующей скорость деформации. Это подтверждает наличие вязких свойств балласта при рассмотрении бесстыкового пути под воздействием поездов во времени. Полученные в результате опытов значения коэффициента вязкости при разной силе можно представить в виде схемы (рисунок 2.16).

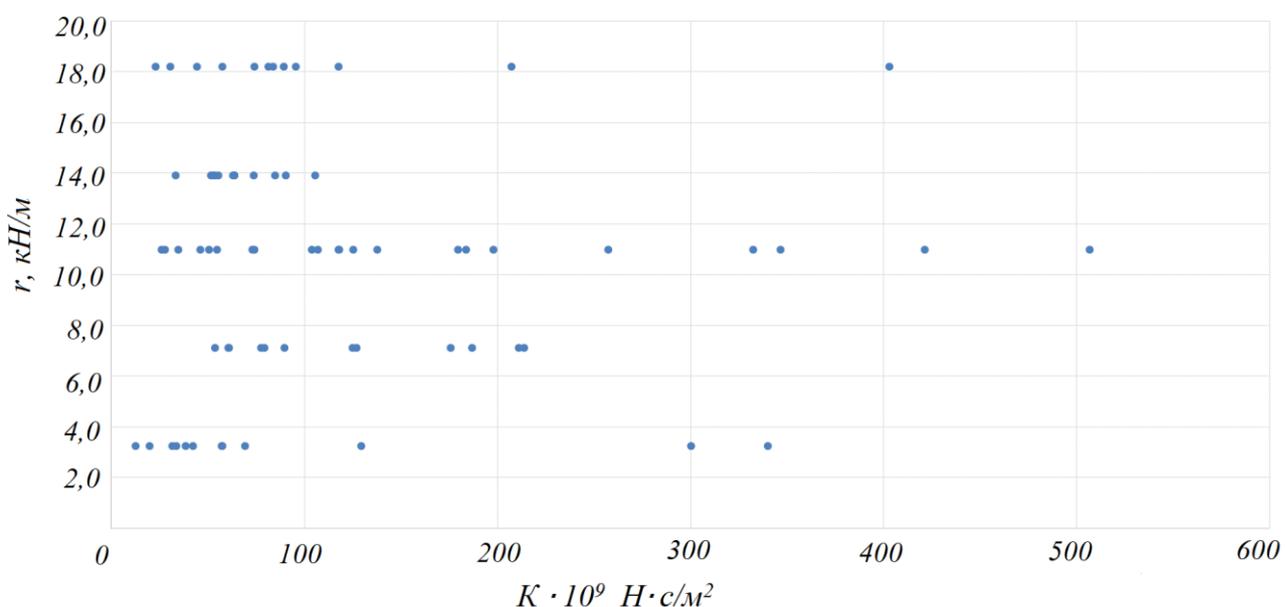


Рисунок 2.16 – Результаты опытов 1968-1975 гг.

Также были определены значения коэффициента вязкости на участке бесстыкового пути непосредственно после проведения ремонтных работ, а также при смёрзшемся балласте [64]. Максимальное значение коэффициента вязкости балласта  $K$  в продольном оси пути направлении составило  $506,8 \cdot 10^9$  Н·с/м<sup>2</sup>, минимальное  $12,3 \cdot 10^9$  Н·с/м<sup>2</sup>. Среднее арифметическое значение  $117,3 \cdot 10^9$  Н·с/м<sup>2</sup>.

С помощью коэффициента вязкости балласта возможно более точное определение силы сопротивления балласта во времени, поэтому предлагалось [78] производить оценку погонного сопротивления по значению коэффициентов вязкости в продольном и поперечном оси пути направлении. Поскольку данные величины имеют достаточно большую дисперсию, но распределение случайной величины нормальное, необходимо определение доверительного интервала, равного среднему значению плюс 3 среднеквадратических отклонения.

Для данных опытов среднеквадратическое отклонение коэффициента вязкости балласта  $K$  составило  $103,9 \cdot 10^9$  Н·с/м<sup>2</sup>, доверительный интервал от значений, близких к точности измерений, до  $429,0 \cdot 10^9$  Н·с/м<sup>2</sup>.

Изучение погонного сопротивления вдоль оси пути при учёте воздействия поездов проводилось и в современных условиях эксплуатации, характеризующихся повышенными осевыми нагрузками, скоростями движения поездов, высокими межремонтными сроками и применением машин для динамической стабилизации пути. Были уточнены максимальные и минимальные значения погонного сопротивления в динамике.

В 2018 году на участке Ростов Главный – Зоосад Ростовской дистанции пути были проведены опыты по определению коэффициента вязкости балластного слоя, сдвигаемого шпалами вдоль оси пути при воздействии поездов (рисунок 2.17). Характеристика участка: бесстыковой путь, середина рельсовых плетей, промежуточное рельсовое скрепление ЖБР-65, грузонапряженность – 40 млн. т.км. брутто, скорость движения поездов: пассажирских – 60 км/ч, грузовых – 40 км/ч.



Рисунок 2.17 – Опытный участок по определению коэффициента вязкости

На шпалу упрощённым аналогом устройства [60] прикладывалось усилие, эквивалентное погонному сопротивлению  $10 \text{ кН/м}$ , при этом после каждого прохода поезда производилось измерение подвижек и фиксация времени. В результате были получены следующие значения коэффициента вязкости (таблица 2.3).

Таблица 2.3 Опытные значения коэффициента вязкости балласта  $K$

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Коэффициент вязкости $\cdot 10^9$ $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$	44,4	57,8	63,3	53,2	145	292,3	81,8	669	144	609	176,8	314,4

Среднее арифметическое значение коэффициента вязкости составило  $220,9 \cdot 10^9 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ , среднеквадратическое отклонение  $209,9 \cdot 10^9 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$  и доверительный интервал от близкого к нулю значения до  $850,7 \cdot 10^9 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ . По данным

проведенных экспериментов можно отметить, что за последние годы отмечается повышение минимального и максимального значения коэффициента вязкости балласта в продольном оси пути направлении. Это может быть связано с совершенствованием технологии подбивки щебёночного балласта и переходом от применения электрошпалоподбоек к механизированной выправке пути.

Для определения и обоснования конкретных максимальных и минимальных значений погонного сопротивления (в статике), которые могут быть использованы при расчётах бесстыкового пути может быть применена известная методика, применяемая для нормально распределённых случайных величин. Методика заключается в применении «правила трёх сигм» – расчёте доверительного интервала, ограниченного  $\bar{x}-3\sigma$  и  $\bar{x}+3\sigma$ , внутри которого находится 99,7% возможных значений случайной величины. Однако, в настоящее время в связи с высокой трудоёмкостью проведения опытов нет достаточного количества статистических данных, т.е. такой генеральной совокупности, при обработке которой доверительный интервал может считаться достоверным результатом не только для всех условий отечественных железных дорог, но даже для отдельного участка пути. В разные годы опыты проводились, как правило, на уплотнённом и сухом щебёночном балласте (при этом степень уплотнения, засорённость и влажность не учитывались). Значительно меньшее число опытов было проведено на рыхлом или смёрзшемся балласте, при этом средние значения определялись при наиболее благоприятных условиях – когда щебёночный балласт сухой и уплотнённый. Указывались значения погонного сопротивления вдоль оси пути: 14,7-18,4 кН/м [55], 9,2 кН/м [37], 13-14 кН/м [5], 10 кН/м [56]. Данные значения приводятся как «средние», поэтому применение их в расчётах бесстыкового пути может привести к погрешностям, в результате которых достаточная надёжность работы пути не будет обеспечена. Если взять за основу наиболее массовые опыты и найденное из них среднее значение [57], то минимальными и максимальными значениями сопротивления железобетонных шпал в балласте вдоль оси пути  $r$  будут являться границы доверительного интервала – 3,3 кН/м и 16,7 кН/м. При этом, средние значения для рыхлого, увлажнённого балласта находятся внутри

данного интервала. При аналогичной подстановке наиболее часто применяемого в расчётах среднего значения сопротивления железобетонных шпал в балласте поперёк оси пути 8,5 кН/м [40], получим минимальные и максимальные значения  $q$  или границы доверительного интервала – 2,5 кН/м и 14,5 кН/м. Более общим будет определение среднего из всех значений погонного сопротивления, полученных в отечественных и зарубежных опытах с расчётом доверительного интервала, где минимальным значением будет являться среднее минус 3 среднеквадратических отклонения, а максимальным – среднее плюс 3 среднеквадратических отклонения, однако в этом случае также не будут учтены весьма возможные и вероятные при эксплуатации железнодорожного пути ситуации в виде увлажнения балласта атмосферными осадками, его загрязнения, временного разрыхления при ремонтных работах и т.д.

Конкретные максимальные и минимальные значения коэффициентов вязкости щебёночного балласта, сдвигаемого шпалами при учёте влияния проходящих поездов определяются в течении длительных наблюдений. Определением функций распределения случайной величины коэффициентов вязкости балласта, сдвигаемого шпалами, на протяжении последних 50 лет занимались В.И. Новакович [64] – вдоль оси пути и В.В. Ершов [39] – поперёк оси пути, однако ввиду высокой трудоёмкости проведения экспериментов (длительность одного не менее продолжительности рабочего дня), высокой дисперсии и недостаточного количества опытных данных в различных условиях эксплуатации пока нет возможности достоверно определить закон распределения случайной величины. На основе анализа проведенных опытов в настоящее время в расчётах пути может применяться максимальное значение коэффициента вязкости щебёночного балласта, сдвигаемого железобетонными шпалами вдоль оси пути  $K = 314,4 \cdot 10^9$  Н·с/м<sup>2</sup> (для участков с низкой грузонапряжённостью) и минимальное значение  $K = 44,4 \cdot 10^9$  Н·с/м<sup>2</sup> (для участков с высокой грузонапряжённостью).

### 2.3 Сопротивление шпал сдвигу в балласте под действием продольных и поперечных сил и анализ возможных мер по его повышению

В настоящее время существует несколько подходов к объяснению механизма и причин перемещения шпал в балластном слое под действием продольных температурных сил, передаваемых на шпалы через узлы промежуточных креплений от рельсов.

Сопротивление балласта продольному и поперечному сдвигу шпалами объясняется комплексом причин, основной из которых является трение подошвы шпалы о частицы щебня, а также сопротивление балласта в шпальных ящиках и у торцов шпал выдавливанию [5], [41]. При прохождении подвижного состава по железнодорожному пути под действием его веса шпалы находятся в жестком контакте со щебёночным балластом под их подошвой и сила трения между ними пропорциональна весу проходящей единицы подвижного состава, согласно закону трения Кулона:

$$F = \mu \cdot N, \quad (2.8)$$

где:  $\mu$  – коэффициент трения скольжения;

$N$  – сила нормальной реакции опоры.

Данная теория получила в своё время широкое распространение в рамках общей математической модели бесстыкового пути, в которой рельс представлялся в виде упругого стержня, находящегося в упруго пластичной среде [41].

Среди факторов, влияющих на величину погонного сопротивления сдвигам, отмечены: степень прижатия рельсов к шпале, расстояние между соседними шпалами, размеры шпал, их вес, качество и фракцию балласта, степень его уплотнения и наличие в нём глинистых частиц, температура воздуха [41].

ВНИИЖТом были проведены эксперименты, в результате которых было установлено, что 94-96% сопротивления поперечному перемещению шпалы оказывает трение её нижней и боковых граней о частицы щебня и лишь 4-6% сопротивления приходится на сдвиг щебня балластной призмы за торцом шпалы

[79]. Ранее указывалось [5], что ширина плеча балластной призмы не оказывает «заметного влияния на сопротивление шпалы... при сдвиге шпалы поперёк оси пути происходит не срез слоя щебня за торцом, а выдавливание клина ограниченной ширины (15-25 см)». При этом на долю сопротивления плеча балластной призмы сдвигу торцом шпалы приходится 5-7% от полного сопротивления поперёк оси пути [5]. На незначительное влияние плеча балластной призмы ввиду выпирания при сдвиге шпалы «клина ограниченных размеров» указывается и в известном издании «Бесстыковой путь» [40]. Стеновыми опытами, проведенными в СГУПС, сопротивление балластной призмы выдавливанию щебня торцом шпалы оценивалось в диапазоне от 6 до 16% [65]. Несколько большие значения были получены в [80], где указывалось следующее соотношение вклада различных факторов в сопротивление шпалы поперёк оси пути: 50% – трение и сцепление балласта по нижней поверхности шпалы, 25% – в шпальных ящиках и 25% – сопротивление щебня сдвигу торцом шпалы. Исследованиями с применением нагрузочного вагона для оценки влияния поперечных сил на устойчивость рельсошпальной решетки было определено [81], что уменьшение ширины плеча балластной призмы с 45 см до 30 см практически не снижает сопротивление железобетонных шпал поперёк оси пути.

Влияние величины уплотнения щебёночного балласта было исследовано в [82], где отмечалось, что сопротивление при сдвиге шпалы вдоль оси пути при повышении плотности балластного слоя в шпальных ящиках с 1320 (рыхлый балласт) до 1750 кг/м<sup>3</sup> увеличилось на 18%, а при уплотнении до 2015 кг/м<sup>3</sup> – возросло ещё на 32%. При сдвиге поперёк оси пути рост сопротивления балласта составил 50 и 80 % соответственно по сравнению с неуплотнённым щебнем [82].

Влияние влажности балласта было исследовано в [83], где отмечалось, что при повышении влажности балластной призмы с 34% до 91% сопротивление щебня вдоль оси пути снижается на 22%, а поперёк оси пути на 17%.

В процессе длительного наблюдения за бесстыковым путём [39], [41] было замечено, что продольное и поперечное перемещения шпал под действием продольной силы прямо пропорциональны интенсивности движения подвижного

состава по этому участку. Данная зависимость отражена в работах [64], [39], [6] на графиках, полученных по экспериментальным данным.

Объяснялось это обратным прогибом рельсов, происходящим в свободном пролете между тележками экипажа и за ними. Обратный прогиб вызывает кратковременное локальное «поднятие» шпал, находящихся в данный момент времени в свободном пролёте, и приводит к потере их сцепления с частицами щебня. Сдвигу в этот момент сопротивляется щебень, уложенный в шпальных ящиках и за торцом шпал.

Достаточно распространено мнение [84], [12] о недостаточности сопротивления балласта продольным и поперечным перемещениям типовых железобетонных шпал и необходимости его дополнительного повышения. Без введения дополнительных мероприятий, согласно данному подходу получается, что бесстыковой путь может быть опасен и не должен применяться если нет полной уверенности в повсеместном и обязательном выполнении на дистанциях пути дополнительных требований по увеличению погонных сопротивлений перемещениям шпал в щебёночном балласте [85]. Такие требования были введены в Инструкциях [86] и [4]. Обеспечения более высокого сопротивления сдвигу считалось возможным добиться, повысив сцепление нижней и боковых граней шпалы с щебёночным балластом, увеличив плечо балластной призмы [87]. Предлагалось также существенное повышение массы шпал для минимизации их поднятия при обратном прогибе рельсов и увеличения сил трения, омоноличивание балластной призмы полимерными связующими [88].

ВНИИЖТом были разработаны железобетонные шпалы ШСТ-1 с целью повышения сопротивления рельсошпальной решетки поперечному сдвигу. Данные шпалы имели на 24% большую опорную площадь относительно типовых, однако из-за существенного повышения их массы (на 32% тяжелее типовых железобетонных) и невысокой эффективности (повышение сопротивления сдвигу в балласте не более 20% в сравнении с типовыми шпалами) применения на железных дорогах они не получили [42]. Учитывая повышенные характеристики сопротивления поперечному сдвигу двухблочных шпал, позднее ВНИИЖТ

разработал железобетонные шпалы Ш1-02. Особенностью конструкции Ш1-02 является сохранение преимуществ шпалы типа ШСТ-1 при уменьшении ширины и площади поперечного сечения её средней части. При проведении испытаний на Экспериментальном кольце было установлено, что сопротивление шпалы Ш1-02 сдвигу поперёк оси пути больше, чем у стандартной железобетонной шпалы ШЗ [42] (рисунок 2.18).

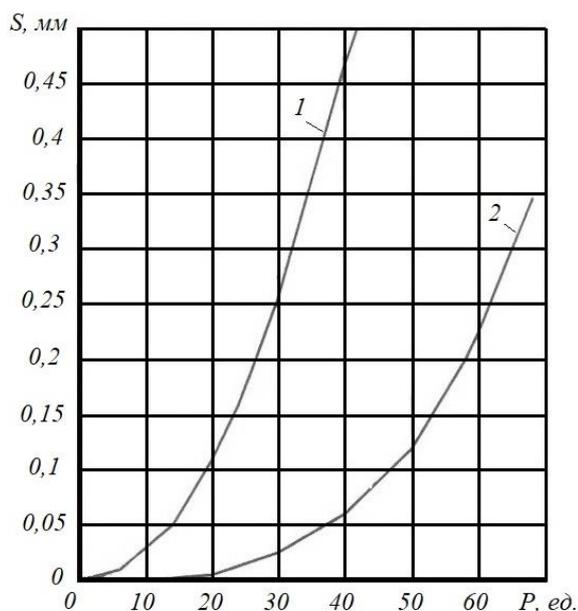


Рисунок 2.18 – Сопротивление поперечному сдвигу 1 – стандартной железобетонной шпалы, 2 – тяжелой шпалы Ш1-02 [42]

Замена проволочной арматуры на стержневую позволила ещё больше уменьшить поперечное сечение средней части шпалы и одновременно увеличить ширину подрельсовых частей, не утяжеляя её [42]. Конструкция получила название ШЗ-ДУ (рисунок 2.19).

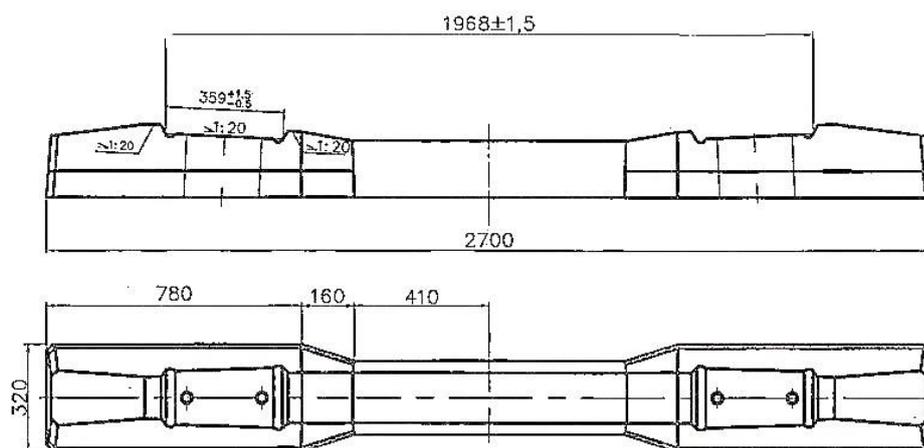


Рисунок 2.19 – Шпала ШЗ-ДУ

Была разработана и более совершенная модификация шпалы ШЗ-ДУ, обладающая лучшими эксплуатационными характеристиками [49]. Однако среднее сопротивление поперечному сдвигу в балласте новой шпалы ШЗ-ДКУ в результате испытаний только на 9-11% превысило аналогичное значение для типовых железобетонных шпал [49]. Данные шпалы были рекомендованы [4] к применению на участках бесстыкового пути с значительными годовыми амплитудами температур и сложными условиями эксплуатации (кривыми малого радиуса), однако широкого применения не нашли.

Подобные конструкции тяжелых шпал, направленные на повышение сопротивления продольному и поперечному сдвигу разрабатывались и за рубежом. Наиболее известными из них являются шпалы типа В75 массой 380 кг и В90 (330 кг). Шпалы типа В75 имеют увеличенную ширину подрельсовых частей (330 мм) и длину 2800 мм. В [89] было отмечено, что шпалы В75 при нормативном содержании пути «гарантированно исключают выброс пути» на участках, где обращается подвижной состав, дополнительно нагревающий рельсы вихретоковым тормозом, однако ссылок на конкретные значения не приводится.

Вопросом является также оценка влияния формы шпалы на её сопротивление в балласте вдоль и поперёк оси пути. Ещё на начальных этапах развития бесстыкового пути был поднят вопрос о повышении не только и не сколько

погонного сопротивления, но и рамности рельсошпальной решетки [74]. Известны конструкции рамных железобетонных шпал [90], шпал Y-типа [91] (рисунок 2.20).



Рисунок 2.20 – Металлические шпалы Y-типа

Данные шпалы по сравнению с типовыми железобетонными имеют значительно большее сопротивление поперечному сдвигу за счёт раздвоения. Трёхточечное крепление рельса исключает поворот шпал и существенно повышает жесткость рельсошпальной решетки.

В некоторых конструкциях Y-образные шпалы дополнительно соединяются между собой общими подрельсовыми подкладками образуя единую рамную систему железнодорожного пути. Материалом для большинства типов подобных шпал служит сталь, однако на сегодняшний день созданы и образцы из армированного стекловолокном полиуретана [91]. Массового применения на железных дорогах мира подобные шпалы не получили по целому ряду причин, к числу которых следует отнести сложность и затратность текущего содержания пути, коррозию стали, электропроводность, повышенный износ балласта, шум при движении поездов, прочие недостатки металлических шпал. Применение армированного стекловолокном полиуретана исключило коррозию и электропроводность шпал, снизило уровень шума и дробление частиц балласта под шпалой [91]. Однако по причине высокой стоимости, сложности укладки и текущего содержания пути, особенно в кривых участках пути, отсутствия

технологии и производств данные шпалы имеют достаточно ограниченное применение на железных дорогах мира [91].

С введением в СССР ГОСТ 10629-71 «Шпалы железобетонные предварительно напряженные для железных дорог широкой колеи» было закреплено устройство на всех типовых железобетонных шпалах рифления подошвы шпалы ячейками, глубиной 10 мм и размерами 80×80 мм (рисунок 2.21) для повышения сопротивления сдвигу по балласту. Исследования [42], [44] показали, что влияние заводского рифления нижней поверхности железобетонных шпал при данной глубине способствует незначительному повышению сопротивления (порядка 2-3 %), в связи с чем, в дальнейшем было принято решение отказаться от устройства рифления.

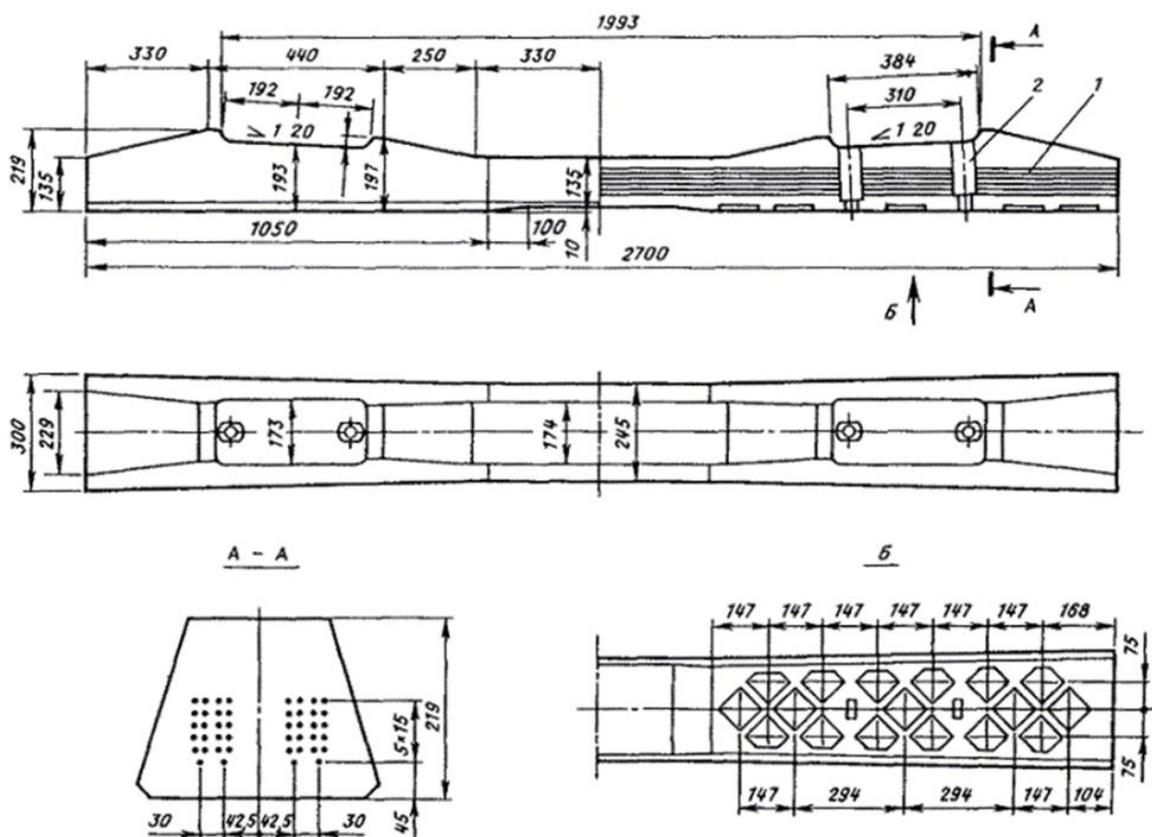


Рисунок 2.21 – Шпала типа С-56 по ГОСТ 10629-71

Одним из направлений повышения сопротивления шпал продольным и поперечным перемещениям было повышение сцепления с балластом посредством всевозможных выступов, шипов, зубьев, пластин.

Были предложены шпалы [40] с развитым поперечным сечением по концам (рисунок 2.22), предназначенные для кривых малых радиусов.

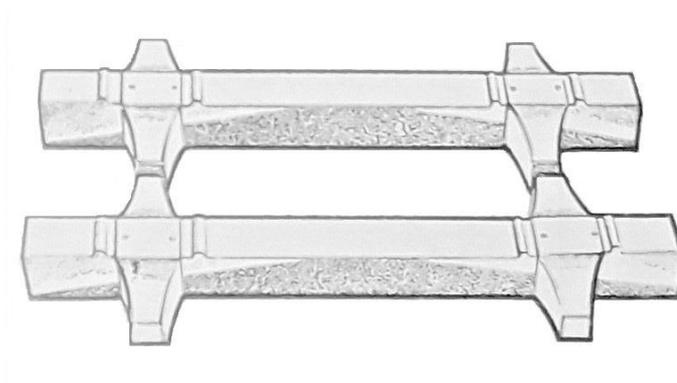


Рисунок 2.22 – Шпалы ВР. 14d с повышенным сопротивлением сдвигу (Австрия)

Применение поперечных выступов способствует повышению сопротивления в балласте в поперечном направлении в 1,5-2 раза [40]. Основной идеей являлось включение в работу при поперечном сдвиге щебня в шпальных ящиках, при этом, в [12] данная мера признана наиболее эффективной. Кроме этого, в качестве прочих мер по повышению погонного сопротивления рекомендовано [12] устройство на стандартных железобетонных шпалах выступов (рисунок 2.23), стальных фартуков на концах шпал (рисунок 2.24), а также омоноличивание балласта полимерными вяжущими составами.

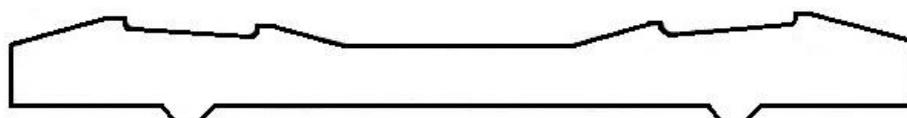


Рисунок 2.23 – Железобетонная шпала с двумя выступами

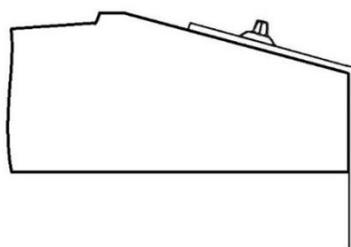


Рисунок 2.24 – Стальной фартук на конце железобетонной шпалы

Эффективность повышения поперечного сопротивления в балласте с помощью устройства двух выступов на железобетонных шпалах оценивалась ВНИИЖТ в диапазоне на 8-26% выше, чем у типовых [40]. С целью повышения сопротивления поперечному сдвигу железобетонных шпал в регионах с высокими суточными перепадами температур, а также в кривых малых радиусов была разработана шпала Ш1-К [50], также имеющая некоторые конструктивные изменения относительно типовой. Основными отличиями являются наличие металлических пластин, привариваемых в подрельсовых сечениях перпендикулярно шпале с двух сторон, большая площадь и высота торца, а также большая масса. В результате статических испытаний данных шпал было установлено, что их сопротивление сдвигу поперёк оси пути превышает сопротивление типовых железобетонных более чем на 30% [50].

Влияние дополнительной присыпки валиком из щебня торцов типовых железобетонных шпал на их сопротивление поперечному сдвигу в балласте в разные годы оценивалось следующим образом: повышение на 25-30% [40], повышение до 15-20% [12], повышение на 21-26% [50]. Однако это противоречит исследованиям [5], [65], [40] и [80], где указывалось, что вклад плеча балластной призмы в общее сопротивление шпалы поперёк оси пути не превышает 25%.

Влияние заполнения шпальных ящиков балластным материалом на погонное сопротивление железобетонных шпал поперек оси пути было экспериментально установлено в [9]. Отмечалось [9], что при 50% заполнении шпальных ящиков коэффициент вязкости балласта уменьшается в 1,25 раз, а при полном отсутствии щебня в 1,45 раз.

Г.Г. Лосевым [92] для повышения сопротивления сдвигу типовой железобетонной шпалы в балласте была предложена «зубатая шпала». По мнению разработчика, одним из факторов, существенно снижающим устойчивость бесстыкового пути, является эффект изгиба вверх небольших зон рельсошпальной решётки от действия поездной нагрузки непосредственно перед тележками подвижного состава и после них [93]. Длина такого «приподнятого» участка

составляет около 2,0-2,5 м [38], [94]. Исходя из этого, при движении подвижного состава бегущие изгибные волны снижают на 50-60% усилия сдвига 4-5 шпал по обе стороны от его тележек из-за нарушения связи нижней части шпалы со щебнем. Для нейтрализации этого явления было предложено устройство на нижней грани стандартных железобетонных шпал 10-ти зубьев из щебня (рисунок 2.25) [95].

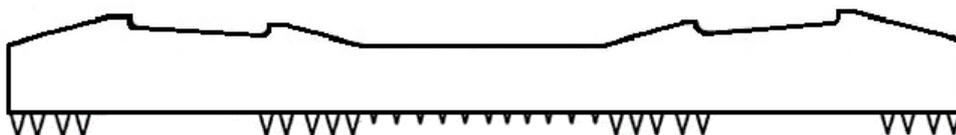


Рисунок 2.25 – Устройство зубьев на стандартной железобетонной шпале [95]

Предлагалось также повышение сопротивления сдвигу железобетонных шпал в балласте путём устройства на подошве стандартной железобетонной шпалы шипов в виде металлических анкеров [84], стержней [68], вкручиваемых верхней частью в специально подготовленные отверстия.

Ввиду затратности, повышения металлоёмкости железнодорожного пути, предлагалось [46] вместо металлических пластин, повышающих площадь торцевого давления шпалы на балласт, закреплять на торцах железобетонных шпал специальную удерживающую конструкцию из геосетки. Проведенные авторами эксперименты показали, что закрепление геосетки на основе базальтовых волокон на торце шпалы позволяет повысить значение нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости рельсошпальной решетки в балластной призме, на 44-47 % [46]. Однако поскольку наибольший прогиб железобетонных шпал происходит именно на торцах, велика вероятность постоянного разрыхления балласта уложенной геосеткой вплоть до отрясения концов шпал под воздействием проходящих поездов.

Была предложена шпала [96], представляющая собой стандартную железобетонную шпалу I типа, с выступом в нижней части в зоне действия

сжимающих кромочных напряжений (рисунок 2.26). Выступ формировался за счёт изъятия части бетона из нижней поверхности подрельсовых блоков (рисунок 2.27).

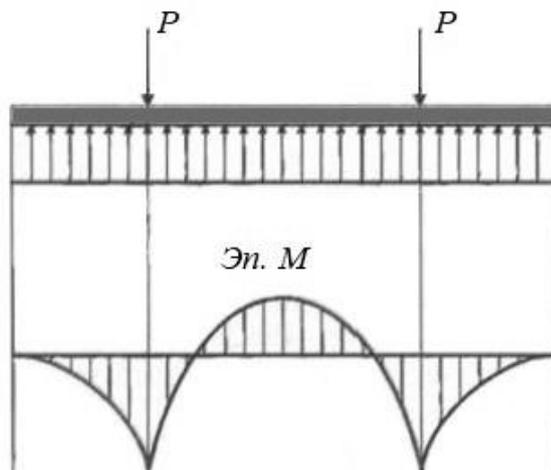


Рисунок 2.26 – Эпюра изгибающих моментов железобетонной шпалы



Рисунок 2.27 – Железобетонная шпала по пат. РФ №2433218

Преимуществами конструкции шпалы является существенное повышение сопротивления поперечному сдвигу в балласте (примерно в 2 раза по сравнению с типовой) за счёт устройства выступа в средней части, а также снижение массы шпалы не менее чем на 30 кг [96], [97], [98]. Уменьшение толщины шпалы в подрельсовом сечении позволяет эффективнее работать предварительно напряженной арматуре, поскольку она располагается ближе к зоне растяжения [22]. Повышается и общая упругость шпалы, что создаёт условия для работы подрельсовых прокладок промежуточных креплений [97]. Расчеты по стандартной методике [99] показали, что предлагаемая форма железобетонной шпалы несколько снижает запас прочности по выносливости и трещиностойкости бетона, но при этом общий запас прочности остаётся практически двукратным.

Повышенное сопротивление шпалы сдвигу в балласте поперечном направлении [100] не является главным её преимуществом. Погонное сопротивление, как было отмечено ранее, является величиной, имеющей большую дисперсию, однако в случае, если шпала сопротивляется в 2 раза больше типовой, то повышение в 2 раза произойдёт везде несмотря на дисперсию. Сопротивления типовых железобетонных шпал в большинстве случаев оказывается достаточным в случае, если температура закрепления рельсовых плетей не ниже 30 °С. Основным преимуществом шпалы является снижение массы и положительный экономический эффект, обусловленный снижением затрат изготовления шпал и текущее содержание железнодорожного пути [21], [101].

Одним из наиболее эффективных и применяемых на железных дорогах мира способов повышения погонного сопротивления балласта в продольном и поперечном направлении является его уплотнение выправочно-подбивочными машинами и динамическая стабилизация [5], [12], [81].

Исследования природы погонного сопротивления балласта сдвигам шпалами были проведены в работах [41] и [102]. В книге «Продольные силы в железнодорожном пути» [41] была описана методика проведения опытов и статистической обработки полученных данных. По результатам проведенных экспериментов, А.Я. Коган пишет, что имеются все основания считать погонное сопротивление балласта сдвигу вдоль пути нормально распределённой случайной величиной [41]. Он указывал на тот факт, что усилие, передаваемое от рельсов к шпале, зависит не только от перемещения рельсов. Это лишь частный случай, относящийся к первому нагружению системы. В общем случае, усилие, передаваемое от рельсов к шпале, зависит также и от начального её смещения шпалы, вызванного предшествующим состоянием контакта между рельсом и шпалой.

Было исследовано влияние расстояния между соседними шпалами (эпюры шпал) на величину их сопротивления сдвигу в балласте [41], проведены опыты по перемещению шпалы вдоль пути под действием силы при разных расстояниях между осями шпал: 50, 55 и 75 см. По результатам был построен график

зависимости статических сопротивлений шпал от величины шпального ящика, на котором можно было заметить, что при расстоянии между осями шпал в 50 см сопротивление сдвигу наименьшее, а при расстоянии в 75 см – наибольшее [41].

А.Я. Коганом отмечалось, что при длительной эксплуатации бесстыкового пути в течении месяцев и лет зависимости сопротивления шпал сдвигу в балласте стираются вследствие ползучести и релаксации усилий, передаваемых от балласта на шпалу [41]. Сглаживанию зависимости сопротивления шпал способствуют сотрясения пути проходящими поездами и работы по текущему содержанию пути. На основании этого А.Я. Коган делает вывод о том, что «при рассмотрении годового изменения температуры следует искать зависимость погонного сопротивления не от перемещения сечения, а от температуры и времени» [41].

В настоящее время для повышения поперечной устойчивости бесстыкового пути предлагаются различные технологии склеивания балластной призмы полимерными связующими веществами: всей [103] или только её плеча [104]. Омоноличенный таким образом щебень не даёт возможности поперечного (а в некоторых случаях и продольного) перемещения шпалы под действием продольных сил в рельсовых плетях. Однако применение подобных методов имеет обратную сторону: склеивание балластного слоя ухудшает одну из главных его функций – дренировать воду, уменьшается количество пор, затрудняется выправка пути и очистка щебеночного балласта.

Омоноличенный полимерными связующими балласт, применение других способов повышения сопротивления сдвигу (укладка тяжелых шпал, применение стальных фартуков, выступов, зубьев) создаёт иллюзию высокой надёжности пути, в результате чего температурный режим рельсовых плетей может отойти на второй план, поскольку, как считается, с предпринятыми дополнительными мерами потери устойчивости бесстыкового пути не может произойти. Опасность подобного подхода прежде всего в том, что главным показателем работы рельсовых плетей бесстыкового пути является именно их температурный режим. Введение дополнительных мер по повышению сопротивления балласта, особенно путём укладки тяжёлых шпал или оснащённых выступами, зубьями, фартуками

является достаточно дорогим мероприятием. Дополнительные меры по повышению погонного сопротивления сдвигу на практике невозможно обеспечить равномерно по всей длине пути, не существует в настоящее время и системы контроля эффективности проведенных мероприятий. В случае превышения температуры рельсов над температурой их закрепления на участке, где погонные сопротивления сдвигу шпал не повышены до установленной величины, возникает вероятность потери устойчивости.

В случае закрепления плетей при достаточно высокой температуре продольная сила, возникающая в рельсовых плетях бесстыкового пути в летний период не будет достигать опасных значений и дополнительные меры по повышению погонного сопротивления балласта поперечному сдвигу шпалами не потребуются. Погонное сопротивление балласта продольному и поперечному перемещению типовых железобетонных шпал в обычных условиях эксплуатации при подбивке пути машинами типа ВПР, нормативной температуре закрепления рельсовых плетей и без применения дополнительных мероприятий оказывается достаточным для надёжной работы бесстыкового пути как при максимальных значениях температуры для региона их укладки, так и при минимальных.

#### **2.4 Выводы по второй главе**

При расчётах бесстыкового пути необходимо иметь реальные значения погонного сопротивления вдоль и поперёк оси пути  $r$  и  $q$  – в статике, и коэффициентов вязкости балласта  $K$  и  $\xi$  – в динамике. Эти значения имеют достаточно большую дисперсию поэтому использование среднего значения может с вероятностью 50% привести к погрешностям в расчётах, в результате которых надёжность работы пути будет нарушена. В связи с этим, необходимо в одних случаях применять минимальные значения погонного сопротивления (как наихудший вариант при расчётах устойчивости бесстыкового пути), а в других случаях максимальные значения (когда необходимо сдвинуть рельсошпальную решётку). Конкретные максимальные и минимальные значений нормально распределённой случайной величины погонного сопротивления  $r$  (в статике) могут

быть получены по, так называемому, «правилу трёх сигм» – расчёту доверительного интервала, ограниченного  $\bar{x}-3\sigma$  и  $\bar{x}+3\sigma$ , внутри которого находится 99,7% возможных значений случайной величины. Если взять за основу наиболее массовые опыты АО ВНИИЖТ, то минимальными и максимальными значениями сопротивления железобетонных шпал в балласте вдоль оси пути  $r$  будут являться границы доверительного интервала – 3,3 кН/м и 16,7 кН/м, а поперёк оси пути  $q$  – 2,5 кН/м и 14,5 кН/м «на шпалу».

Обоснование конкретных максимальных и минимальных значений коэффициента вязкости щебёночного балласта в динамике в настоящее время не может производиться по «правилу трёх сигм» в связи с отсутствием данных о функции распределения случайной величины, однако известно, что коэффициент вязкости щебёночного балласта напрямую зависят от интенсивности движения поездов. В связи со значительной трудоёмкостью проведения опытов, высокой дисперсией и недостаточностью опытных данных, не позволяющих пока достоверно определить закон распределения случайной величины, в расчётах пути на данный момент может применяться максимальное значение  $K = 314,4 \cdot 10^9$  Н·с/м<sup>2</sup> (для участков с низкой грузонапряжённостью) и минимальное значение  $K = 44,4 \cdot 10^9$  Н·с/м<sup>2</sup> (для участков с высокой грузонапряжённостью).

Предлагаемые меры по повышению погонного сопротивления балласта (в частности повышение массы шпал, устройство фартуков, выступов и др.) позволяют повысить значения погонных сопротивлений  $r$  и  $q$  в статике, но вследствие дополнительных трудовых и материальных затрат, экономическая эффективность их внедрения пока не доказана. Не во всех случаях повышение статических погонных сопротивлений приводит к росту сопротивления в динамике, характеризуемого коэффициентами вязкости  $K$  и  $\zeta$ . Ввиду интереса ОАО «РЖД» к тяжёлым опорам – шпалам и плитам, влияние массы шпал на сопротивление в балласте с учётом динамики действующего пути требует отдельного рассмотрения. Сопротивления типовых железобетонных шпал в большинстве случаев оказывается достаточным в случае, если температура

закрепления рельсовых плетей будет находиться в пределах температурного режима, установленного в зависимости от климатического региона.

### **3 ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ БАЛЛАСТА СДВИГУ ОТ МАССЫ ОПОР И ИХ КОНСТРУКЦИИ**

#### **3.1 Методика и результаты экспериментальных исследований зависимости сопротивления балласта сдвигу шпалами от массы шпал**

В начале изучения бесстыкового пути в СССР считалось [5], что чем выше масса путевой решетки и шпал, тем выше её сопротивление продольным и поперечным сдвигам, поскольку основная доля сопротивления обусловлена трением и сцеплением нижней поверхности шпал о частицы щебня. Считается [42], что повышение массы шпал обеспечивает увеличение сопротивления сдвигу в балласте. Были проведены опыты по определению статических значений погонного сопротивления утяжелённых шпал ШСТ-1 (масса повышена на 32% относительно типовой шпалы) в щебёночном балласте. Их сопротивление сдвигу превышало сопротивление типовых шпал до 20% [42]. При этом, форма, поперечное сечение, тип армирования, жесткость и другие параметры утяжелённых и типовых шпал были неодинаковы.

Опыты по определению зависимости сопротивления шпал продольному сдвигу в балласте от вертикальной нагрузки проводились МИИТом с 1950 года в условиях действующего пути М.-Окружной железной дороги. Движение поездов на участке испытаний закрывалось, а динамическое воздействие подвижного состава имитировалось специальной съёмной тележкой типа ЦНИИ, оснащённой по концам электровибраторами, создающими частоту колебаний, характерную для колес подвижного состава. Было проведено 68 опытов при 8 различных значениях вертикальной нагрузки на шпалу от 445 до 5355 кг [14], в результате которых был получен график, отображающий зависимости сопротивления шпал сдвигу от их продольного перемещения при различной величине вертикальной нагрузки (рисунок 3.1).

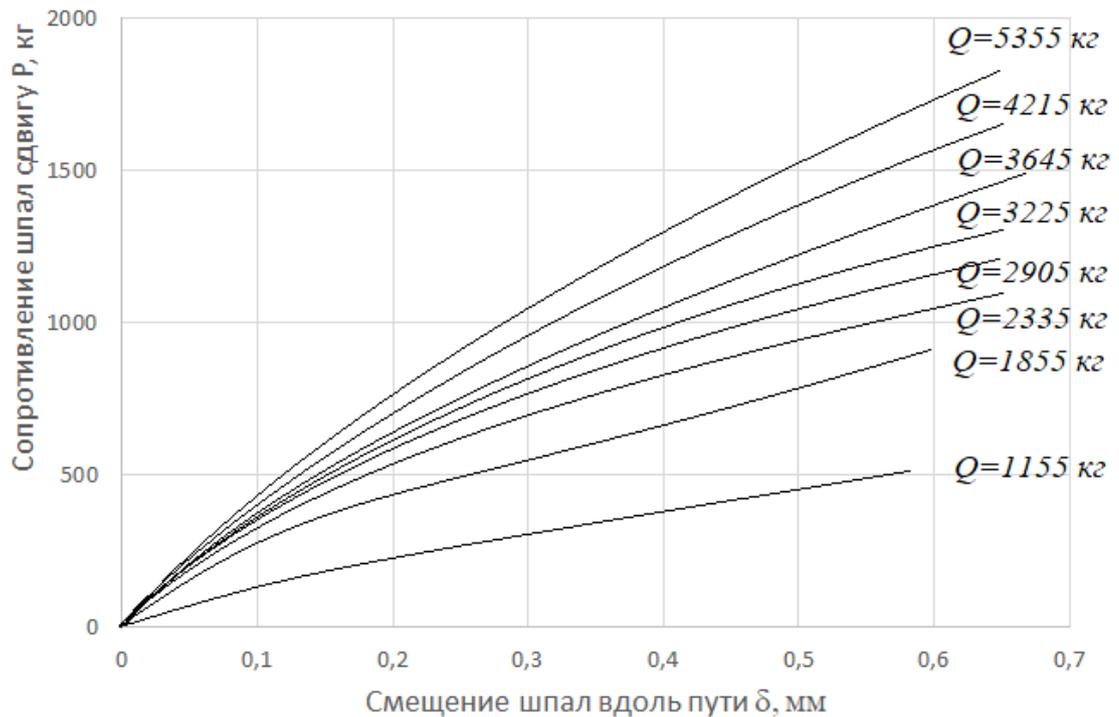


Рисунок 3.1 – Кривые зависимости сопротивления шпал сдвигу вдоль пути от величины перемещения при различных значениях вертикальной нагрузки [14]

Аналогичные кривые были получены и при поперечном сдвиге шпал в балласте при различных вертикальных нагрузках [35].

Проводились опыты по определению зависимости статических сопротивлений шпал перемещениям от вертикальной нагрузки, создаваемой весом паровоза [34]. Величина могла изменяться путём повышения или уменьшения объёма воды в тендере. В результате была установлена зависимость, в которой сопротивление шпалы сдвигу возрастало пропорционально увеличению вертикальной нагрузки [34]. Аналогичная зависимость была получена в ходе серии опытов [105] по оценке влияния вертикальной нагрузки на величину продольного перемещения шпал в балласте. С помощью гидравлических разгонных приборов РН-02 осуществлялась сдвижка короткого звена длиной 6,2 м, при этом в первых опытах звено было не нагружено, во второй серии опытов на звене находилась одна из тележек порожнего думпкара ВС-85, в последующие опытах на звене находилась одна из тележек загруженного думпкара ВС-85 [105] (рисунок 3.2).

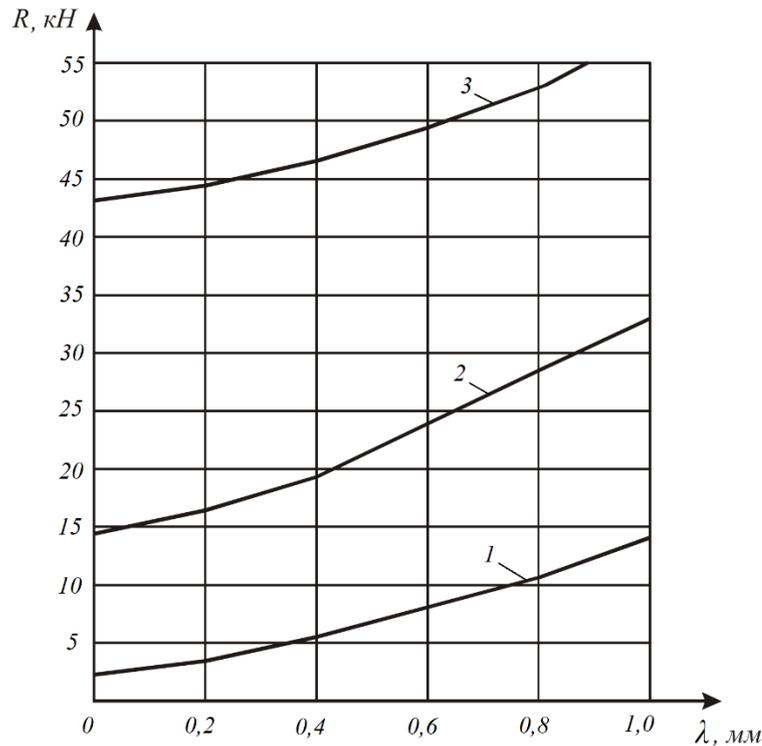


Рисунок 3.2 – Сопротивление балласта  $R$  сдвигу шпалами при вертикальной нагрузке [105]: 1 – незагруженное звено; 2 – порожний думпкар; 3 – груженный думпкар

Проведенные опыты носили статический характер, с ростом вертикальной нагрузки пропорционально увеличивалась сила трения и сопротивление шпалы, поэтому полученные результаты с различной точностью отражали закон трения Кулона. Авторами отмечалось [105], что влияние вибраций, динамических нагрузок от подвижного состава на силы сопротивления шпал продольным перемещениям требует отдельного изучения.

Изучение влияние рифления нижней поверхности шпал, формы шпал и их массы на сопротивление в балласте было исследовано во ВНИИЖТ [44]. При изучении степени влияния каждого из факторов были проведены отдельные опыты, в которых все другие параметры кроме искомого оставались неизменными. Опыты проводились с типовыми железобетонными шпалами ШС с рифлением и без него, утяжелёнными шпалами ШСТ, а также ШС и ШСТ, нагруженными дополнительно на 300 и 565 кг. Это позволило количественно оценить влияние формы шпалы, их

массы и рифления нижней части на сопротивление сдвигу в балласте. Отмечалось [44], что наибольший вклад в сопротивление шпал сдвигу вносит форма шпал и их масса. Повышение сопротивления сдвигу более тяжелой шпалы ШСТ по сравнению с типовой ШС оценивалось в 20%. Опыты проводились на специальном стенде и на участке пути в отсутствие проходящих поездов, поэтому исследование позволяет оценить влияние массы и других параметров только в статических условиях.

Результаты других опытов показали отсутствие влияния массы шпал на сопротивление продольным и поперечным сдвигам в балласте [106], [107]. В СССР при изучении сопротивления различных типов шпал в щебёночном балласте в течение длительного промежутка времени (около 5 лет) наибольшее погонное сопротивление было получено на самых лёгких из всех типов шпал – металлических [5] (рисунок 3.3).

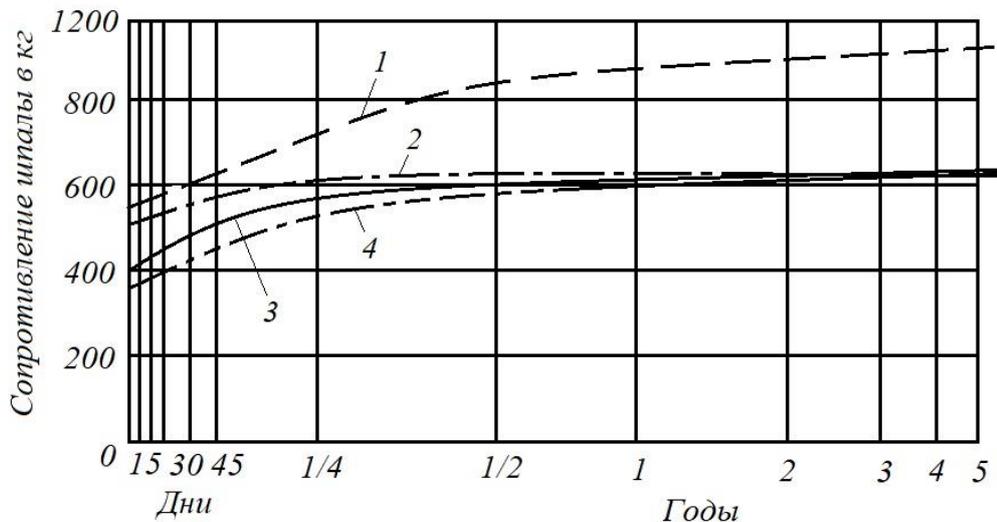


Рисунок 3.3 – Сопротивления поперечному перемещению пути в зависимости от времени его работы на: 1 – металлических шпалах; 2 – железобетонных шпалах; 3 – деревянных из мягкой древесины; 4 – деревянных из твёрдой древесины.

На федеральных железных дорогах Швейцарии проводились испытания новых железобетонных шпал B06 FS, основными отличиями которых от применяемых ранее шпал B91 была большая масса (на 75 кг), повышенная площадь

контакта с балластным слоем и меньшая толщина [107]. При экспериментальном исследовании сопротивления балласта сдвигу сравниваемыми шпалами в поперечном оси пути направлении было отмечено [107], что при более развитом в ширину поперечном сечении шпалы В06 FS и значительно большей массе, чем у В91, величины сопротивления сдвигу в балласте обоих шпал оказались практически одинаковыми.

Известны экспериментальные сравнения сопротивления сдвигу в балласте деревянных и железобетонных шпал, проведенные как в СССР [5], так и за рубежом [51], [52]. При разнице в массе (около 200 кг) и более развитой форме поперечного сечения железобетонных шпал относительно деревянных величины их сопротивлений сдвигу в балласте были сопоставимы [5]. Указывалось [40], что пределы сопротивлений в обкатанном пути у деревянных и железобетонных шпал практически одинаковы, так как большая масса железобетонных компенсируется большим сцеплением деревянных шпал со щебнем.

В настоящее время вопрос влияния массы шпалы на её сопротивление сдвигу в балласте при воздействии подвижного состава ещё не изучен.

Для изучения вопроса влияния массы шпалы на её сопротивление в балласте с учётом динамического воздействия проходящих поездов была разработана методика, предусматривающая проведение экспериментов в действующем пути с двумя железобетонными шпалами I типа, одна из которых нагружается дополнительной нагрузкой равной 100 кг. При проведении опытов принимались допущения, заключающиеся в пренебрежении влиянием соседних шпал на полученные результаты, в том числе не увеличивалась масса соседних шпал, поскольку по сравнению с вертикальными силами от проходящих поездов прирост их силы тяжести составил бы пренебрежимо малое значение. Допущения, связанные с пренебрежением влиянием смежных шпал, являются классическими и принимались известными опытах [5]. Сравнительные испытания осуществлялись в равных условиях, состоящие в том, что при одновременном проведении опытов на одном и том же участке железнодорожного пути по шпалам проходит равное количество осей подвижного состава с равной нагрузкой через равные промежутки

времени. Определение погонных сопротивлений балласта сдвигу шпалами вдоль оси пути проводилось на участке бесстыкового железнодорожного пути с промежуточным рельсовым скреплением ЖБР-65 на 1313 км перегона Ростов Главный – Ростов Товарный в июле 2018 года, и на 1196 км перегона Новочеркасск – Кизитеринка Ростовской дистанции пути, имеющем промежуточное рельсовое скрепление КБ-65 в апреле 2019 года. Грузонапряженность первого участка около 20 млн. т. км брутто/ км, второго свыше 80 млн. т. км брутто/ км, скорость движения подвижного состава на первом участке 40-60 км/ч, на втором 80-100 км/ч. Первый участок находится в конце кривой радиусом 600 м, второй в прямой. Опыты проводились в середине рельсовой плети на шпалах, не имеющих выплесков и провисаний, при положительной температуре воздуха и отсутствии атмосферных осадков. Производилось сравнение величин перемещений ненагруженной и нагруженной шпалы под действием искусственно созданной нагрузки, эквивалентной погонному сопротивлению 10 кН/м (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Участок проведения экспериментальных исследований (1196 км)

Опыты с нагруженной и ненагруженной типовой шпалой достаточно трудоёмки, ввиду не только времени на их проведение (около 6 часов на 1 опыт), но и затрат труда на ограждение участка проведения работ, подготовку мест и установку пружинно-винтовых силомеров, дополнительной нагрузки и её закрепление, постоянный контроль времени, числа прошедших поездов, сил и перемещений.

В результате проведенных с учётом воздействия поездов и фактора времени экспериментов, было определено, что повышение массы шпал на 100 кг не вызывает роста значения коэффициента вязкости вдоль оси пути [108]. Коэффициент корреляции между массой шпалы и коэффициентом вязкости балласта, сдвигаемого шпалами менее 0,5, что позволяет сделать вывод об отсутствии тесноты связи между ними. Данные проведенных экспериментов согласуются с теоретическими положениями, изложенными в теории ползучести, поскольку в опытах присутствует зависимость прикладываемой на шпалу силы от скорости перемещения в балласте. Исследования [70], [76] позволяют математической моделью бесстыкового железнодорожного пути считать упругий стержень (рельс), находящийся в вязкой среде (балласте, сотрясаемом проходящими поездами) (рисунок 3.5).

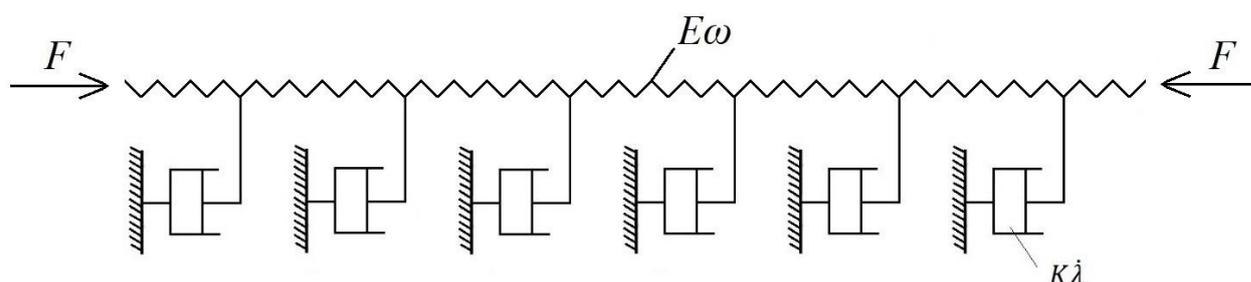


Рисунок 3.5 – Математическая модель бесстыкового пути

В данной модели шпала представлена как абсолютно твердое тело, жестко соединённое с рельсом, движущееся под действием продольной силы в вязкой среде с малой скоростью. Дж. Стоксом было выведено уравнение для определения силы сопротивления вязкой среде движению шара, в котором отсутствует

зависимость между силой вязкого трения и массой движущегося тела. Отсутствует данная зависимость и в законе вязкости Ньютона, как в его классической форме, так и применённом для железобетонной шпалы (2.1).

Таким образом, в расчетах бесстыкового пути с учетом воздействия поездов, следует принимать, что сопротивление балласта сдвигу шпалами при воздействии поездов зависит не от массы шпалы, а от её формы и скорости перемещения, характеризуемых коэффициентом вязкости щебеночного балласта. При этом, в статике, без влияния поездов, зависимость  $r$  и  $q$  от массы определяется законом трения Кулона. Большая масса железобетонных шпал увеличивает материальные, энергетические и трудовые затраты при текущем содержании и ремонте. Сопротивление щебеночного балласта продольному и поперечному сдвигу, в том числе при его сотрясении проходящими поездами, при необходимости может быть повышено его уплотнением динамическим стабилизатором пути, что значительно дешевле и эффективнее [40] увеличения массы подрельсовых опор. Но это возможно в том случае, если промежуточные рельсовые скрепления обеспечивают большее сопротивление сдвигу рельсов относительно шпал, чем сопротивление самого балласта. Величина силы прижатия рельса к шпале также, как и погонное сопротивление балласта является случайной величиной с большой дисперсией. На шпале один комплект промежуточного скрепления может обеспечивать нормативную силу прижатия, другой нет. При ослаблении затяжки гаек промежуточных рельсовых скреплений, особенно на концевых участках рельсовых плетей, продольная температурная сила от рельсовых плетей передаётся только на те шпалы, один или оба комплекта промежуточных скреплений которых сохранили нормативную силу прижатия. Их погонное сопротивление в балласте в большинстве случаев оказывается преодолено после чего происходит неравномерное силовое перемещение шпал с их кантованием и перекосом (рисунок 3.6), приводящим к сужению ширины колеи и разрушению элементов верхнего строения пути при периодическом знакопеременном воздействии.



Рисунок 3.6 – Перекос шпал с разрушением элементов креплений

Применение безболтовых промежуточных креплений не привело к уменьшению дисперсии силы прижатия рельса к шпале из-за остаточных деформаций прутковых клемм. Поэтому повышение погонного сопротивления балласта не приведёт к уменьшению продольных и поперечных температурных перемещений рельсовых плетей и повышению надёжности конструкции при существующих типах промежуточных рельсовых креплений и отсутствии контроля за силой прижатия рельса к шпале.

### **3.2 Влияние материала и конструкции подрельсовых опор на их работу в бесстыковом пути**

В настоящее время существует большое число различных конструкций безбалластного пути: Rheda, Zublin, LVT, Bögl и др., наблюдается рост его протяжённости, в КНР, имеющей самую протяжённую в мире сеть высокоскоростных железных дорог.

Среди преимуществ применения безбалластного пути выделяют стабильность геометрии рельсовой колеи, снижение затрат на текущее содержание пути (выправку, подбивку, борьбу с растительностью и т.д.), высокое сопротивление продольному и поперечному сдвигу, отсутствие просадок,

перекосов, снижение общего давления на основную площадку земляного полотна [109].

Недостатками безбалластного пути являются большие капиталовложения на устройство и укладку пути, значительно больший срок строительства, повышенные требования к подготовке кадров, к качеству применяемых стройматериалов, необходимость усиления земляного полотна с устройством качественных водоотводов, полного исключения морозного пучения грунтов, отсутствие возможности возведения пути в сложных инженерно-геологических условиях. Устройство безбалластного пути возможно только на линиях со здоровым, качественно уплотнённым земляным полотном и эффективными водоотводами [109]. В случае чрезвычайной ситуации восстановление безбалластного пути оказывается достаточно трудоёмким и дорогостоящим, занимает продолжительное время.

Безбалластная конструкция пути очень уязвима к воздействию воды. При опытной эксплуатации безбалластных конструкций пути на Экспериментальном кольце ВНИИЖТ были обнаружены просадки путевой плиты, обусловленные переувлажнением грунта насыпи, цементно-песчаные выплески на поверхность щебеночной призмы [110]. Причинами выплесков был признан зазор между плитой и гидравлически связанным несущим слоем. Из-за скопления воды вследствие недостаточного водоотвода под воздействием знакопеременных вертикальных динамических нагрузок от колес подвижного состава произошло отслоение монолитной плиты от тощевого бетона.

Были обнаружены полушпалки, потерявшие связь с основной плитой конструкции, при движении поездов по опытному участку визуально наблюдались вертикальные перемещения полушпалков отдельно от монолитной плиты [110]. В зависимости от конструкции пути шпал или полушпалков укладываются в специальных чехлах, упругие свойства которых должны защитить железобетонные плиты от вибрации и разрушения при эксплуатации. Однако придание безбалластной конструкции приемлемыми на практике способами без значительных трудозатрат и повышения стоимости такой же регулируемости и

упругости, которыми обладает путь на балласте, представляет сложную задачу с учетом изначальной высокой жесткости бетона [109].

Выявленные при эксплуатации участка безбалластного пути просадки плит, выплески, отслоение шпал от бетона возможно было предотвратить своевременным проведением профилактических мероприятий: шлифовкой рельсов, повторным склеиванием балласта на переходных участках, своевременной выправкой пути регулировочными прокладками и заменой деформированных клемм промежуточных скреплений [110]. Но в таком случае безбалластный путь нельзя назвать малообслуживаемым.

Высокое сопротивление поперечному сдвигу, погонное сопротивление, ограниченное только силой прижатия рельса в узлах промежуточных скреплений, могут создавать у работников путевого хозяйства иллюзию абсолютной надёжности, невозможности потери устойчивости при любых условиях. Но на данный момент ещё нет конструкций промежуточных рельсовых скреплений, которые бы могли надёжно обеспечивать необходимое усилие прижатия рельса к шпале в течение длительного времени.

Железнодорожный путь на балласте с точечными подрельсовыми опорами является более предпочтительной конструкцией, чем безбалластный, которому свойственна малая ремонтпригодность, высокие капитальные затраты на устройство, а также отсутствие доступных технологий и опыта обслуживания [109]. Деформативность земляного полотна, необходимость его усиления, создания качественных водоотводов, снижают рентабельность и окупаемость безбалластного пути. Область применения безбалластной конструкции в настоящее время ограничена искусственными сооружениями.

В СССР наряду с железобетонными и деревянными шпалами, испытания проходили различные варианты блочных подрельсовых конструкций, укладываемых на балласт. К 1957 году для главных железнодорожных путей было разработано около 10 вариантов блочных железобетонных конструкций, среди них были рамная конструкция типа 8-А и плитная варианта 4 (рисунок 3.7),

укладываемые стандартными путеукладчиками на спланированный уплотнённый балласт [111].

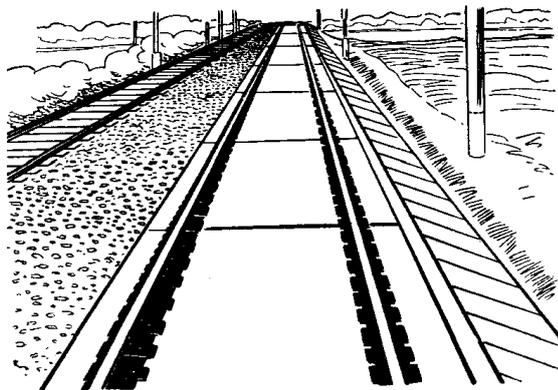


Рисунок 3.7 – Путь плитной конструкции варианта 4

При испытании конструкций в пути отмечали [111] снижение максимального давления на балласт, уменьшение интенсивности накопления остаточных деформаций пути, среди недостатков – перемещение плит относительно друг друга и сложность выправки пути. При этом рамные конструкции были признаны менее эффективными, чем плитные: их давления на основную площадку земляного полотна были более высокими и неравномерными чем на пути с деревянными шпалами [57].

Разработанные в дальнейшем конструкции в виде плит, блоков, малогабаритных рам МГР-1 и МГР-2 (рисунок 3.8), укладываемых на балласт, не получили распространения по причине удорожания пути, усложнения работ по его устройству, выправке в плане и профиле [90].

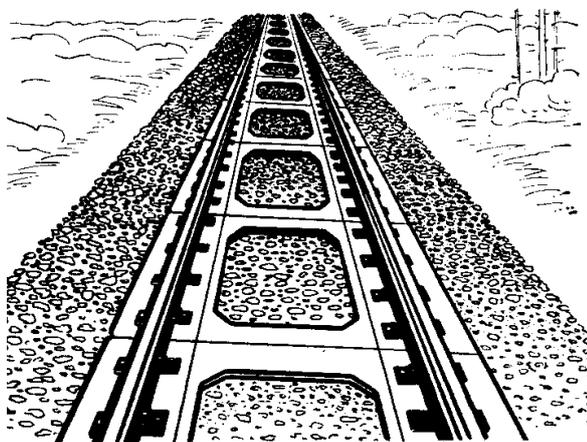


Рисунок 3.8 – Путь на малогабаритных рамах типа МГР

При эксплуатации плитных и рамных конструкций происходит постоянное знакопеременное вертикальное перемещение торцов смежных блоков (эффект рычага при проходе колёс подвижного состава стыков плит), приводящее к образованию поперечных трещин, сколов бетона по торцам, выплескам из-под плит, остаточным деформациям упругих клемм промежуточных креплений.

При плитной конструкции пути необходимо обеспечивать плотное опирание рельсов на все опоры: прокладки между рельсом и плитой подбираются индивидуальной толщины, что практически трудно осуществимо [57]. В случае невыполнения данного условия рельсы будут опираться не на все опорные точки плит, при этом неровности в положении рельсовых нитей по уровню могут быть большими, чем на пути с железобетонными шпалами [57].

Сложность представляет одиночная замена дефектного блока. Одна дефектная шпала не может существенно повлиять на температурный режим работы бесстыкового пути. Рамная или плитная конструкция, как правило, представляет собой участок, эквивалентный 4-5 шпалам, поэтому при возникновении дефекта невозможно гарантировать безопасность движения поездов. Одиночная замена дефектных железобетонных блоков осложнена их массой и необходимостью изъятия балласта и вывешивания рельса на протяжении более 3 м.

При плитной конструкции упругость промежуточных креплений должна быть такой, чтобы при динамических взаимодействиях пути и подвижного состава масса рельса была упруго отделена от массы плит, поскольку их совместные колебания влекут за собой такие силы инерции, которые могут привести к разрушению креплений и пути в целом [57].

Для бесстыкового пути нет большой разницы в том какие шпалы применять – деревянные или железобетонные [64], [112]. Преимуществами деревянных шпал являются простота изготовления и укладки, упругость, достаточная прочность, небольшой вес, высокое электрическое сопротивление, мягкость контакта с частицами балласта, малая чувствительность к ударам [113]. Деревянные стрелочные и мостовые брусья применялись благодаря небольшому весу,

относительной лёгкости их изготовления, укладки, а также универсальности [114]. К недостаткам деревянных шпал относят истощение лесных богатств страны, сложность утилизации, относительно небольшой срок службы, вызванный гниением и механическим износом [115].

Основным типом шпал в настоящее время на железнодорожных путях 1-3 классов являются цельнобрусковые предварительно напряжённые железобетонные шпалы, преимуществами которых является достаточная точность геометрических размеров, стабильность ширины колеи, относительная долговечность, обусловленная неподверженностью повреждения насекомыми и грибами [116].

Недостатками железобетонных шпал является их высокая жесткость, которая в 2-3 раза выше, чем в пути с деревянными шпалами, высокая масса, хрупкость при ударном воздействии, электропроводность [117].

Среди причин возникновения, роста и накопления неравномерных осадок пути на железобетонных шпалах выделяют жёсткий контакт частиц щебня с бетоном шпал [118]. Снижению давления на балласт интенсивности его износа способствует увеличение опорной площади железобетонных шпал [119], однако повышение опорной площади приводит к пропорциональному росту массы и стоимости шпал, затрудняет их укладку и текущее содержание [87].

Для улучшения контакта железобетонной шпалы с частицами щебня предлагалось устройство упругих прокладок под подошвами железобетонных шпал [120], [106], повышающих поверхность непосредственного контакта шпалы с балластом с 2-3% до 30% [121]. При эксплуатации железобетонных шпал с упругой подошвой отмечалось [122] снижение дробления щебня под шпалой на 20-30% и, как следствие, снижение числа осадок пути на 30-35%. Согласно результатам исследований Мюнхенской лаборатории [122], применение упругой подшпальной прокладки приводит к повышению среднего значения сопротивления поперечному сдвигу железобетонной шпалы В06 FS в балласте с 10,9 Н/мм до 14,8 Н/мм.

В исследовании [123] была определена область применения упругих подшпальных прокладок – зона рельсовых стыков, срок окупаемости их устройства – около 2 лет. Однако ликвидация стыков сваркой принесёт большой

экономический эффект без дополнительных затрат на устройство подшпальных прокладок [28].

Было отмечено [124], что «повышение надёжности шпал путём замены цементного бетона другим конструкционным материалом» позволяет преодолеть недостатки железобетонных шпал. В авиастроении, других областях науки и техники широко применяются композитные материалы, особенность которых состоит в том, что определённое сочетание исходных материалов позволяет получить эффект создания нового материала, свойства которого уже отличаются от свойств каждого из его составляющих.

Для применения в железнодорожном пути разрабатывались древесно-композитные подрельсовые опоры, полимербетонные и железобетонные, покрытые полимерным слоем, шпалы из полимерных композитов.

Древесно-композитные представляют собой деревянные шпалы с полимерным покрытием, клееные слоистые шпалы, и шпалы, созданные из смеси древесных волокон или стружек с полимерными вяжущими [125].

Деревянные шпалы, покрытые полимерным слоем, защищены от повышенной влажности, не подвержены гниению и растрескиванию, не повреждаются насекомыми, полимерное покрытие уменьшает механический износ шпал под подкладкой [125].

Были разработаны шпалы, изготавливаемые из продуктов деревообработки и полимерного связующего [126], [127], [128] многослойные конструкции, состоящие из определённого числа продольных слоёв-досок, склеенных между собой специальным составом, и дополнительно обвязанных металлическими хомутами [129], [130].

Древесно-композитные шпалы не получили распространения ввиду определённого в МПС РФ направления на переход к железобетонным шпалам [130].

Была разработана массивная шпала из полимербетона, армированного стекловолокном [131], имеющая при своих значительных размерах массу равную 61 кг (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Усиленные стекловолокном полимербетонные шпалы [132]

Форма и поперечное сечение шпалы должны обеспечивать повышенное сопротивление сдвигу в балласте [132]. Для повышения сопротивления продольным и поперечным сдвигам, уменьшения жесткости пути предлагались железобетонные шпалы, покрытые слоем вторичного пластика и переработанной резины [133].

Разработка шпал из полимерных композиций на железных дорогах мира проводится с 80-х годов прошлого века [134]. Преимуществами композитных шпал являются невысокая стоимость и возможность полной переработки, большая износостойкость чем у деревянных шпал, и трещиностойкость чем у железобетонных [135]. Диэлектрические свойства композитного состава шпал позволяют отказаться от применения в пути самых ненадёжных элементов промежуточных рельсовых скреплений – изолирующих прокладок, уголков, вкладышей, втулок [136], [137].

Известны шпалы [138], [139], изготовленные из вторично переработанных композиционных материалов, физико-механические свойства которых (предел прочности на сжатие, на растяжение, удельное электрическое сопротивление, сопротивление выдёргиванию шурупа) превосходят требования к деревянным шпалам и требования западных стандартов, применяемых за рубежом к композитным шпалам. В исследовании [125] сопротивление поперечному сдвигу композитных шпал в балласте оказалось выше, чем у деревянных шпал на 40-60%.

Повышенное сопротивление поперечному сдвигу композитных шпал в балласте было отмечено и в ходе испытаний АО «ВНИИЖТ» (рисунок 3.10) [139].

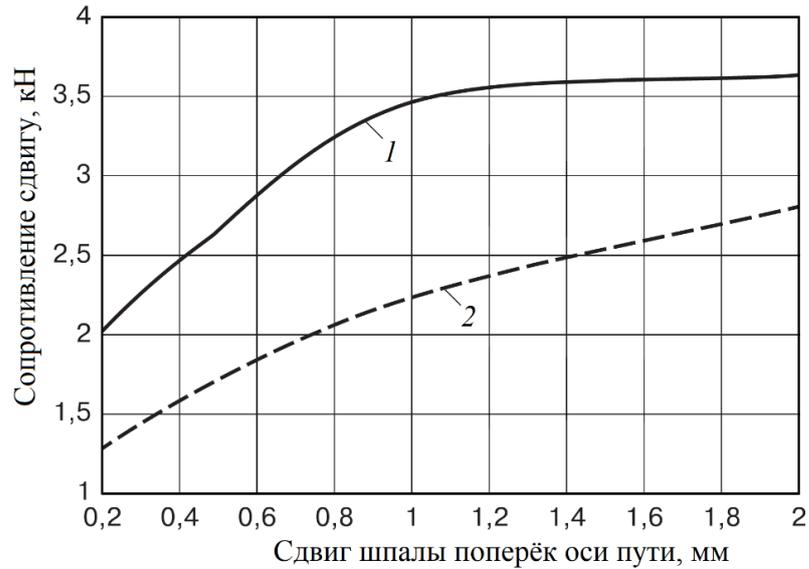


Рисунок 3.10 – График сопротивления сдвигу в балласте композитных – 1 и деревянных – 2 шпал [139]

В настоящее время на сети железных дорог Японии применяются мостовые брусья только из композитных материалов [134], где в качестве материала применяется армированный стекловолокном полиуретан [140].

Отмечено [141], что при первоначальных затратах на устройство мостовых брусьев из армированного стекловолокном полиуретана в 1,35-1,55 раз больших относительно деревянных их срок службы в 2-4 раза выше, а трудозатраты на устройство и содержание ниже, благодаря отсутствию необходимости в антисептировании и меньшему износу под подкладками промежуточных скреплений [142].

Недостатками существующих композитных шпал является большая стоимость относительно деревянных, изменение упругих свойств при низких температурах, восприимчивость композитов на основе полиэтилена к ультрафиолету, необходимость применения промежуточных скреплений на клиновидных подкладках для создания подуклонки рельсовых нитей [137]. В настоящее время за рубежом композитные шпалы укладываются на железнодорожных путях со скоростями движения менее 80 км/ч и годовой

грузонапряжённостью менее 50 млн. т. брутто /км, ещё нет сведений о безопасности их применения на путях 1-3 классов.

АО «ВНИИЖТ» были проведены испытания шпал из полимерной композиции [139], выполненных в виде бруса постоянного поперечного сечения, аналогичного по размерам деревянной шпале I типа. При опытной эксплуатации композитных шпал в действующем пути на Северной железной дороге при температурах воздуха ниже  $-20^{\circ}\text{C}$  и опирании шпал на балласт центральной частью были отмечены их изломы, вызванные резким изменением модуля упругости композитного материала [143].

Повышению сопротивления сдвигу в балласте и стабильности пути может способствовать придание композитным шпалам трапецеидальной формы [144]. Преимуществом такой формы и поперечного сечения композитной шпалы является то, что при равной массе композитного материала со шпалой брусковой формы возрастает площадь опирания на балласт, при этом прочность шпалы на изгиб  $EI$ , остаётся неизменной поскольку осевые моменты инерции шпал с поперечным сечением в виде прямоугольника и трапеции будут равными (рисунок 3.11) [145].

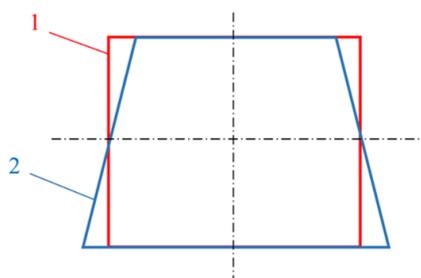


Рисунок 3.11 – Поперечное сечение брусковой шпалы (1) и трапецеидальной (2)

За счет постоянного по длине поперечного сечения композитные шпалы описанной формы могут изготавливаться на существующих производствах при минимальных затратах на замену пресс-форм без изменения стандартной технологии производства композитных шпал, включающей в себя входной контроль сырья, сортировку, измельчение, приготовление смеси компонентов, нагрев, прессование, охлаждение и выдавливание из пресс-форм.

### 3.3 Выводы по третьей главе

Проведенными при учёте воздействия проходящих поездов и фактора времени опытами влияние массы шпал на сопротивления сдвигу в балласте не подтверждается, поскольку в этом случае имеет место зависимость силы сопротивления от скорости перемещения, что соответствует закону вязкости Ньютона. Высокая масса рельсошпальной решетки по закону Кулона способствует сопротивлению продольным  $r$  и поперечным  $q$  сдвигам, но при отсутствии проходящих поездов. Повышенное погонное сопротивление в статике может иметь положительные стороны, связанные, например, с повышением надёжности работы анкерных участков, но это возможно только в том случае, если промежуточными скреплениями обеспечивается большее сопротивление сдвигу рельсов относительно шпал, чем сопротивление самого балласта. В то же время сила прижатия рельса к шпале также, как и погонное сопротивление балласта является случайной величиной с большой дисперсией.

Блочные, плитные и рамные конструкции верхнего строения пути обладают высоким сопротивлением продольному и поперечному сдвигу. Однако, практика применения данных конструкций в СССР показала, что за счет зазоров между плитами при сотрясении проходящими поездами и знакопеременном воздействии температурных сил блоки «ползут» вдоль и поперек оси пути.

Шпалы из композиционных материалов, обладают такими преимуществами как упругость, небольшой вес, высокое электрическое сопротивление, стойкость к ударам, большее сопротивление поперечному сдвигу в балласте. Но в настоящее время они не могут заменить железобетонные шпалы в бесстыковом пути во всех климатических и эксплуатационных условиях, ввиду разрушающего действия на материалы шпал, в основе композиции которых имеется полиэтилен, ультрафиолета и низких температур.

## **4 ОБЕСПЕЧЕНИЕ НЕОБХОДИМОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ БЕССТЫКОВОГО ПУТИ**

### **4.1 Проблемы ввода рельсовых плетей в установленный температурный режим работы**

Внедрение рельсовых плетей неограниченной по максимуму длины позволяет исключить уравнильные пролеты. При этом объём работ, выполняемых ранее по их обслуживанию (замене уравнильных рельсов, содержанию стыков, перезакреплению концевых участков рельсовых плетей) может быть перераспределён на работы по выправке пути и содержанию промежуточных скреплений.

Замена уравнильных рельсов в зимний период на удлинённые была рекомендована [146], [4] только для дорог «с суровым климатом», но работа проводилась на всех дорогах. В зимнее время из-за предельного раскрытия зазоров в некоторых случаях замена уравнильных рельсов на удлинённые может потребоваться до шести раз [147]. При наличии на дистанции пути большого количества коротких плетей своевременная замена рельсов становится затруднительной: в зимний период стыковые болты начинают работать на срез, при потеплении весной возникает торцевое давление в стыках и/или образование на концевых участках напряженных неровностей в плане. Безопасная замена «зажатого» уравнильного рельса возможна только его вырезкой при соблюдении строгой последовательности [148]. Однако обратная замена удлинённых рельсов в весенний период в нормативных документах [4] не предусмотрена.

После окончания зимнего периода требуется не только замена удлинённых рельсов, но и перезакрепление концевых участков, имеющих длину до 400 м [149]. Поэтому обеспечить надёжность работы бесстыкового пути проще при применении рельсовых плетей длиной до перегона и более [78].

Для исключения работы стыковых болтов на срез предлагается [4] применение, особенно в северных регионах, высокопрочных болтов. Но применение высокопрочных болтов повышает вероятность возникновения острых

дефектов рельсов 53.1, 55.1 – трещин, проходящих через болтовые отверстия [54], [150]. При затяжке высокопрочных болтов в зимний период при максимальном раскрытии зазора, при потеплении его уменьшение не произойдет вовсе или будет происходить значительно медленнее, что приведёт к возникновению сжимающей силы на конце плети с дальнейшим образованием напряженной неровности [54]. В издании [12] указано: «если за счёт сильного сжатия накладок создать очень большое стыковое сопротивление, то может оказаться такое положение, когда при нагревании наступает нарушение устойчивости пути, а изменение зазора всё ещё не происходит».

В статике длина конечного участка рельсовой плети определяется:

$$l_k = \frac{F_t - R_c}{r}, \quad (4.1)$$

где:  $F_t$  – продольная температурная сила, кН;

$R_c$  – сопротивление стыка, кН;

$r$  – погонное сопротивление балласта продольному сдвигу шпалами, кН/м.

Выражение (4.1) справедливо при рассмотрении напряжённо-деформированного состояния бесстыкового пути в течение малого промежутка времени (суток).

Если представить изменение продольной силы  $dF$  на некотором участке  $dx$  возникнет погонное сопротивление  $r$  (рисунок 4.1).

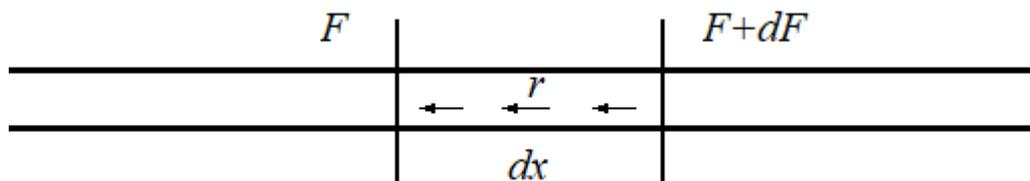


Рисунок 4.1 – Изменение продольной силы на некотором участке

$$F + dF - F = r dx \quad (4.2)$$

Градиент продольной силы равен:

$$r = \frac{dF}{dx} \quad (4.3)$$

Закон Гука в дифференциальной форме:

$$F = E\omega \frac{d\lambda}{dx} \quad (4.4)$$

Погонное сопротивление, записанное в форме уравнения теплопроводности:

$$r = k \cdot \frac{d\lambda}{d\tau} \quad (4.5)$$

Продифференцировав по  $x$  левую и правую части (4.3) получим:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \frac{\partial r}{\partial x} \quad (4.6)$$

Дифференцировав (4.4) по  $\partial\tau$  получим:

$$\frac{\partial F}{\partial \tau} = E\omega \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x \partial \tau} \quad (4.7)$$

Дифференцировав (4.5) по  $x$  получим:

$$\frac{\partial r}{\partial x} = k \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x \partial \tau} \quad (4.8)$$

Исключая  $\frac{\partial r}{\partial x}$  из (4.6) и (4.8) получаем:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = k \frac{\partial^2 \lambda}{\partial x \partial \tau} \quad (4.9)$$

Разделив левую и правую части (4.7) на  $E\omega$  и подставив в (4.9) получим дифференциальное уравнение изменения продольных сил в динамике:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = N^2 \frac{\partial F}{\partial \tau} \quad (4.10)$$

При длительном воздействии продольной сжимающей силы следует воспользоваться одним из решений дифференциального уравнения изменения продольных сил (4.10) при заданных граничных условиях:

$$F(x, \tau) = F_0 \operatorname{erf}\left(\frac{Nx}{2\sqrt{\tau}}\right), \quad (4.11)$$

где:  $N = \sqrt{\frac{K}{E\omega}}$  – коэффициент относительной вязкости балласта вдоль оси пути,  $\text{м}^{-1}\text{с}^{1/2}$ ;

$\tau$  – время, с.

Продольная сила, перемещение рельсовой плети, а также длина конечного участка зависят от времени. Если принять  $F_0 = \text{const}$ , то закон изменения продольной силы  $F$  на конечном участке рельсовой плети с течением времени  $\tau$  можно представить в виде графика (рисунок 4.2).

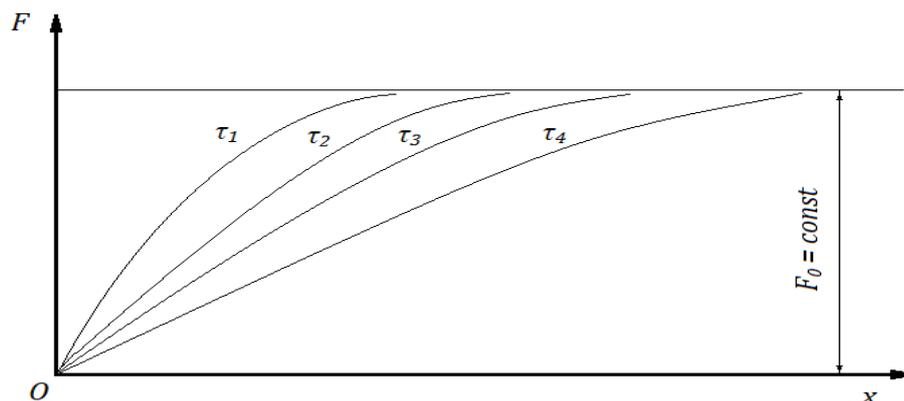


Рисунок 4.2 – Закон изменения  $F(x, \tau)$  на конечном участке рельсовой плети.

При рассмотрении рельсовых плетей длиной до 1000 м И. Хошино [151] было отмечено удлинение в весенний и летний период по всей их длине. При понижении температуры осенью и зимой укорочение рельсовых плетей также происходило на всём их протяжении. Сезонные удлинения и укорочения коротких рельсовых плетей (до 800 м) на всем их протяжении с соответствующим изменением температуры их закрепления были зафиксированы В.А. Несвитом [152] при наблюдениях за перемещениями 12 рельсовых плетей длиной до 800 м. Закон изменения продольных сил наглядно показывает, что при эксплуатации бесстыкового пути продольные температурные перемещения с течением времени тем быстрее достигнут середины и затронут всю плеть, изменив её температуру закрепления, чем короче рельсовая плеть.

При суточных колебаниях температуры согласно [6] будут иметь место синусоидальные колебания перемещений рельсовой плети по её длине. Данные колебания выражаются уравнением, отражающим закон изменения продольных перемещений при колебаниях температуры на конце рельсовой плети:

$$\lambda(x, \tau) = \lambda_0 \exp\left(-N\sqrt{\frac{\theta}{2}}x\right) \sin\left(\theta\tau - N\sqrt{\frac{\theta}{2}}x\right) \quad (4.12)$$

законом изменения продольных сил при колебаниях температуры на конце рельсовой плети:

$$F(x, \tau) = F_0 \left[ \sin\theta\tau - \exp\left(-N\frac{\theta}{2}x\right) \sin\left(\theta\tau - N\frac{\theta}{2}x\right) \right], \quad (4.13)$$

где:  $\theta = \frac{2\pi}{\tau}$  – частота колебаний;

На графиках (рисунки 4.3, 4.4) отражен результат решения (4.12) и (4.13) при значениях  $\tau$ , подобранных через интервал времени, равный четверти периода.

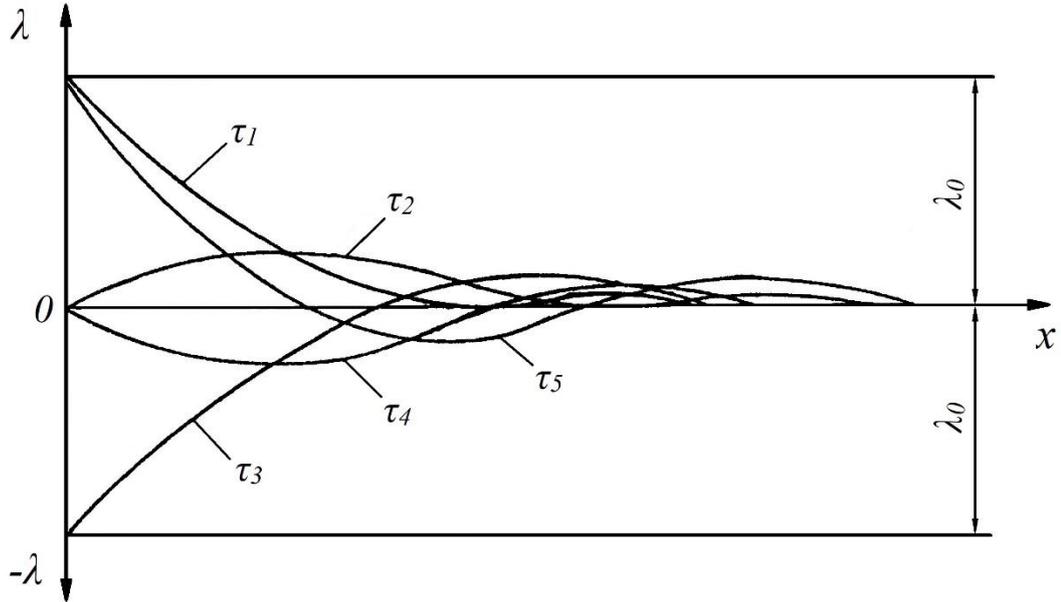


Рисунок 4.3 – Закон изменения продольных перемещений  $\lambda(x_i, \tau_i)$  на конце рельсовой плети при  $\lambda = \lambda_0 \sin\theta\tau$  [64]

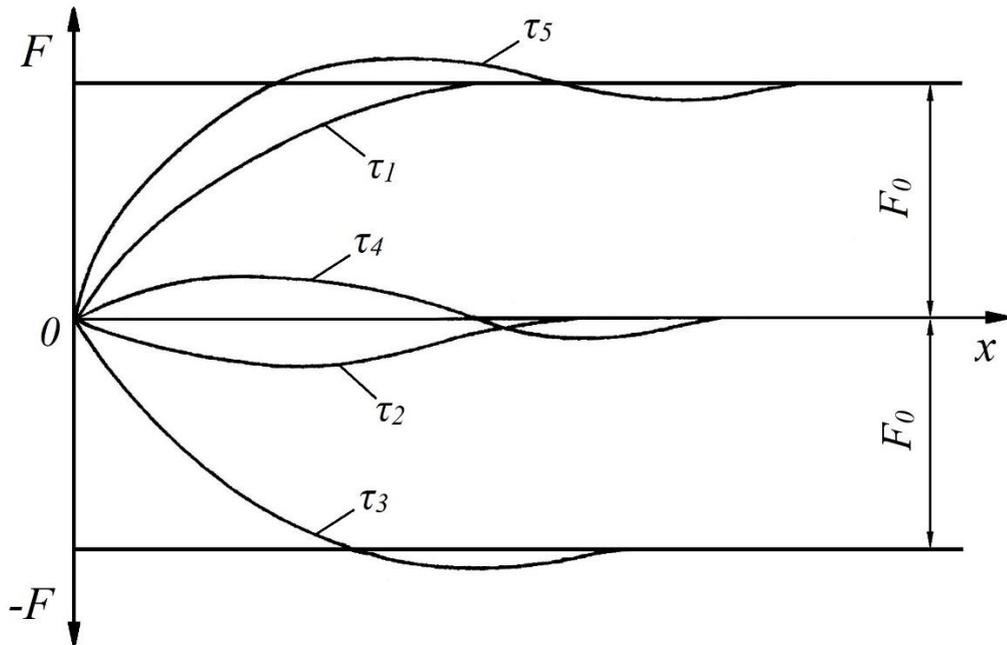


Рисунок 4.4 – Закон изменения продольной силы  $F(x_i, \tau_i)$  на конце рельсовой плети при  $F = F_0 \sin\theta\tau$  [64]

Длина волны продольных перемещений и продольных сил может быть вычислена из (4.12) и (4.13) и составляет:

$$L_B = \frac{2,86\pi}{N\sqrt{\theta}} = \frac{2\sqrt{\pi t_c}}{N} \quad (4.14)$$

Величина коэффициента относительной вязкости  $N$  может быть определена экспериментально по описанной во второй главе методике с установкой вкладыша и проведением измерений в специально оборудованных створах (рисунок 2.12) через 20-40 м по длине плети. По величине запаздывания  $\Delta\tau_i$  (рисунок 2.14) можно определить  $N$  из выражения (2.6).

Расчеты с использованием зависимости (4.13) свидетельствуют о том, что длина концевых участков рельсовых плетей бесстыкового пути теоретически должна считаться бесконечной, но если ограничиться практически значимыми величинами продольных перемещений, то при учете сезонных колебаний температуры рельсов, эту длину следует считать для регионов России с относительно мягким климатом до 200 м, а с более суровым – до 400 м.

По результатам этих расчетов на участках, где рельсовые плети имеют длину равную протяженности перегона, следует рекомендовать сезонное перезакрепление концевых участков рельсовых плетей бесстыкового пути с заменой уравнительного рельса.

Перезакрепление рельсовых плетей является достаточно трудоёмкой работой при текущем содержании пути, при этом трудозатраты будут повышаться при увеличении разности фактической температуры рельсов и необходимой температуры закрепления. Если перезакрепление производится при температуре рельсов, находящейся в диапазоне установленной для данной дороги, то выполняется, так называемая, «разрядка температурных напряжений» [4]. На участке проведения работ закрывается движение поездов, производится сплошное раскрепление плети, установка подвесных роликов, опорных роликов или полиэтиленовых пластин, контроль перемещений на каждом 50-м участке, закрепление плети.

Поскольку производство перезакрепления при естественной температуре рельсов соответствующей установленной температуре закрепления рельсовых плетей по вероятности составляет относительно малую долю рабочего времени, то для введения рельсовых плетей в установленный температурный режим применяют нагревательные или натяжительные устройства, или совместно натяжительные и нагревательные. В действующей Инструкции предполагается в основном применение гидравлических натяжных устройств (ГНУ) с использованием анкерных участков (АУ).

При вводе рельсовых плетей в установленный температурный режим с помощью ГНУ предполагается несколько вариантов. Длина АУ  $l_{ан}$  в статике определяется, как величина создаваемой ГНУ продольной силы в рельсе  $F_t$ , делённой на погонное сопротивление балласта продольным перемещениям шпал  $r$ :

$$l_{ан} = \frac{F_t}{r}. \quad (4.15)$$

При этом при расчёте длины АУ со стороны подвижного конца рельсовой плети учитываются также усилия  $F^*$ , необходимые для преодоления сопротивления перемещению плети:

$$l_{ан} = \frac{F_t + F^*}{r} \quad (4.16)$$

В расчетах бесстыкового пути использовали среднее значение погонного сопротивления несмёрзшегося балласта вдоль оси пути от 6,5 кН/м [89] до 13 кН/м на обе рельсовые нити (на шпалу) [33]. Однако нормативными документами [4] принято погонное сопротивление сдвигу рельсошпальной решетки по одной рельсовой нити в уплотненном балласте равное 12 кН/м, а в неуплотненном – 7 кН/м, то есть 24 кН/м и 14 кН/м соответственно на обе рельсовые нити. Ранее указывалось максимальное значение  $r = 9,6$  кН/м уплотнённого балласта на две рельсовые нити при деревянных шпалах [37]. Данная величина погонного сопротивления была подтверждена в результате комплексных исследований лаборатории бесстыкового пути ВНИИЖТ [5], среднее значение сопротивление железобетонных шпал принималось  $r = 10$  кН/м на две нити [114]. Заявленное [4] значение  $r$  оказывается завышенным в 2-3 раза [153], [89].

Приняв в расчет среднее значение  $r = 10$  кН/м на две рельсовые нити (рельсы типа Р65) всего лишь при  $\Delta t = 20$  °С получим необходимую длину АУ не менее 85 м. В расчёт должно браться по вероятности минимальное значение погонного сопротивления балласта продольному сдвигу шпалами, иначе, как отмечалось ранее, сопротивление отдельных шпал будет преодолено. Произойдет продольное перемещение рельсовых плетей, сопровождающееся перекосом отдельных шпал и взбугриванием балласта в их шпальных ящиках.

В Инструкции [4] для повышения погонного сопротивления, обеспечения неподвижности АУ предлагается введение дополнительных мер, включающих динамическую стабилизацию пути. Но при всех типах скреплений, применяемых на железных дорогах, при высоких значениях продольной силы и погонного сопротивления велика вероятность остаточных деформаций упругих клемм, в связи с чем произойдет перемещение рельсовых плетей значительно большее чем по расчету, рекомендуемому в [4], то есть произойдет срыв АУ. В местах проведения работ с применением ГНУ и АУ будут созданы места с пониженной температурой закрепления рельсовых плетей, не отмеченные в Журналах учёта службы и температурного режима. На этих участках воздействию подвижного состава, повышении температуры рельсов, ослаблении связи рельсошпальной решётки с балластной призмой будет наблюдаться ускоренное развитие напряжённых неровностей пути в плане [26].

Натяжение рельсовых плетей ГНУ должно производиться одновременно двумя натяжителями, поскольку при использовании одного ГНУ для последовательного натяжения одной, а затем другой плети нагрузка от рельсов на шпалы в АУ передаётся только на одну сторону, что также будет приводить к кантованию и перекосу шпал [153].

Применение пары ГНУ для натяжения сначала одной половины плетей (вторые половины являются АУ), а затем второй (первые половины являются анкерными участками) позволяет при вводе рельсовых плетей в установленный температурный режим задействовать достаточно протяжённый АУ. В этом случае если длина плети составляет не менее 600 м даже при невысоком значении

погонного сопротивления 5 кН/м на шпалу вероятность перекоса шпал, деформации упругих клемм и срыва АУ минимальна.

При встречном натяжения соседних полуплетей посредством пар ГНУ появляется возможность ликвидации уравнительного пролёта сваркой концов полуплетей, которая может быть проведена алюминотермитным способом [154].

Предлагались способы ввода рельсовых плетей в установленный температурный режим осевым натяжением рельсов при их подъёме захватными устройствами путевых машин [155], [156]. Этими способами предполагалось непосредственно перед машиной производить раскрепление рельсовых плетей на шпалах и при проходе машины, поднимать рельсовые плети на расчетную высоту, создавая в них растягивающую силу, определяемую разницей кривой её изгиба и хорды, а следом за машиной производится закрепление рельсовых плетей. Для повышения температуры закрепления на 10 °С необходимо, чтобы каждые 50-метровый участки плети удлинились на 6 мм, соответственно для плети длиной 800 м общее удлинение составит 96 мм. Подставив данное удлинение в формулу разницы кривой и хорды, получим необходимую высоту подъёма рельсовых плетей равную 1 м на длине 25 м. Существующими путевыми машинами невозможно повысить температуру закрепления плетей более чем на 10 °С, поэтому данный способ принудительного ввода рельсовых плетей уступает применению натяжительных и нагревательных установок.

Большинство применяемых на железных дорогах современных ГНУ развивают продольное усилие 700-730 кН, позволяющее производить натяжение рельсовых плетей длиной до 1200 метров с созданием температурной компенсации 25°С. Это гидравлическое устройство КЖДМ-70 производства Армавирского завода железнодорожного машиностроения, устройство УГ70В/400, имеющее в своей конструкции специальную арку для крепления рельсосверлильных и рельсорезных станков, натяжитель Р700. Натяжители НРП 63-05, НРПЭ 63-05 обладают меньшим усилием, развиваемым по длине рельса, равным 63 тс (около 617 кН), УГН75В – 62 тс (608 кН).

Нагревательные установки имеют преимущества перед натяжителями, заключающееся в большем диапазоне рабочих температур и отсутствии необходимости устройства АУ [157]. Если применение ГНУ ограничено температурой не менее +5 °С (при закреплении плетей на температуру 30°С), то нагревательные установки практически не ограничены разностью температур. Нагревательные установки на основе конструкции инженера Зубова для принудительного ввода рельсовых плетей в установленный температурный режим путём нагрева направленным на рельсы пламенем получили распространение на большинстве дорог. При нагреве температуру рельсов измерять не требуется, а контроль удлинения каждого 50 м участка ведётся по смещениям рисок на подошвах рельсов, относительно постоянных точек на шпалах. Работа с нагревательной установкой Зубова часто требует дополнительного воздействия на перезакрепляемую рельсовую плеть ударного механизма с клиновым упором [158]. Недостатком нагревательной установки Зубова является вероятность оплавления резино-кордовых прокладок, полимерных изолирующих втулок и уголков промежуточных рельсовых креплений открытым пламенем [159]. Предотвратить оплавление данных элементов крепления возможно их демонтажем перед нагревом, однако если изолирующие уголки АРС-4, боковые полимерные упоры крепления ЖБР-65 могут быть относительно легко изъяты, то сплошное снятие и установка подрельсовых прокладок имеет высокую трудоёмкость и не может быть рекомендовано.

В России были разработаны машины индукционного нагрева рельсовых плетей в установленный температурный режим МИН-1 Хабаровского ОКБ, МНРП производства ОАО «Калугапутьмаш». Заявленный диапазон допускаемых температур работы машин составляет от -20 до +50 °С. Индукционный нагрев возможно позволит исключить оплавление неметаллических деталей промежуточных креплений.

## 4.2 Обоснование уточнённых границ температурного интервала закрепления рельсовых плетей

В температурно-напряжённой конструкции бесстыкового пути кромочные напряжения в рельсовых плетях суммируются с напряжениями от продольной температурной силы, поэтому определение необходимого температурного интервала закрепления рельсовых плетей, обеспечение прочности рельсовых плетей требует рассмотрения. Верхний предел температурного интервала закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути ранее определялся суммой кромочных и температурных напряжений с учётом коэффициента запаса, которая должна быть меньше допускаемого напряжения в рельсе по условию прочности. Техническими указаниями по устройству, укладке и содержанию бесстыкового пути 1991 года [160] допускаемые напряжения для новых рельсов повышены с 350 до 400 МПа что способствовало повышению верхнего предела интервала закрепления рельсовых плетей на 20 °С. Наибольшее допускаемое понижение температуры рельсов по сравнению с температурой закрепления плетей по условию прочности рельсов  $\Delta t_p$  стало превышать максимальную из максимальных температур рельсов для большинства регионов России.

Исследованиями механических характеристик рельсов стандартного производства [161] был определен минимальный предел величины условного предела упругости равный 470 МПа для нетермоупрочнённых рельсов, пропустивших нормативный тоннаж. В настоящее время на железных дорогах России применяются рельсы по ГОСТ Р 51685-2013 [162], при этом минимальный предел текучести рельсов, укладываемых на главных путях 1-3 классов составляет не менее 800 МПа [163], а величина временного сопротивления превышает 1000 МПа.

Таблица 4.1 – Физико-механические свойства рельсов Р65 [162]

Категория рельсов	Временное сопротивление, $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, $\delta$ , %	Относительное сужение, $\psi$ , %	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
ОТ370ИК	1280	870	8,0	20,0	15
ДТ370ИК			9,0	14,0	
ОТ350 ОТ350НН ОТ350СС	1180	800	8,0	25,0	25
ДТ350 ДТ350НН ДТ350СС ДТ350ВС	1180	800	9,0	25,0	15
НТ320 НТ320ВС	1080	600	9,0	—	—
НТ300	980	510	8,0	—	—
НТ260	900	500	8,0	—	—

М.Ф. Вериге [85] указывал, что в случае принятия величины 470 МПа методика теряет практическое регламентирующее значение, поскольку фактически верхней границы расчётного интервала закрепления плетей по условию прочности уже не существует. В работе [164] также указано, что по предельному состоянию (названому авторами разовой прочностью) путь имеет достаточный запас, позволяющий компенсировать собственные и поездные нагрузки и, в большинстве случаев, температурные напряжения в бесстыковых плетях.

Расчет рельсовых плетей на прочность основан на одновременном действии температурных и кромочных напряжений, сумма которых не должна превышать допусковое значение [165]. В соответствии с допущением о том, что максимальная сила случайна, в 0,6% случаев она может превысить взятое в расчет значение:

$$P_{\max} = P_{\text{ср}} + \lambda S, \quad (4.17)$$

где  $P_{\text{ср}}$  – среднее значение нагрузки колеса на рельс, кН;

$\lambda$  – нормирующий множитель, приводящий максимальное значение расчетной силы к величине, вероятность непревышения которой составляет 0,994 при  $\lambda = 2,5$ ;

$S$  – суммарное среднее квадратичное отклонение дополнительных динамических сил, кН.

Суммарное среднее квадратическое отклонение от композиции всех динамических сил в соответствии с теорией вероятности:

$$S = \sqrt{S_p^2 + S_{нп}^2 + 0,95S_{ннк}^2 + 0,05S_{инк}^2} \quad (4.18)$$

Среднее квадратическое отклонение каждой из дополнительных динамических сил зависит от:

- колебания рессор

$$S_p = 0,08 \cdot P_p; \quad (4.19)$$

- наличия неровностей в пути

$$S_{нп} = 0,179 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha_1 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \varepsilon \cdot l \cdot V \cdot P_{ср} \sqrt{\frac{Uq_k}{K}} \quad (4.20)$$

- наличия непрерывных неровностей на колесах

$$S_{ннк} = \frac{0,052\alpha_0 UV^2 \sqrt{q_k}}{d^2 \sqrt{10Uk - 326k^2 q_k}}; \quad (4.21)$$

- наличия изолированных неровностей на колесах

$$S_{инк} = 0,05 \xi_g e_0 \alpha_0 \frac{U}{K}, \quad (4.22)$$

где  $\alpha_0$  – отношение массы колеса к суммарной массе колеса и пути;

$\alpha_1$  – коэффициент, учитывающий влияние величины колеблющейся массы пути на железобетонном подрельсовом основании по сравнению с путем на деревянных шпалах;

$\varepsilon$  – коэффициент, влияния материала рельсовых опор на уклон динамической неровности пути (для деревянных шпал  $\varepsilon = 1$ , а для железобетонных  $\varepsilon = 0,322$ );

$\beta$  – коэффициент, учитывающий тип рельсов (для Р65  $\beta = 0,87$ , для Р50  $\beta = 1$ );

$\gamma$  – коэффициент, учитывающий влияние рода балласта на образование динамической неровности на пути (для щебня  $\gamma = 1$ ).

$l$  – расстояние между осями шпал, м;

$V$  – скорость движения поезда, м/с;

$d$  – диаметр колеса по кругу катания, м.

$e_0$  – расчетная глубина изолированной неровности на колесе, принимаемая равной для локомотивов и мотор-вагонного подвижного состава при подшипниках качения 0,047 см, а при подшипниках скольжения – 0,067 см;

$\xi_q$  – дополнительный максимальный прогиб рельса, отнесенный к единице глубины неровности, максимальное его значение равно 1,47.

В основу расчета прочности рельсовых плетей бесстыкового пути положено условие, при котором сумма напряжений, возникающих в рельсе от воздействия подвижного состава  $\sigma_k$ , с учетом коэффициента запаса прочности  $k_n$  и в результате изменения температуры  $t$  не должна быть более допускаемого напряжения  $[\sigma]$ , т. е.

$$k_n \cdot \sigma_k + \sigma_t < [\sigma], \quad (4.23)$$

где  $k_n$  – коэффициент запаса прочности;

$\sigma_k$  – напряжение в кромке подошвы рельса от поездной нагрузки;

$\sigma_t$  – растягивающее напряжение в рельсе, вызванное понижением его температуры по сравнению с температурой закрепления, МПа;

$[\sigma]$  – допускаемое напряжение при совместном воздействии поездной нагрузки и температуры, МПа.

Проведём расчёт динамических сил в бесстыкового пути для участка Ростовской дистанции пути по исходным данным: тип рельса Р65, износ 12 мм, скрепление КБ-65, шпалы железобетонные установленной эпюры, балласт щебёночный фракции 25-60, подвижной состав – электровоз ВЛ80к, жесткость рессор которого 1,52 МН/м, конструкционная скорость 110 км/ч, статическая нагрузка колеса на рельс – 115 кН.

$$S_{\text{нп}} = 0,179 \cdot 10^{-6} \cdot 0,843 \cdot 0,87 \cdot 1 \cdot 0,322 \cdot 55 \cdot 110 \cdot 140,65 \cdot \sqrt{\frac{150 \cdot 27,6}{0,001585}}$$

$$= 58,13 \text{ кН}$$

Подставив в выражение (4.18) полученные средние квадратические отклонения получим суммарное:

$$S = \sqrt{2,74^2 + 58,13^2 + 0,95 \cdot 2,5^2 + 0,05 \cdot 2,69^2} = 58,25 \text{ кН}$$

При расчёте суммарного среднего квадратического отклонения от всех динамических сил  $S$  для участка пути с указанными параметрами при конструкционной скорости электровоза 110 км/ч получено, что на долю  $S_{нп}$  приходится 99,8%. Неровности пути в данном расчёте практически полностью определяют динамические силы.

В расчет среднеквадратического отклонения динамической силы, вызванной неровностями пути  $S_{нп}$ , коэффициент  $\alpha_1$ , учитывающий влияние величины колеблющейся массы пути на железобетонных шпалах принимается меньше, чем на пути с деревянными. Влияние материала шпал на образование неровности учитывается коэффициентом  $\epsilon$ , принимающимся для деревянных шпал равным 1, для железобетонных – 0,322. Однако данные значения коэффициента  $\epsilon$  справедливы только в случае, если на деревянных шпалах уложен звеньевой путь, а на железобетонных – бесстыковой, поскольку звеньевой путь на железобетонных шпалах интенсивнее других конструкций пути накапливает неупругие деформации. Влияние типа рельсов на образование неровностей на пути учитывает коэффициент  $\beta$ , принимаемый для рельсов Р50 – 1, для Р65 – 0,87.

Полученные при расчёте результаты входят в противоречие с законами классической механики: при существенно большей массе рельсошпальной решетки на железобетонных шпалах с рельсами Р65 влияние колеблющейся массы пути получается меньшим, чем на пути с рельсами Р50 на деревянных шпалах [166], [167].

В работе [166] было отмечено, что в утверждённой методике расчёта рельсов на прочность не учитывается один из главных факторов – неровности подрельсового основания [167]. Рельс под поездной нагрузкой прогибается, описывая конфигурацию неровности подрельсового основания, которая может быть выражена синусоидой (рисунок 4.5):

$$y = \frac{f}{2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi x}{l} \right) \approx f \sin^2 \frac{\pi x}{l} \quad (4.24)$$

Максимальная кривизна неровности составляет:

$$\frac{1}{\rho} = y'' = \frac{M}{EI} \quad (4.25)$$

где:  $\rho$  – радиус кривизны;

$y''$  – вторая производная выражения (4.24);

$M$  – изгибающий момент;

$E$  – модуль упругости рельсовой стали;

$I$  – момент инерции рельса относительно горизонтальной нейтральной оси.

Кромочные напряжения определяются по формуле:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{Mz}{I} \quad (4.26)$$

где  $z$  – расстояние от нейтральной оси до кромки рельса.

Дифференцировав дважды выражение (4.24) для точки с максимальной кривизной, где  $x = l/2$ , получим:

$$\sigma = \frac{Ez}{\rho} = \frac{2\pi^2 f Ez}{l^2} \quad (4.27)$$

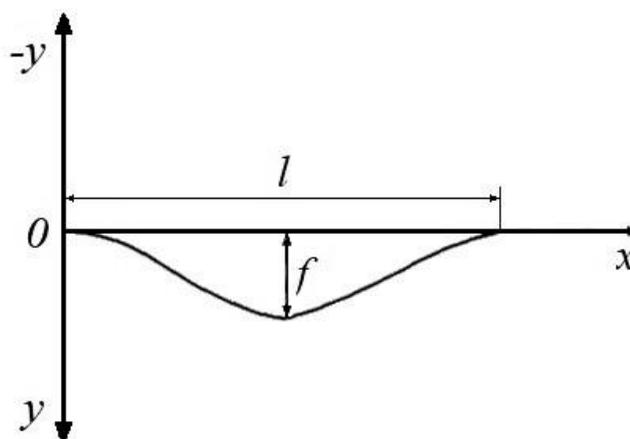


Рисунок 4.5 – Ось рельса, описывающая конфигурацию неровности пути под вертикальной нагрузкой

Экспериментальными исследованиями [168] максимальных величин напряжений в наружной кромке подошвы рельсов при различных значениях осевых нагрузок, скоростей движения, радиусов кривых, конструкции и состояния подвижного состава и пути были получены максимальные значения 180-190 МПа [169]. Бесстыковой путь имеет более чем двукратный запас прочности, так как сумма напряжений, возникающих в рельсе от воздействия подвижного состава, и в

результате изменения температуры не превысит допустимого условного предела текучести термоупрочнённых рельсов [169].

Излом рельса в зимний период может наступить только по причине дефектности рельсов. В связи с этим верхняя граница расчётного температурного интервала закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути ограничена прочностью стыковых болтов в уравнильных пролетах и допускаемой величиной зазора в случае излома плети при низких температурах.

В [4] приведены формулы, по которым предлагалось определять величину зазора при изломе рельсов бесстыкового пути и в стыках на конце рельсовых плетей. Для рельсов Р65:

$$\lambda_{P65} = 0,24 \frac{\Delta t_p^2}{r} \quad (4.28)$$

По этим формулам была определена «температура закреплению плети  $t_z$ , °С, при которой обеспечивается прочность стыковых болтов в районах с минимальными температурами, °С» (Таблица П. 6.3 [4]), но диапазон температур рельсов в таблице соответствует всем климатическим зонам России. Рекомендуемым значением погонного сопротивления  $r$  при смёрзшемся балласте является 25 Н/мм на одну рельсовую нить, что завышено по сравнению с реально существующими значениями (не более 14 кН/м на 2 рельсовые нити) [170].

Приведенные в [4] формулы для определения зазоров позволяют получить искомое значение в случае первого понижения температуры рельсовых плетей после их закрепления. При последующих неоднократных знакопеременных изменениях температуры рельсов приведенные формулы для определения зазоров не могут отражать реальной картины деформирования бесстыкового пути на концах рельсовых плетей из-за явления гистерезиса [114]. Площадь, заключенная внутри петли гистерезиса, эквивалентна энергии, затраченной на нагрев рельсов солнечными лучами и на преодоление диссипативных сил сопротивления балласта сдвигу шпал вдоль оси пути при знакопеременном их действии.

В случае принятия в расчет предлагаемых [4] величин при  $\Delta t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  по известной статической формуле определения зазора при изломе рельсовой плети, то можно отметить, что зазор превысит допускаемое значение:

$$\lambda = \frac{\alpha^2 E \omega \Delta t^2}{r} = \frac{(11,8 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2,1 \cdot 10^8 \cdot 80 \cdot 10^{-4} \cdot 80^2}{25} = 0,0598 \approx 60 \text{ мм}$$

При подстановке же в уравнение реальных значений погонного сопротивления, величина зазора при изломе рельсовой плети уже при  $\Delta t = 40^\circ\text{C}$  превысит  $\lambda_{\max} = 50 \text{ мм}$ .

Зазор при изломе плети учёте фактора времени и воздействию поездов определяется выражением:

$$\lambda = \frac{2\alpha(\pi E \omega \tau)^{\frac{1}{2}} \cdot \Delta t}{K^{\frac{1}{2}}} \quad (4.29)$$

При подстановке в данное выражение относительно небольшого понижения температуры  $\Delta t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$  с течением 7 суток при максимальном значении  $K$  для несмёрзшегося балласта зазор в случае излома рельсовой плети составит:

$$\lambda = \frac{2\alpha(\pi E \omega \tau)^{\frac{1}{2}} \cdot \Delta t}{K^{\frac{1}{2}}} = \frac{2 \cdot 11,8 \cdot 10^{-6} (3,14 \cdot 2,1 \cdot 10^8 \cdot 80 \cdot 10^{-4} \cdot 604800)^{\frac{1}{2}} \cdot 30}{(506,8 \cdot 10^6)^{\frac{1}{2}}} = 0,0562 \approx 56 \text{ мм}$$

Допускаемую величину зазора при изломе рельсовой плети в период низких температур нельзя считать ограничением при выборе температуры закрепления рельсовых плетей, поскольку получившийся зазор в большинстве случаев излома превысит допускаемое значение. Назначая  $\lambda_{\max} = 50 \text{ мм}$  в качестве ограничения верхней границы интервала закрепления, получается, что бесстыковой путь невозможно применять безопасно не только в зимний период, но и в летний, поскольку  $\max t_3$  в этом случае составит 10-15  $^\circ\text{C}$ .

При понижении температуры происходит рост зазоров на концевых участках рельсовых плетей. Расчёт перемещений конца рельсовой плети может проводится статическим методом:

$$\lambda = \frac{\alpha^2 E \omega \Delta t^2}{2r} \quad (4.30)$$

и с учётом фактора времени и воздействия проходящих поездов:

$$\lambda = \frac{\alpha(\pi E \omega \tau)^{\frac{1}{2}} \cdot \Delta t}{K^{\frac{1}{2}}} \quad (4.31)$$

В обоих случаях при подстановке реальных значений погонного сопротивления и коэффициента вязкости замену рельсов в уравнительном пролёте потребуется произвести несколько раз. Но даже неоднократная и своевременная замена рельсов на удлинённые не способна исключить работу стыковых болтов на срез, поскольку даже при минимальном понижении температуры с течением времени рост зазоров происходит непрерывно [171].

### **4.3 Сварка рельсовых плетей с обеспечением установленного температурного режима**

Для обеспечения непрерывности рельсовых нитей бесстыкового пути на железных дорогах России применяется электроконтактная и алюминотермитная сварка рельсов. Данные способы широко применяются для сварки коротких рельсов в плети, ликвидации уравнительных пролётов, окончательного восстановления целостности рельсовых плетей. Согласно [4], электроконтактный способ предпочтителен для путей 1-2 классов, сварки рельсов в РСР, алюминотермитный применяется главным образом на стрелочных переводах и на прочих путях и линиях для восстановления целостности. Но сварка рельсовых плетей и восстановление их не имеет никакого смысла если при этом не производится восстановление температурного режима её работы. Ведь тогда при повышении температуры для обеспечения устойчивости пути необходимо будет разрезать рельсовую плеть, вводить полученные короткие плети в установленную температурный режим работы и затем вновь производить сварку.

Ранее при эксплуатации бесстыкового пути сварка рельсовых плетей проводилась либо при температуре, находящейся в диапазоне оптимальной, что не требовало последующего перезакрепления рельсовых плетей, либо при более высоких температурах с последующей регулировкой или разрядкой напряжений. В

случаях, когда сварка производилась при температуре ниже температуры закрепления, обязательным было последующее перезакрепление плетей с принудительным их вводом в установленный температурный режим. Позднее, были разработаны способы сварки рельсовых плетей при низких температурах с обеспечением установленного температурного режима [154], [172], [173].

Способ восстановления целостности рельсовой плети электроконтактным способом с применением подтягивания конца плети при сварке первого стыка и предварительного изгиба для сварки второго при температурах ниже температуры закрепления плети предложен в [4]. Предлагается посредством применения ГНУ создавать на участке, примыкающем к месту сварки, дополнительные растягивающие усилия. Полученные растягивающие усилия должны превышать продольную силу в рельсовой плети для установленной температуры закрепления на расчетную величину, необходимую для перераспределения после окончания сварки на ввариваемую рельсовую рубку и примыкающие «дышащие» концы плети для обеспечения установленного температурного режима.

Недостатками способа [4] является определение длин участков (анкерных, «дышащих», подлежащих раскреплению) по завышенной величине погонного сопротивления балласта  $r$ , что приводит к срывам анкерных участков и отсутствию необходимой температуры закрепления после производства работ. Способом рекомендуется [4] в расчётах принимать величину  $r$  на одну рельсовую нить для стабилизированного балласта 12 кН/м и 7 кН/м для нестабилизированного, что значительно превышает среднее значение погонного сопротивления балласта, принимаемое в расчётах бесстыкового пути [174], [175]. Реальное восстановление температуры закрепления способом [4] возможно только в том случае, если длина ввариваемой вставки будет равна длине ранее вырезанного дефектного участка с учётом запаса металла на сварку двух стыков и остаточную стрелу изгиба.

Способ [4] достаточно сложен, дорог и трудоёмок, требуется применение машины ПРСМ, численность которых на железных дорогах недостаточна. Окончательное восстановление целостности рельсовой плети невозможно произвести быстро, что приводит к длительной эксплуатации плетей с местами

временного восстановления, в которых происходит более интенсивное образование дефектов и деформаций элементов верхнего строения пути [176].

Электроконтактным способом возможно восстановление и удлинение сверхдлинных рельсовых плетей с обеспечением установленного температурного режима работы, но только в случае совместного применения метода сварки с предварительным изгибом и подогрева рельсовых плетей нагревательными устройствами [177], [173]. Однако наряду с нехваткой на отечественных железных дорогах машин ПРСМ имеется нехватка нагревательных установок.

Был предложен способ алюминотермитной сварки рельсовых плетей с натяжением свариваемых концов посредством ГНУ [172] для восстановления установленного температурного режима работы. Преимуществами алюминотермитного способа сварки в сравнении с электроконтактным является относительная дешевизна (в среднем на 50%), простота применения, меньшие трудозатраты.

Способ [172] прошел опытную проверку: на действующем участке бесстыкового пути была восстановлена целостность рельсовой плети с обеспечением установленной температуры закрепления при температуре рельсов на  $20^{\circ}\text{C}$  ниже (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 – Восстановление целостности плети при температуре рельсов на  $20^{\circ}\text{C}$  ниже температуры их закрепления [172]

Авторами отмечалось [172], что способ может быть применён только при хорошем состоянии гидравлики, т.к. процесс термитной сварки стыка с кристаллизацией расплавленного металла, остыванием и набором прочности в среднем составляет 1,5 часа. Все это время стык должен иметь неизменную ширину и в случае ослабления давления в системе ГНУ с расхождением торцов рельсов стык получит неустраняемые дефекты.

Был предложен новый способ алюминотермитной сварки рельсовых плетей при низких температурах [178], заключающийся в снятии продольных сил на концах свариваемых плетей путём создания и нагрева двух изогнутых в плане участков с обеих сторон от места сварки [154].

Способ [154] требует дополнительно к ГНУ применения не менее двух нагревательных устройств, запаса топлива, постоянного контроля за изогнутыми в плане участками и, следовательно, существенного увеличения числа задействованных в работе монтеров пути и ресурсов в сравнении с [172].

В [179] отмечено, что около 40% из всех изломов в стыках, сваренных алюминотермитным способом, произошло по причине дефекта, называемого «горячая трещина». Изломы сварного стыка при этом дефекте происходят в 2-5 раз чаще, чем при других дефектах. «Горячая трещина» возникает при воздействии на свариваемый стык продольных сил, сопровождаемых подвижкой рельсов, в период кристаллизации металла до момента набора им достаточной прочности [179].

Обеспечить неизменность зазора при алюминотермитной сварке рельсов возможно способом [159], особенность которого заключается в применении специального приспособления для фиксации концов свариваемых плетей после их нагревания или после натяжения ГНУ [180]. Необходимый для проведения термитной сварки зазор (от 24 до 26 мм), полученный с помощью нагревательной установки или натяжителя, фиксируется с помощью специального приспособления и остаётся неизменным в течение всего процесса сварки и остывания независимо от изменений напряженно-деформированного состояния остальной части рельсовой плети.

Приспособление представляет собой пару захватных устройств, зажимающих шейки свариваемых рельсов на некотором отдалении от стыка, соединённых жесткими тягами. Неизменяемости длины приспособления при высоких растягивающих силах (до 900 кН – «повышение» температуры закрепления на 45 °С) и предотвращению его проскальзывания по шейке рельса может способствовать выполнение захватных устройств и тяг из соответствующих частей ГНУ (рисунок 4.7), например, УНГ-90, максимальное заявленное усилие которого 900 кН.

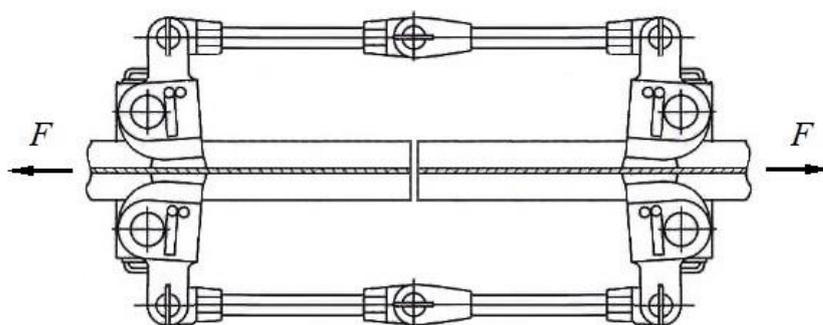


Рисунок 4.7 – Приспособление для фиксации концов рельсовых плетей

Приспособление должно фиксировать концы рельсовых плетей сразу после их сведения, ГНУ при этом может быть демонтировано (если применялся натяжитель, а не нагреватель). Снятие удерживающего приспособления возможно только после остывания и достаточного набора прочности термитного стыка. При этом, для обеспечения возможности демонтажа приспособления одно из захватных устройств должно быть разборным.

Для натяжения концов плетей может быть применено гидравлическое натяжное устройство типа УГН-75 с дополнительными тягами или его аналоги. Оборудование, применяемое непосредственно для алюминотермитной сварки, в большей степени размещается в верхней части стыка. Части формы для заливки металла и другие детали имеют относительно небольшие габариты и не препятствуют установке ГНУ и приспособления (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Оборудование для термитной сварки рельсов

Помешать установке приспособления могут только специальные стойки, применяемые для точного выравнивания концов свариваемых рельсов. Однако потребность в их установке для выравнивания концов рельсов возникает не всегда, и выравнивание может быть выполнено подкладкой под их подошвы деревянных карточек с помощью путевого домкрата [159].

При использовании натяжителя УГ-70В/400А, имеющего специальные вставки арочного типа длиной около 1 м, возможен монтаж устройства для фиксации концов рельсовых плетей внутри ГНУ (рисунок 4.9).

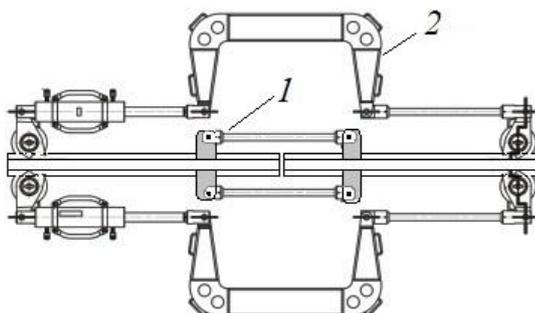


Рисунок 4.9 – Схема установки приспособления (1) внутри гидравлического натяжного устройства УГ-70В/400А (2) (вид сверху)

Недостатком подобного способа является нагрев приспособления для фиксации концов рельсов от горячей при высокой температуре термитной смеси.

Для обеспечения надлежащего качества термитного стыка необходимо обеспечить теплоизоляцию или максимальное удаление от воздействия высоких температур.

В случае применения тяг, изогнутых в плане, или специальных в виде больших жестких скоб, аналогичных скобам гидравлического натяжителя УГ-70В/400А, приспособление может быть установлено поверх практически большинства ГНУ и будет достаточно удалено от свариваемого стыка, что даст возможность защитить устройство от неблагоприятного воздействия высокой температуры. При этом хватные устройства приспособления могут быть универсальными и применяться с различными тягами: короткими и прямыми для ГНУ, имеющих достаточный запас места, либо длинными и изогнутыми в плане для установки поверх ГНУ при условии достаточной жесткости конструкции [180].

Однако, как было отмечено в п. 4.1 даже современные модели натяжных устройств позволяют «повышать» температуру закрепления не более чем на 30 °С. Поэтому в силу конструкции гидравлических натяжителей удлинение рельсовых плетей или их окончательное восстановление описанным способом возможно только при температурах не ниже 10 °С. В работах [181], [182], [183] теоретически и экспериментально обоснована возможность проведения алюминотермитной сварки свободно лежащих рельсов при отрицательных температурах с получением качественного соединения, однако данные технологии не учитывают наличие в рельсовых плетях температурных напряжений, пути восстановления температуры закрепления и могут быть применены на бесстыковом пути только для сварки первого стыка рельсовой вставки.

При температурах до -5 °С для проведения алюминотермитной сварки рельсовых плетей с восстановлением температурного режима для создания необходимого зазора может быть применено нагревательное устройство. Предлагается следующая технология: после сварки первого стыка рельсовой вставки, подобранной по длине в соответствии с необходимой температурой закрепления, с помощью нагревательной установки производится нагрев рельсовой плети с двух сторон от места сварки до образования необходимого зазора ( $25 \pm 1$  мм), который незамедлительно фиксируется с помощью предлагаемого

приспособления. После этого производится термитная сварка, при этом защита места производства работ от влияния низкой температуры и атмосферного воздействия может быть организована в виде устройства специальной палатки с обогревом как предложено в [181] и [183]. Снятие приспособления, удерживающего концы рельсовых плетей возможно только после полной кристаллизации стыка и его остывания.

Предлагаемый способ алюминотермитной сварки рельсовых плетей с обеспечением необходимого температурного режима [159] позволит снизить трудовые и финансовые затраты на выполнение работы, которые при необходимости могут быть проведены при температуре до  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### **4.4 Выводы по четвёртой главе**

В настоящее время верхний предел температуры закрепления рельсовых плетей ограничен прочностью рельсов, стыковых болтов и величиной максимально допустимого зазора в случае излома рельсовой плети. Экспериментами было определено, что максимальное фактическое значение кромочных напряжений в действующем пути составляет 180-190 МПа. Необходим новый метод расчёта рельсов на прочность, учитывающий неровности подрельсового основания. Изломы рельсов в большей степени обусловлены нарушениями технологии их изготовления, сварки и обработки сварных стыков, развитием контактно-усталостных и коррозионно-усталостных трещин, трещин в зоне перехода головки в шейку [150].

При расчёте зазора, возникающего при сквозном изломе рельсовой плети, по формулам, рекомендованным нормативными документами, с учётом реальных значений погонного сопротивления получим, что зазор при изломе рельсовой плети превысит допускаемое значение, равное 50 мм уже при понижении температуры на  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Данные формулы позволяют определить зазор только при первом понижении температуры. При учёте фактора времени следует воспользоваться другим выражением (4.29). Однако и в этом случае, даже при

подстановке максимального опытного значения коэффициента вязкости при  $\Delta t = 30$  °С зазор в плети превысит нормативное значение.

По аналогичным выражениям определяется величина зазоров на концах рельсовой плети. При подстановке реальных значений погонного сопротивления в статический расчёт или коэффициента вязкости в выражение (4.31) можно определить, что в течение зимнего периода замену рельсов в уравнительном пролёте потребуется произвести несколько раз. Но даже своевременная замена рельсов на удлинённые не способна исключить работу стыковых болтов на срез.

Поэтому допускаемая величина зазора при изломе рельсовой плети и прочность стыковых болтов не могут быть ограничениями температуры закрепления рельсовых плетей.

Для сварки рельсовых плетей при температурах ниже температуры их закрепления предлагается способ, обеспечивающий их установленный температурный режим. Способ заключается в фиксации с помощью специального приспособления и последующей термитной сварки концов рельсовых плетей, на которых предварительно с помощью ГНУ была искусственно создана необходимая температура закрепления.

В настоящее время экспериментально обоснована возможность проведения термитной сварки коротких рельсов при отрицательных температурах с получением соединения, не имеющего дефектов. Расширить сферу применения данных технологий для сварки рельсовых плетей при отрицательных температурах с восстановлением температурного режима становится возможным благодаря предлагаемому нами новому способу, заключающемуся в совместном использовании нагревательных устройств и приспособления для фиксации концов рельсовых плетей.

Данный способ позволяет упростить процесс удлинения и восстановления рельсовых плетей, снизив трудозатраты и стоимость производства работ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложено в методах расчета напряжённно-деформированного состояния бесстыкового пути пользоваться определенными в работе максимальными и минимальными значениями погонных сопротивлений балласта, найденными экспериментами на действующих участках бесстыкового пути с учётом воздействия поездов через коэффициент вязкости балласта, сдвигаемого шпалами вдоль и поперёк оси пути.
2. С помощью методики сравнительных испытаний, по которой одновременно на одном и том же участке пути определялись сопротивления двух попеременно пригружаемых железобетонных шпал экспериментами было установлено, что увеличение их массы на 100 кг при учёте воздействия поездов не повышает сопротивление их сдвигу в щебёночном балласте.
3. Разработан и предложен способ термитной сварки рельсовых плетей при температурах рельсов ниже температуры их закрепления, позволяющий восстанавливать установленный температурный режим работы бесстыкового пути.
4. В пределах установленных границ температурного интервала закрепления рельсовых плетей бесстыкового пути и в зависимости от климатических условий предложены меры по обеспечению прочности болтов на концах рельсовых плетей, заключающиеся в том, что на концевых участках рельсовых плетей, имеющих длину равную протяженности перегона, производится сезонное перезакрепление их концевых участков.

**Рекомендации и перспективы дальнейших исследований** по теме диссертационной работы:

1. Дальнейшее изучение с накоплением статистических данных влияния различных факторов на погонные сопротивления горизонтальному перемещению железобетонных шпал в балласте по разработанной методике, учитывающей воздействие поездов, позволит ещё больше уточнить

результаты расчетов по определению фактического напряжённно-деформированного состояния бесстыкового пути.

2. Необходима дальнейшая детальная разработка способов и приспособлений для сварки рельсовых плетей при относительно низких температурах с обеспечением установленного температурного режима их эксплуатации.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Варданян, А. В.** О целесообразности применения рельсов длиной 25 м на железобетонных шпалах / А.В. Варданян // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 10. – С. 29-30.
2. Возможно ли содержание пути с 25-метровыми рельсами без температурных напряжений? / Г.В. Карпачевский, М.В. Новакович, Е.Н. Зубков [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 10. – С. 31-32.
3. **Залавский, Н. И.** Залавский, Н.И. Разработка методов контроля в системе обеспечения устойчивости бесстыкового пути: дис. ... канд. техн. наук / Н.И. Залавский. – Ростов н/Д, 2007. – 148 с.
4. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14 декабря 2016 г. №2544/р.
5. **Маркарьян, М. А.** Сопротивления бесстыкового пути перемещениям / М.А. Маркарьян, Н.Б. Зверев // Труды ВНИИЖТ. Вып.244. – М.: Трансжелдориздат. – 1962. – С. 19-43.
6. **Новакович, В. И.** Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями. Львов: Вища школа. 1984. – 100 с.
7. **Бромберг, Е. М.** Устойчивость бесстыкового пути при совместном действии поездной и температурной нагрузки. Повышение эффективности бесстыкового пути: Тр. ВНИИЖТ, М., Транспорт, 1983. С. 77-85
8. **Бромберг, Е. М.** Устойчивость бесстыкового пути под поездами. Совершенствование конструкции и эксплуатации бесстыкового пути. Тр. ВНИИЖТ, М., Транспорт, 1988
9. **Карпачевский, В. В.** Особенности проектирования и эксплуатации бесстыкового пути в кривых. Дисс. кандидата технических наук. Москва, 2014, 105 с.
10. **Карпачевский, Г. В.** «Оптимальная» температура закрепления рельсовых плетей / Г.В. Карпачевский // Труды РГУПС. – 2016. – № 4. – С. 32-35.

11. **Новакович, М. В.** Устойчивость бесстыкового пути под действием продольных сжимающих сил / М.В. Новакович, В.В. Карпачевский, В.В. Шубитидзе // Вестник РГУПС. – 2010. – № 4. – С. 94-97.
12. Бесстыковой путь / В.Г. Альбрехт, Н.П. Виногоров, Н.Б. Зверев и др.; Под ред. В.Г. Альбрехта, А.Я. Когана. – М.: Транспорт, 2000. – 408 с.
13. **Виногоров, Н. П.** Сокращение мест временного восстановления рельсовых плетей / Н.П. Виногоров, Д.А. Малявин // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – №3. – С. 11-14.
14. **Альбрехт, В. Г.** Угон железнодорожного пути и борьба с ним. М.: Трансжелдориздат, 1958 г., 144 с.
15. **Карпущенко, Н. И.** Совершенствование рельсовых скреплений: Н.И. Карпущенко, Н. И. Антонов; М-во путей сообщ. РФ. Сиб. гос. ун-т путей сообщ. – Новосибирск: [Изд-во СГУПС], 2003. – 299 с.
16. **Новакович, В.И.** Элементы бесстыкового пути: возможности совершенствования / В.И. Новакович // Путь и путевое хозяйство. – 2009. – №11. – С. 16-17.
17. **Ермаков, В. М.** Современные конструкции железобетонных шпал и промежуточных скреплений для бесстыкового пути: учебное пособие / В.М. Ермаков, А.А. Бекиш; Федеральное агентство ж.-д. трансп., Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Петербургский гос. ун-т путей сообщ.». – Санкт-Петербург: Петербургский гос. ун-т путей сообщ., 2009. – 99 с.
18. **Коган, А. Я.** Устойчивость бесстыкового пути при различных конструкциях скреплений и условиях их эксплуатации / А.Я. Коган, А.В. Лебедев // Вестник ВНИИЖТ. – 2007. – №2. – С. 3-9.
19. **Зверев, Б. Н.** Новые конструкции рельсовых скреплений / Б.Н. Зверев, Н.В. Петров, П. С. Гайдамака, М.С. Яхов. – Москва: Трансжелдориздат, 1963. – 63 с.
20. **Певзнер, В. О.** Прокладки промежуточных скреплений. Перспективы развития / В.О. Певзнер, А.В. Потапов, Т.В. Буркацкая // Сборник трудов:

Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2014. – №7. – С. 148-155.

21. **Новакович, В. И.** Об избыточной мощности современной конструкции верхнего строения железнодорожного пути / В.И. Новакович // Наука и транспорт. Санкт-Петербург. – 2006. – С. 29-31.
22. О необходимости модернизации верхнего строения железнодорожного пути / В.И. Новакович, Г.В. Карпачевский, Н.И. Залавский, Е.В. Мироненко [и др.] // Сб. трудов «Транспорт и логистика: инновационная инфраструктура, интеллектуальные и ресурсосберегающие технологии, экономика и управление». Ростов-на-Дону: РГУПС, 2018. – С. 200-205.
23. **Шумаков, П.** Искривление пути / П. Шумаков // Газета «Звезда», Выпуск №29 16.08.2013
24. **Гапанович, В. А.** Комплексная оценка состояния бесстыкового пути / В.А. Гапанович, И.К. Михалкин, О.Б. Симаков // Железнодорожный транспорт. – 2015. – №9. – С. 24-27.
25. **Суслов, О. А.** Функциональная безопасность эксплуатации бесстыкового пути: дис. ... д-ра техн. наук / О.А. Суслов. – Москва, 2017. – 241 с.
26. Напряжённые и ненапряжённые неровности / Н.И. Залавский, М.В. Новакович, В.В. Карпачевский [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – №7. – С. 23-25.
27. Когда может быть потеряна температура закрепления? / Г.В. Карпачевский, М.В. Новакович, А.В. Варданян [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 8. – С. 29-30.
28. **Ермаков, В. М.** Комплексная система реализации ресурсосбережения в современных условиях работы железнодорожного пути: дис. ... д-ра техн. наук / В.М. Ермаков. – Москва, 2000. – 435 с.
29. Проблемы работы бесстыкового пути при температурах рельсов ниже температуры закрепления плетей. / Е.В. Мироненко, В.Н. Залавский, Н.-А.С. Хадукаев [и др.] // Сб. трудов «Транспорт-2020». Ростов-на-Дону: РГУПС, 2020. – С. 314-317.

30. **Стецевич, И. Р.** Доклад главного инженера Комиссии по заведыванию и переустройству городских железных дорог по заграничной командировке в декабре месяце 1906 г. / [Гл. инж. И. Стецевич]. – Санкт-Петербург: Спб. гор. тип., 1907. – 63 с.
31. **Мищенко, К. Н.** Бесстыковой рельсовый путь / проф. К. Н. Мищенко, д-р техн. наук. – Москва: изд-во и 1-я тип. Трансжелдориздата, 1950. – 88 с.
32. **Боченков, М. С.** Бесстыковой путь с автоматической разрядкой температурных напряжений и исследование его работы: Автореферат дис. на соискание учен. степени кандидата техн. наук / Инж. М.С. Боченков; МПС СССР. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т ж.-д. транспорта. – Москва: [б. и.], 1958. – 12 с.
33. **Шубитидзе, В. В.** Определение условий устойчивости бесстыкового пути энергетическим методом с учётом воздействия поездов: дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.22.06. Ростов-на-Дону, 2017. – 138 с.
34. **Андреевский, М. Г.** К вопросу сопротивления рельсового пути продольному смещению / М.Г. Андреевский // Труды ТашИИТ. – 1957. – Вып.8. – С. 58-73.
35. **Исаков, П. Ф.** Исследование сопротивления основания поперечным перемещениям рельсо-шпальной решетки / П.Ф. Исаков // Труды ДИИТ. – 1958. – Вып. 27. – С. 227-260.
36. **Членов, М. Т.** Длинные рельсы / М. Т. Членов, канд. тех. наук; Н.-и. ин-т пути и строит-ва НКПС. – Москва : Трансжелдориздат, 1940. - 204 с.
37. **Взаимодействие пути и подвижного состава / Е.М. Бромберг, М.Ф. Вериго, В.Н. Данилов, М.А. Фришман // Труды ВНИИЖТа. – М.: Трансжелдориздат, 1956. – 280 с.**
38. **Виногоров, Н. П.** Устойчивость бесстыкового пути / Н.П. Виногоров // Путь и путевое хозяйство. – 2005. – №7. – С. 7-13.
39. **Ершов, В. В.** Устойчивость бесстыкового пути с учетом воздействия поездов и разработка технологий по ее обеспечению: дисс. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук: 05.22.06 / В.В. Ершов; науч. консультант В.И. Новакович; СамГУПС. – Самара, 2003. – 288 с.

- 40.Бесстыковой путь / В.Г. Альбрехт, Е.М. Бромберг, Н.Б. Зверев, В.Я. Шульга, Н.С. Чирков; Под ред. В.Г. Альбрехта и Е.М. Бромберга. – М.: Транспорт, 1982. – 206 с.
- 41.**Коган, А. Я.** Продольные силы в железнодорожном пути. Труды ВНИИЖТ, вып. 332, М.: Транспорт, 1967, 168 с.
- 42.**Крысанов, Л. Г.** Шпалы с повышенным сопротивлением сдвигу / Л. Г. Крысанов, В.В. Серебренников, Н.В. Рессина // Путь и путевое хозяйство. – 2009. – №3. – С. 24-25.
- 43.**Певзнер, В. О.** Уточнение условий эксплуатации бесстыкового пути в период экстремального повышения температур / В.О. Певзнер, М.В. Новакович, В.В. Третьяков, В.В. Шубитидзе // Вестник РГУПС. – 2018. – №4. – С. 116-119.
- 44.**Серебренников, В. В.** Влияние конструктивных особенностей железобетонных шпал на их сопротивление сдвигу в балластном слое / В.В. Серебренников, А.С. Антипов, Н.В. Рессина, Н.И. Гаврилина // Сб. науч. тр. ВНИИЖТ: Повышение надёжности работы верхнего строения пути в современных условиях эксплуатации / Под ред. Л.Г. Крысанова. М.: Интекст, 2000. С. 60-74.
- 45.**Новакович, В. И.** Реология бесстыкового пути и её практические приложения: учеб. пособие. В.И. Новакович, Е.В. Корниенко; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2017. – 71 с.
- 46.**Аккерман, Г. Л.** Оценка поперечной устойчивости рельсошпальной решетки в балластной призме / Г.Л. Аккерман, Д.А. Скутин // Вестник УрГУПС. – 2015. – №3. – С. 36-44.
- 47.**Карпачевский, Г. В.** Особенности укладки, содержания и ремонта бесстыкового пути со сверхдлинными плетями и с их учетом разработка технологических решений. Дисс. кандидата технических наук. Ростов-на-Дону, 2004, 180 с.

48. **Корниенко, Е. В.** Определение реологических свойств балласта, сдвигаемого железобетонными шпалами поперек оси пути / Е.В. Корниенко // Вестник РГУПС. – 2014. – №2. – С. 82-86.
49. **Рессина, Н. В.** Железобетонная шпала нового поколения / Н.В. Рессина, М.Ю. Хвостик // Сборник трудов учёных ОАО «ВНИИЖТ» под ред. Абдурашитова А.Ю. М.: ВМГ-Принт, 2014, с. 112-114.
50. **Клименко, В. Я.** Повышение сопротивления железобетонных шпал сдвигу поперёк оси пути. / В.Я. Клименко, Л.В. Клименко // Вестник ВНИИЖТ. – 2006. – №1. – С. 27-31.
51. **Немешди, Э.** Расчёт горизонтальной устойчивости бесстыкового пути. Перевод ЦНТБ МПС П7850.
52. **Грюневальдт, К.** Теория устойчивости и предложения по повышению устойчивости бесстыкового пути. «Орган», 1931, №4.
53. **Ваттман, И.** Бесстыковой железнодорожный путь: Продольные силы в рельсовом пути: (Пер. с нем.). – Москва: Трансжелдориздат, 1959. – 183 с.
54. **Дутаев, Х. Х.** Сопротивление продольным перемещениям рельсов в стыках / Х.Х. Дутаев // Путь и путевое хозяйство. – 2006. – №11. – С. 28-29.
55. **Технический справочник железнодорожника. Том 5. Путь и путевое хозяйство / Ф.Д. Барыкин, Е.М. Бромберг, М.Ф. Вериго [и др.]. – Москва: Государственное транспортное железнодорожное издательство, 1951. – 597 с.**
56. **Новакович, В. И.** Продольные силы при вывеске рельсошпальной решетки бесстыкового пути / В.И. Новакович // Вестник ВНИИЖТ. – 1967. – №6. – С. 49-52.
57. **Шахунянец, Г. М.** Железнодорожный путь: [Учебник для вузов ж.-д. транспорта] / Г. М. Шахунянец, д-р техн. наук. – Москва: Трансжелдориздат, 1987. – 479 с.
58. **Залавский, В. Н.** Область применения статических сопротивлений сдвигу щебня шпалами вдоль оси пути / В.Н. Залавский, А.С. Хадукаев, Н.-А.С. Хадукаев, Е.В. Мироненко // Труды РГУПС. – 2017. – №2. – С. 20-24.

59. Область применения статических сопротивлений сдвигу щебня шпалами вдоль оси пути / В.Н. Залавский, А.С. Хадукаев, Н.-А.С. Хадукаев, Е.В. Мироненко // Сб. трудов «Современное развитие науки и техники» («Наука 2017»). Том 1. Технические и естественные науки. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2017. – С. 136.
60. А.с. 457898 СССР. МПК G 011 1/04, E 01b 35/12. Устройство для определения сопротивлений шпал продольным перемещениям пути / В.И. Новакович, В.Г. Самойленко, Г.В. Яшин. – №1869855/27-11 ; заявл. 09.03.71 ; опубл. 25.01.75, Бюл. №3.
61. Мироненко, Е. В. Способы определения сопротивления балласта сдвигу шпалами / Е.В. Мироненко // Сб. трудов «Транспорт-2018». Ростов-на-Дону: РГУПС, 2018. – С. 298-302.
62. Новакович, М. В. Сопротивление брусьев сдвигу / М.В. Новакович, А.Н. Игнатъев, Г.В. Карпачевский // Путь и путевое хозяйство. – 2004. – №8. – С. 18-19.
63. А.с. 939621 СССР. МПК E 01B 35/12. Устройство для определения сопротивления перемещению шпалы / В.И. Новакович, В.В. Ершов. – №2997380/29-11 ; заявл. 27.10.80 ; опубл. 30.06.82, Бюл. №24.
64. Новакович, В. И. Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями. Учебное пособие. – Ростов н/Д: Рост. гос. ун-т путей сообщения, 2001 – 92 с.
65. Бокарев, С. А. Исследование устойчивости пути против поперечного сдвига при действии горизонтальной нагрузки на железобетонных пролетных строениях с ездой на балласте / С.А. Бокарев, С.В. Ефимов // Транспортные сооружения. – 2016. – Том 3, №1.
66. Ермолов, Я. М. Модификация свойств балластной призмы полимерными вяжущими материалами: дис. ... к-та техн. наук / Я.М. Ермолов. – Ростов-на-Дону, 2020. – 166 с.
67. Суслов, О. А. Экспериментальные исследования сопротивления поперечному сдвигу шпал новых типов / О.А. Суслов, П.Е. Сквозняков //

Современные и перспективные конструкции железнодорожного пути для различных условий эксплуатации: сб. трудов ОАО «ВНИИЖТ» под ред. А.Ю. Абдурашитова. – М.: Интекст, 2013. – 152 с.

68. Устройство для повышения бокового сопротивления железобетонной шпалы / И.Г. Карпов, Д.А. Ковенькин, С.Ю. Лагерев, Е.В. Филатов // Сб. трудов «Проблемы проектирования и строительства железных дорог». – Хабаровск: ДвГУПС, 2011. – С. 155-162.
69. **Новакович, В. И.** Основы реологии бесстыкового пути и ее приложения: дис. на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук / В.И. Новакович; РИИЖТ. – 1984.
70. **Новакович, В. И.** Реология бесстыкового пути / В.И. Новакович // Rail International. – 1988. – № 11.
71. **Новакович, В. И.** О ползучести бесстыкового пути в поперечном направлении под действием продольных сил / В.И. Новакович // Вестник ВНИИЖТ. – 1976. – № 5.
72. **Новакович, В. И.** Принципы и методы, на которых основано применение теории ползучести в расчетах бесстыкового пути / В.И. Новакович // Сб. трудов «Транспорт-2004». Часть 2. Ростов-на-Дону: РГУПС, 2004 – С. 185.
73. **Корниенко, Е. В.** Устойчивость бесстыкового пути и вязкость балласта / Е.В. Корниенко // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 6. – С. 10-13.
74. **Новакович, В. И.** Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями. Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2005 – 144 с.
75. **Новакович, М. В.** Механико-математические модели бесстыкового пути / М.В. Новакович, В.В. Шубитидзе, В.В. Карпачевский // Сб. трудов «Транспорт-2012». Ростов-на-Дону: РГУПС, 2012 – С. 222-223.
76. **Новакович, В. И.** Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями: учеб. пособие для магистров и специалистов / В.И. Новакович. – М.: Алатырь, 2017. – 166 с.

77. **Мироненко, Е. В.** Устройства для определения сопротивления шпал продольным и поперечным перемещениям пути / Е.В. Мироненко, Д.В. Шехов // Труды РГУПС. – 2018. – №3. – С. 45-49.
78. **Корниенко, Е. В.** Особенности напряженно-деформированного состояния бесстыкового пути при учёте воздействия поездов: дис. ... к-та техн. наук / Е.В. Корниенко. – Ростов-на-Дону, 2019. – 145 с.
79. **Лысюк, В. С.** Прочный и надежный железнодорожный путь / В.С. Лысюк, В.И. Сазонов, Л.В. Башкатова – М. : ИКЦ «Академкнига», 2003. – 589 с.
80. On the lateral stability of the sleeper-ballast system / G. Pio Pucillo, F. Penta, M. Catena, S. Lisi // Procedia Structural Integrity. – 2018. – №12. – P. 553-560.
81. Устойчивость пути на железобетонных шпалах к воздействию поперечных усилий // «Железные дороги мира». – 2012. – №5, С. 68-71. D. Read et al. Railway Track and Structures, 2011, №6, p. 17-20; материалы TTCI ([www.aar.com](http://www.aar.com)), компаний Pandrol ([www.pandrol.com](http://www.pandrol.com)) и Plasser American ([www.plasseramerican.com](http://www.plasseramerican.com)).
82. **Поляничко, Н. В.** Исследование влияния степени уплотнения балластного слоя в шпальных ящиках на сопротивляемость сдвигу шпал / Н.В. Поляничко // Известия ПГУПС. – 2014. – №4. – С. 67-72.
83. Study of the characteristics of ballast bed resistance for different temperature and humidity conditions / J. Liu, P. Wang, G. Liu, J. Dai, J. Xiao, H. Liu // Construction and Building Materials. – 2021. – №266 (Part B).
84. Экономическая эффективность укладки бесстыкового пути в кривых малого радиуса / М.П. Настечик, В.В. Рыбкин, Р.В. Маркуль, М.А. Арбузов [и др.] // Сб. трудов ДНУЖТ. – Днепропетровск : ДНУЖТ, 2013. – Вып. 32.
85. **Вериго, М. Ф.** Новые методы в установлении норм устройства и содержания бесстыкового пути / М.Ф. Вериго. - М. : Интекст, 2000. – 184 с.
86. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 29 декабря 2012 г. №2788р.

87. **Мироненко, Е. В.** Пути повышения стабильности подрельсового основания железнодорожного пути / Е.В. Мироненко // Труды РГУПС. – 2017. – №2. – С. 45-50.
88. **Мироненко, Е. В.** Факторы, влияющие на сопротивление балласта сдвигу шпалами / Е.В. Мироненко // Сб. трудов «Транспорт-2019». Ростов-на-Дону: РГУПС, 2019. – С. 124-127.
89. Железнодорожный путь: учебник / Е.С. Ашпиз, А.И. Гасанов, Б.Э. Глюзберг и др.; под ред. Е.С. Ашпиза. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. – 544 с.
90. **Кравченко, Н. Д.** Особенности пути с железобетонными рамными шпалами / Н.Д. Кравченко, Г.Б. Яковлев // Путь и путевое хозяйство. – 2009. – №7. – С. 9-11.
91. **Ungureanu, V. V.** Y Shape Railway sleepers from fiber reinforced foamed urethane / V.V. Ungureanu, A.N. Mariş // Bulletin of the Transilvania University of Braşov CIBv. – 2013. – №6.
92. **Лосев, Г. Г.** Анализ технических решений по повышению устойчивости рельсовых опор бесстыкового пути / Г.Г. Лосев // Техника железных дорог. – 2014. – №2. – С. 26-32
93. **Лосев, Г. Г.** Поездная нагрузка и сдвиг шпал / Г.Г. Лосев // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – №7. – С. 15-16.
94. **Лосев, Г. Г.** Механизм потери устойчивости бесстыкового пути / Г.Г. Лосев // Путь и путевое хозяйство. – 2012. – №3. – С. 26-27.
95. **Лосев, Г. Г.** Повышение устойчивости опор бесстыкового пути / Г.Г. Лосев // Путь и путевое хозяйство. – 2013. – №4. – С. 17-19.
96. **Патент РФ №2433218, МПК E01B 3/34, E01B 3/32, E01B 3/28.** Железобетонная шпала / В.И. Новакович, И.С. Бабадеев, А.А. Киреевнин. – Заявл. 11.01.2009; опубл. 10.11.2011, Бюл. № 31.
97. **Бабадеев, И. С.** Конструкция новой железобетонной шпалы / И.С. Бабадеев, А.А. Киреевнин, В.В. Карпачевский // Путь и путевое хозяйство. – 2010. – №5. – С. 31.

98. **Карпачевский, В. В.** Определение сопротивлений новой железобетонной шпалы сдвигу поперек оси пути / В.В. Карпачевский, А.А. Киреевнин, И.С. Бабадеев // Труды XI науч.-практ. конф. «Безопасность движения поездов»: Сб. тез. докл. – М.: МИИТ, 2010. – С. 31.
99. **Бабадеев, И. С.** Сравнительный расчет стандартной и новой железобетонной шпалы / И.С. Бабадеев // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 11. – С. 38-39
100. **Мироненко, Е. В.** Проблемы конструкции верхнего строения пути / Е.В. Мироненко // Труды РГУПС. – 2017. – №4. – С. 57-62.
101. **Новакович, В. И.** Элементы бесстыкового пути: возможности совершенствования / В.И. Новакович // Путь и путевое хозяйство. – 2009. – №11. – С. 16-17.
102. **Коган, А. Я.** Вертикальные динамические силы, действующие на путь: дис. ... канд. техн. наук / А.Я. Коган. – Москва, 1972. – 275 с.
103. Применение технологии склеивания балласта // Железные дороги мира. – 2012. – №5. – С. 57-67. По материалам компаний Terrasystem, Cronau; Eisenbahningenieur, 2011, №9, S. 32-43.
104. Компьютерное моделирование свойств плеча балластной призмы железнодорожного пути, омоноличенной полимерными связующими на основе полиуретана / З.Б. Хакиев, А.А. Кругликов, Я.М. Ермолов, В.А. Явна // Вестник РГУПС. – 2018. – №3. – С. 142-150.
105. **Даренский, А. Н.** Результаты экспериментальных работ по определению сил сопротивления железобетонных шпал продольным перемещениям / А.Н. Даренский, В.Г. Витольберг, Н.В. Бугаец // Збірник наукових праць ДонІЗТ. – 2009. – №17. – С. 157–171.
106. Путь на тяжёлых шпалах с упругими подошвами // Железные дороги мира. – 2016. – №9. – С. 73-77. Материалы компании Getzner; Eisenbahntechnische Rundschau, 2015, №7+8, S. 41-46.
107. Испытания шпал уменьшенной толщины // Железные дороги мира. – 2014. – №10. – С. 73-75. Railway Gazette International, 2014, №8, p. 58-59, материалы компании Vigier Rail.

108. **Новакович, В. И.** Влияет ли масса шпалы на сопротивление сдвигу в балласте? / В.И. Новакович, Е.В. Мироненко, Н.С. Хадукаев // Путь и путевое хозяйство. – 2020. – №3. – С. 34-36.
109. **Савин, А. В.** Условия применения безбалластного пути. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: 2017 г.
110. Исследования безбалластной конструкции верхнего строения пути / А.В. Савин, А.М. Бржезовский, В.В. Третьяков [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2015. – №6. – С. 23-32.
111. Современные конструкции верхнего строения железнодорожного пути. Под ред. В.Г. Альбрехта и А.Ф. Золотарского. М.: Транспорт, 1975. – 280 с.
112. **Никонов, А. М.** Верхнее строение пути зарубежных железных дорог. Учебное пособие. – М.: МИИТ, 1992. – 40 с.
113. Подрельсовые основания и земляное полотно. Сборник трудов под общей ред. проф. С.В. Амелина. Вып. 198, Л.: ЛИИЖТ, 1962 – 96 с.
114. **Шахунянц, Г. М.** Железнодорожный путь / Г.М. Шахунянц: учеб. для вузов ж.-д. трансп. – М.: Трансжелдориздат, 1961. – 615 с.
115. **Губанов, А. В.** Утилизация деревянных шпал: методы и возможные решения / А.В. Губанов // Путь и путевое хозяйство. – 2009. – №10. – С. 22-30.
116. Железобетонные шпалы для рельсового пути. Золотарский А.Ф., Евдокимов Б.А., Исаев Н.М., Крысанов Л.Г., Серебренников В.В., Федулов В.Ф. Под редакцией А.Ф. Золотарского. М.: Транспорт, 1980. – 270 с.
117. **Серебренников, В. В.** Железобетонные шпалы. М.: Трансжелдориздат, 1956. – 57 с.
118. Железнодорожный путь на железобетонных шпалах. Золотарский А.Ф., Балашов А.А., Исаев Н.М., Серебренников В.В., Федулов В.Ф. Под редакцией А.Ф. Золотарского. М.: Транспорт, 1967. – 441 с.
119. Влияние ширины железобетонных шпал на износ балласта // Железные дороги мира. – 2005. – №2. – С. 70-73. S. Freudenstein, M. Romstötter. International Railway Journal, 2004, №5, p. 44-46.

120. **Краснов, О. Г.** Шпалы с упругими подкладками / О.Г. Краснов, Н.Н. Астанин // Железнодорожный транспорт. – №11. – 2016. – С. 44-47.
121. Путь на шпалах с изолированной подошвой // Железные дороги мира. – 2016. – №11. – С. 77-80. Материалы компании Getzner; Eisenbahntechnische Rundschau, 2016, №7+8, S. 47-53.
122. Контактные напряжения между упругой подошвой шпалы и балластом // Железные дороги мира. – 2012. – №3. – С. 70-75. По материалам Технического университета Мюнхена и института городского транспорта ISBS в Брауншвайге; Eisenbahntechnische Rundschau, 2011, №5, S. 13-19.
123. **Певзнер, В. О.** Повышение стабильности пути в зоне стыков за счет применения упругих подшпальных прокладок / В.О. Певзнер, М.М. Железнов, В.Н. Каплин [и др.] // Вестник ВНИИЖТ: т. 75. – 2016. – № 3. – С. 140-146.
124. **Мчедлов-Петросян, О. П.** Некоторые проблемы надёжности железобетонных подрельсовых оснований / О.П. Мчедлов-Петросян, П.А. Мельниченко, А.А. Старосельский // Труды ХИИТ «Вопросы долговечности железобетонных шпал», вып. 135. Под ред. О.П. Мчедлова-Петросяна. Харьков. – 1971. – С. 5-8.
125. Шпалы из альтернативных материалов в условиях высокой осевой нагрузки // Железные дороги мира. – 2005. – №3. – С. 76-79. R. Jimenez, J. LoPresti. Railway Track & Structures, 2004, №1, p. 16-18.
126. **Стородубцева, Т. Н.** Композиционный материал на основе древесины для железнодорожных шпал: Трещиностойкость под действием физических факторов: монография; ВГУ. – Воронеж, 2002. – 216 с.
127. **Стородубцева, Т. Н.** Строительные древесностекловолокнистые композиционные материалы для изделий специального назначения: Автореф. дис. д-ра. техн. наук. – Воронеж, 2005. – 42 с.
128. **Стородубцева, Т. Н.** Применение древесных композитов в транспортном строительстве / Т.Н. Стородубцева, А.А. Аксомитный // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – №11. – С. 40-43.

129. **Шуб, М. Б.** Улучшение динамических характеристик системы «путь-подвижной состав»: дис. ... канд. техн. наук / М.Б. Шуб. – Ростов-на-Дону, 2000. – 209 с.
130. Колесников В.И., Воробьев В.Б., Шаповалов В.В., Шуб М.Б. Улучшение взаимодействия пути и подвижного состава. Монография / Под ред. М.Б. Шуба. – М.: Маршрут, 2006. – 365 с.
131. **Ghorbani, A.** Polymeric composite railway sleepers / A. Ghorbani, S. Erden // Conference: ISERSE. – 2013. – Karabük, Türkiye
132. **Manalo, A.** A review of alternative materials for replacing existing timber sleepers / A. Manalo, T. Aravinthan, W. Karunasena, A. Ticoalu // Compos. Struct. – 2010. – Vol. 92
133. Шпалы с улучшенными экологическими характеристиками // Железные дороги мира. – 2015. – №8. – С. 73-74. International Railway Journal, 2015, №5, p. 44; материалы компании GreenRail.
134. Синтетические шпалы после 30 лет службы // Железные дороги мира. – 2016. – №5. – С. 76-77. Manalo A., Aravinthan T., Karunasena W., Ticoalu A., A review of alternative materials for replacing existing timber sleepers, Compos. Struct. Vol. 92, 2010.
135. **Фадеева, Г. Д.** Железнодорожные шпалы: настоящее и будущее / Г.Д. Фадеева, К.С. Паршина, Е.В. Родина // Молодой ученый. – 2013. – №6.
136. **Погодина, Е.** Полимеры в строительстве / Е. Погодина // Пластикс. – 2011. – № 11.
137. **Мироненко, Е. В.** Перспективы применения полимерных шпал на железнодорожном транспорте / Е.В. Мироненко // Труды РГУПС. – 2016. – №3. – С. 90-93.
138. Зарубежный опыт развития производства изделий с использованием вторично переработанных полимерных композиционных материалов (обзор) / А.В. Петров, М.С. Дориомедов, С.Ю. Скрипачев // Труды ВИАМ. – 2015. – №12.

139. **Хвостик, М. Ю.** Шпалы композитные как альтернатива деревянным / М.Ю. Хвостик // Вестник ВНИИЖТ. – 2016. – Т. 75. № 3. – С. 179-182..
140. **Takai, H.** Japanese Twenty Five Years Experiences and Standardization of Synthetic Sleeper / H. Takai, Y. Sato, K. Sato // Railway Technology Newsletter. No.13, July 31, 2006.
141. Шпалы из искусственной древесины на железных дорогах Европы // Железные дороги мира. – 2011. – №3. – С. 72-74. По материалам компании Sekisui; G. Koller. Railway Gazette International, 2010, №8, p. 42-43.
142. Подтверждение эффективности шпал из искусственной древесины // Железные дороги мира. – 2014. – №10. – С. 76-78. Railway Gazette International, 2014, №8, p. 61-62, материалы компании Sekisui.
143. **Хвостик, М. Ю.** Исследования сконструированных подрельсовых опор / М.Ю. Хвостик, М.А. Стародубцева // Вестник ВНИИЖТ. – 2017. – №6. – С. 371-376.
144. **Патент РФ №185684, МПК E01B 3/00.** Композитная брусковая железнодорожная шпала / Е.В. Мироненко – Заявл. 19.12.2017; опубли. 13.12.2018, Бюл. № 35.
145. **Мироненко, Е. В.** Оптимизация формы композитных шпал / Е.В. Мироненко, Н.Н. Глубоков // Сб. трудов «Транспорт-2020». Ростов-на-Дону: РГУПС, 2020. – С. 310-313.
146. Технические указания по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути: утв. 31.03.2000 / МПС. – М.: Транспорт, 2000. – 96 с.
147. Об опасностях невидимой части «айсберга» / Г.В. Карпачевский, Б.С. Бабадеев, А.В. Варданян, Е.В. Корниенко [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 3. – С. 30–33.
148. **Новакович, М. В.** Сделать газокислородную резку безопаснее / М.В. Новакович, В.В. Карпачевский, А.Н. Игнатъев // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – №9. – С. 21.

149. **Корниенко, Е. В.** Изменение напряженно-деформированного состояния в процессе эксплуатации бесстыкового пути / Е.В. Корниенко // Вестник РГУПС. – 2019. – №1. – С. 100-105.
150. Инструкция «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов». Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 23.10.2014, №2499р.
151. **Хошино, И.** Перемещения длинных рельсовых плетей на эксплуатируемых участках / И. Хошино // Permanent Way. – 1960. – № 7.
152. **Несвит, В. А.** О некоторых результатах эксплуатационных наблюдений за поведением плетей бесстыкового пути / В.А. Несвит // Строительство и эксплуатация железнодорожного пути. – Киев, 1975.
153. **Мироненко, Е. В.** Проблемы обеспечения необходимого температурного режима работы сверхдлинных рельсовых плетей бесстыкового пути / Е.В. Мироненко // Вестник РГУПС. – 2020. – №3. – С. 139-144.
154. **Пат. № 2610761 Российская Федерация МПК E01B 11/52, E01B 29/44, B23K 101/26.** Способ соединения рельсовых плетей с восстановлением температурного режима работы бесстыкового пути при низких температурах / В.И. Новакович, Г.В. Карпачевский [и др.] – № 2015140774: заявл. 24.09.2015; опубл. 15.02.2017, Бюл. №5.
155. Новая технология для бесстыкового пути / А.И. Бунин, А.И. Марголин, А.С. Клементов [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – №4. – С.14
156. **Пат. №2472894 Российская Федерация МПК E01B 29/17.** Способ разрядки температурных напряжений в рельсовых плетях бесстыкового пути / Жулёв Г.Г., Беляев Г.П. [и др.] – №2011127293/11: заявл. 01.07.2011; опубл. 20.01.2013, Бюл. №2.
157. Натяжители или нагреватели? Новакович В.И., Карпачевский Г.В., Бабадеев И.С. [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – №6. – С. 21-22.
158. **Беломестнов, В.** «Змею Горынычу» морозы не страшны /В. Беломестнов // Гудок. – 2011. – №43.

159. **Новакович, В. И.** О новом способе сварки рельсовых плетей с обеспечением установленного температурного режима их работы / В.И. Новакович, Е.В. Мироненко, А.Н. Опацких // Вестник РГУПС. – 2020. – №4. – С. 132-137.
160. Технические указания по устройству, укладке и содержанию бесстыкового пути. Утверждены МПС РФ 03.10.1991 г. М. : Транспорт. – 1992. – 72 с.
161. **Шахунянец, Г. М.** Механические характеристики рельсов стандартного производства / Г.М. Шахунянец, И.Я. Туровский, М.Б. Смирнова, А.М. Никонов // Труды МИИТа, вып. 271, М.: Транспорт, 1968.
162. ГОСТ Р 51685-2013 Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. Утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 октября 2013 г. №1155-ст.
163. **Шур, Е. А.** Повреждения рельсов / Е.А. Шур. – М.: Интекст. – 2012. – 192 с.
164. Общие положения методики оценки воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надёжности / В.О. Певзнер, А.В. Замуховский, В.В. Третьяков [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – №1. – С. 26-30.
165. Расчеты железнодорожного пути на прочность и устойчивость / В.И. Новакович, Г.В. Карпачевский, Н.И. Залавский; РГУПС – Ростов-на-Дону, 2010. – 37 с.
166. **Новакович, В. И.** Нужен новый метод расчёта рельсов на прочность / В.И. Новакович, Г.В. Карпачевский // Путь и путевое хозяйство. – 2012. – №8. – С. 23-24.
167. **Новакович, В. И.** О методике расчёта рельсов бесстыкового пути на прочность / В.И. Новакович, Г.В. Карпачевский // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – №7. – С. 25-26.

168. **Ромен, Ю. С.** Динамика железнодорожного экипажа в рельсовой колее // Методы расчета и испытаний: труды ОАО «ВНИИЖТ». М.: ВМГ-Принт, 2014. – 210 с.
169. **Шур, Е. А.** К вопросу о совершенствовании расчетов рельсов на прочность / Е.А. Шур // Вестник ВНИИЖТ. – 2016. Т. 75. № 4. – С. 207-216.
170. Погонные сопротивления продольным перемещениям в бесстыковом пути / Е.В. Мироненко, В.Н. Залавский, Н.-А.С. Хадукаев [и др.] // Сб. трудов «Инновационные технологии в строительстве и управление техническим состоянием инфраструктуры». Ростов-на-Дону: РГУПС, 2019. – С. 146-149.
171. **Мироненко, Е. В.** Продольные силы и перемещения рельсовых плетей при низких температурах / Е.В. Мироненко // Вестник РГУПС. – 2021. – №3. – С. 151-156.
172. **Пат. №2291240 Российская Федерация МПК E01B 11/52, E01B 29/42.** Способ соединения рельсовых плетей бесстыкового пути / В.И. Новакович, А.И. Игнатъев [и др.] – №2004130410/11: заявл. 27.03.2006; опубл. 10.01.2007, Бюл. №1.
173. **Карпачевский, В. В.** О сварке рельсовых плетей при низких температурах с одновременным восстановлением их температуры закрепления с применением подогрева / В.В. Карпачевский, М.В. Новакович, В.Н. Залавский // Труды РГУПС. – 2016. – №4. – С. 30-32.
174. Бесстыковой путь при температурах рельсов ниже температуры закрепления плетей / Е.В. Мироненко, В.Н. Залавский, Н.-А.С. Хадукаев [и др.] // Труды РГУПС. – 2020. – №3. – С. 25-29.
175. О проблемах бесстыкового пути при температурах рельсовых плетей ниже температуры их закрепления / Е.В. Мироненко, В.Н. Залавский, Н.-А.С. Хадукаев [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2020. – №11. – С. 27-28.
176. **Карпачевский, Г. В.** Проблема окончательного восстановления рельсовых плетей бесстыкового пути сваркой / Г.В. Карпачевский // Вестник РГУПС. – 2012. – №4. – С. 132-135.

177. Как восстанавливать плети сваркой, обеспечивая температурный режим? / В.И. Новакович, Г.В. Карпачевский, А.В. Варданян [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – №9. – С. 5-6.
178. **Новакович, В. И.** Алюминотермитная сварка с восстановлением температурного режима бесстыкового пути / В.И. Новакович, Г.В. Карпачевский, В.Н. Залавский // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – №5. – С. 5-7.
179. **Климов, В. Г.** Причины образования дефектов типа «горячая трещина» в сварных термитных стыках и методы их обнаружения / В.Г. Климов, В.Д. Ленкин, Д.В. Мищенко // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – №10. – С. 28-32.
180. **Мироненко, Е. В.** Способы восстановления и удлинения рельсовых плетей сваркой с обеспечением установленного температурного режима работы / Е.В. Мироненко // Труды РГУПС. – 2020. – №3. – С. 30-34.
181. **Пат. №2551751 Российская Федерация МПК В23К 23/00, Е01В 31/18, Е04Н 15/02.** Способ алюминотермитной сварки рельсов при отрицательных температурах окружающей среды / В.Д. Ленкин, А.Р. Ленский – №2013120751/02: заявл. 19.04.2013; опубл. 27.05.2015, Бюл. №15.
182. **Воронин, Н. Н.** Алюминотермитная сварка рельсов зимой / Н.Н. Воронин, О.Н. Трынкова, О.В. Фомичева // Мир транспорта. – 2012. – №4. – С. 56-59.
183. **Пат. №2464141 Российская Федерация МПК В23К 23/00, Е04Н 15/02, Е01В 31/18.** Способ алюминотермитной сварки рельсов при отрицательных температурах / Н.Н. Воронин, Н.Н. Прохоров, В.И. Карабанов [и др.] – №2010126929/02: заявл. 02.07.2010; опубл. 20.10.2012, Бюл. №29.

Утверждаю:

Заместитель начальника  
Северо-Кавказской  
дирекции инфраструктуры –  
филиала Центральной дирекции  
ОАО «РЖД»

 Р.В. Гукасян  
« 21 » 2021 г.

### АКТ

**использования результатов и рекомендаций, разработанных в диссертационной работе Мироненко Е.В. на тему «Разработка мер по обеспечению необходимого температурного режима работы бесстыкового пути со сверхдлинными рельсовыми плетями» в Северо-Кавказской дирекции инфраструктуры – филиала Центральной дирекции ОАО «РЖД»**

Мы, нижеподписавшиеся: начальник технического отдела службы пути Северо-Кавказской дирекции инфраструктуры – филиала Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» Нанавова Г.С., зав. кафедрой «Путь и путевое хозяйство» ФГБОУ ВО РГУПС к.т.н., доцент Карпачевский Г.В., д.т.н., профессор кафедры «Путь и путевое хозяйство» ФГБОУ ВО РГУПС Новакович В.И., автор предложения, ассистент Мироненко Е.В. составили настоящий акт в том, что в Северо-Кавказской дирекции инфраструктуры проанализированы результаты теоретических и экспериментальных исследований Мироненко Е.В. в плане применения в расчётах бесстыкового пути предложенных минимальных и максимальных значений погонного сопротивления балласта, рассмотрения возможности использования разработанных автором предложений по проведению термитной сварки рельсов с восстановлением необходимой температуры закрепления плетей.

Предложение Мироненко Е.В. заключается в применении в расчётах бесстыкового пути предложенных минимальных и максимальных значений погонного сопротивления балласта для обеспечения надёжности его работы при эксплуатации и ремонтах.

Начальник технического отдела службы пути  
Северо-Кавказской дирекции инфраструктуры –  
филиала Центральной дирекции инфраструктуры  
ОАО «РЖД»

 Г.С. Нанавова

Зав. кафедрой «Путь и путевое хозяйство»  
ФГБОУ ВО РГУПС к.т.н., доцент

 Г.В. Карпачевский

Профессор кафедры «Путь и путевое хозяйство»  
ФГБОУ ВО РГУПС, д.т.н.

 В.И. Новакович

Автор предложения, ассистент кафедры  
«Путь и путевое хозяйство» ФГБОУ ВО РГУПС

 Е.В. Мироненко