

На правах рукописи

**Петров Александр Владимирович**



**ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ЖЕСТКОСТЬ УЗЛОВ  
РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ БЕЗБАЛЛАСТНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПУТИ**

2.9.2. Железнодорожный путь,  
изыскание и проектирование железных дорог

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

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

**Научный руководитель:** **Савин Александр Владимирович,**  
доктор технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Андреева Людмила Александровна,**  
доктор технических наук, закрытое  
акционерное общество  
«ПРОМТРАНСНИИПРОЕКТ»,  
заместитель генерального директора

**Овчинников Дмитрий Владиславович,**  
кандидат технических наук, федеральное  
государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Самарский государственный  
университет путей сообщения», кафедра  
«Путь и путевое хозяйство», доцент

**Ведущая организация:** Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»)

Защита состоится «18» мая 2023 года в 14:30 на заседании диссертационного совета 40.2.002.03 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 (ул. Часовая д. 22/2, стр. 1, ауд. 329).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РУТ (МИИТ) и на сайте [http:// www.miit.ru](http://www.miit.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Гринь Елена Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Развитие высокоскоростного железнодорожного сообщения в нашей стране предполагает строительство новых выделенных железнодорожных линий для высокоскоростного железнодорожного движения. Наиболее перспективной в настоящее время является высокоскоростная магистраль (далее ВСМ) «Москва – Санкт-Петербург» со скоростями движения до 400 км/ч. Также прорабатывались ещё две линии – ВСМ «Москва – Казань» и ВСМ «Урал», соединяющая Екатеринбург и Челябинск. Все проекты ВСМ предполагают применение новых технологических и инженерных решений, обеспечивающих высочайший уровень надежности и безопасности перевозок пассажиров и грузов, которые обеспечат необходимый комфорт для пассажиров.

Мировой опыт строительства и эксплуатации линий ВСМ подтвердил эффективность применения безбалластной конструкции пути (далее БКП). Например, проработка проекта ВСМ «Москва – Казань» подразумевала применение в качестве базовой безбалластную плитную конструкцию пути CRTS III RUS, адаптированную под российские условия эксплуатации. Известно, что в БКП рельсовые скрепления с промежуточным эластичным слоем являются главным элементом, упругие свойства которых формируют от 80 до 95% упругих свойств всей конструкции пути в целом. Это подтверждается натурными измерениями прогиба рельса под воздействием нагрузок от подвижного состава.

В отечественной документации по техническому регулированию недостаточно полно отражены требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений для БКП. Зарубежная нормативно-техническая документация регламентирует требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем для БКП, учитывая влияние низких температур. Нижние пороговые значения испытательных температур в немецких и китайских нормативах установлены, соответственно,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Согласно требованиям предпроектной документация линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург», для российских условий эксплуатации необходимо учитывать минимальную температуру  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Таким образом актуальными становятся вопросы по усовершенствованию расчётной модели определения упругого прогиба рельса от воздействия подвижного состава на БКП с учётом влияния низких температур с последующим формированием

требований к упругим характеристикам рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем для БКП, работающих в условиях проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург» при воздействии низких температур до  $-50$  °С; и по корректировке методов подтверждения соответствия этим требованиям.

**Степень разработанности темы исследования.** Многолетние исследования и опытно-производственные работы по решению вопросов работы промежуточных рельсовых скреплений в различных конструкциях пути и связанных с этим проблем посвящены труды отечественных ученых: Абдурашитова А.Ю., Альбрехта В.Г., Ананьева Н.И., Ашпиза Е.С., Барабошина В.Ф., Белькова В.М., Виноградова А.Г., Ермакова В.М., Жангабыловой А.М., Замуховского А.В., Каменского В.Б., Карпущенко Н.И., Когана А.Я., Козлова Д.В., Козлова И.С., Колоса А.Ф., Кочергина В.В., Кравченко Н.Д., Купцова В.В., Лебедева А.В., Лысюка В.С., Наумова Б.В., Овчинникова Д.В., Савина А.В., Певзнера В.О., Шахунянца Г.М. и других.

За рубежом аналогичными исследованиями занимались следующие учёные: E. Berggren, W. Boesterling, S. Chang, K. Cheng, Y. Chiang, D. Diederich, J. Eisenmann, C. Esveld, S. Freudenstein, K. Giannakos, S. Kaewunruen, B. Lechner, X. Lei, G. Leykauf, B. Lichtberger, J. Liu, G. Michas, O. Nigel, A. Remennikov, R. Schilder, K. Witt, S. Wu и другие.

Принцип определения упругого прогиба рельса в БКП от воздействия подвижного состава основан на гипотезе Фусса-Винклера, сформулированной в 1867 году. Однако исследований, направленных на изучение влияния низких температур на упругие характеристики рельсовых скреплений в БКП, явно недостаточно.

**Цель диссертационной работы** заключается в определении влияния низких температур на жёсткость узлов рельсовых скреплений БКП, работающих в условиях проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург».

**Задачи исследования:**

1) На основе обобщения и анализа отечественного и зарубежного опыта, выбрать математическую модель определения упругого прогиба рельса от воздействия подвижного состава на БКП и дополнить ее коэффициентами, позволяющими учитывать влияние низких температур на изменение жёсткости рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем в БКП;

2) Экспериментальным путем определить коэффициенты изменения статической и динамической жёсткостей эластичной прокладки узла рельсового скрепления для БКП в зависимости от воздействия низких температур;

3) Выполнить экспериментальную верификацию адекватности расчетов дополненной математической модели;

4) На основе расчетов и экспериментов сформировать требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем для БКП;

5) Разработать рекомендации по корректировке методов определения упругих характеристик узла рельсового скрепления с промежуточным эластичным слоем для БКП с учетом влияния низких температур с целью подтверждения соответствия заявленным требованиям.

**Объектом исследования** является упругое рельсовое скрепление с промежуточным эластичным слоем для БКП.

**Предметом исследования** является процесс изменения жесткости узла рельсового скрепления с промежуточным эластичным слоем в БКП с учётом влияния низких температур

**Научная новизна.** Научная новизна работы заключается в следующем:

1) Усовершенствована математическая модель определения прогиба рельса БКП посредством введения коэффициентов, которые позволяют учитывать воздействие низких температур на изменение жёсткости рельсовых скреплений;

2) Установлены коэффициенты изменения статической и динамической жёсткостей эластичной прокладки узла рельсового скрепления для БКП в зависимости от воздействия низких температур;

3) Определён прогиб рельса БКП серией натурных испытаний на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ»;

4) Предложены методы определения статической и динамической жесткостей эластичной прокладки рельсового скрепления для БКП с уточнённым интервалом испытательных нагрузок и учётом влияния низких температур;

5) Сформированы дополнительные требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем БКП для условий проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург».

**Теоретическая значимость работы** состоит в уточнении расчётной математической модели определения прогиба рельса БКП коэффициентами, определяемыми полиномиальными функциями, полученными аппроксимацией зависимостей влияния низких температур на статическую и динамическую жёсткость эластичной прокладки рельсового скрепления.

**Практическая значимость:**

Предложенная математическая модель и результаты экспериментов использованы для:

- формирования предложений по изменению ГОСТ 32698-2014 Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля;
- разработки узла рельсового скрепления (заявки на патент №2022123430, №2022123431 от 01.09.2022).

Результаты данной работы могут быть использованы для:

- формирования требований к упругим характеристикам рельсовых скреплений с учетом влияния низких температур и методам их подтверждения в целях обязательного подтверждения соответствия при сертификации или декларировании;
- выбора наиболее подходящей конструкции безбалластного пути для конкретных условий эксплуатации;
- расчета стоимости жизненного цикла и прогнозирования технического обслуживания безбалластного пути.

**Методология и методы исследования.**

Поставленные задачи решены на основе анализа выполненных научно-исследовательских работ по данной тематике отечественными и зарубежными учеными, анализа отечественной и зарубежной нормативной базы в области технического регулирования рельсовых скреплений, проведения лабораторных испытаний и натурных экспериментов на действующем опытной участке пути на Экспериментальной кольце АО «ВНИИЖТ», а также математического моделирования, основанного на расчете пути согласно гипотезе Фусса-Винклера.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) Уточнение расчётной модели определения упругого прогиба рельса от воздействия подвижного состава на БКП посредством введения

коэффициентов, учитывающих влияние низких температур на изменение жесткости эластичной прокладки;

2) Коэффициенты соотношения динамической жёсткости к статической жесткости эластичных прокладок с учетом влияния низких температур до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

3) Дополнительные требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений БКП для условий эксплуатации проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург» с учетом влияния температур до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

#### **Степень достоверности.**

Достоверность результатов исследования подтверждается сходимостью результатов математического моделирования с данными, полученными в ходе лабораторных и полигонных испытаний. Результаты лабораторных испытаний подтверждаются аккредитацией испытательного центра, использованием аттестованных методик и поверенных средств измерений.

#### **Апробация результатов.**

Результаты исследований использованы в Научно-техническом отчёте об испытаниях безбалластных конструкций пути четырех типов (Tines, Alstom, MaxBögl, LVT). Тема 6.049.РТП "Испытания элементов инфраструктуры для высокоскоростного движения на Экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ». Договор №1057/14/990 от 04.12.2014 г.

Основные положения и результаты работы были доложены и одобрены на XII международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» посвященной памяти профессора Г.М. Шахунянца (Москва, 1-2 апреля 2015 года); на XIII международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» посвященной памяти профессора Г.М. Шахунянца (Москва, 31 марта – 01 апреля 2016 года); на 14-й научно-практической конференции «Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. Транспортная инфраструктура промышленных предприятий» (Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II, Москва, 2019 год); на международной интернет-конференции «Современные проблемы железнодорожного транспорта» (Москва, 21-22 марта 2019 года); на всероссийской научно-практической конференции к 75-летию аспирантуры Научно-Исследовательского Института Железнодорожного Транспорта

«Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта» (Москва, 5 июня 2019 года).

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 170 наименований, 6 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** изложено обоснование актуальности темы и обозначена цель исследований, а именно: адаптация расчётной модели определения упругого прогиба рельса при воздействии подвижного состава на БКП в зависимости от температуры окружающего воздуха и формирование требований к упругим характеристикам рельсовых скреплений для БКП, эксплуатируемых в условиях проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург» при воздействии низких температур до  $-50^{\circ}\text{C}$ . Также обозначен объект исследования и приведены методы исследования.

**В первой главе** проведён анализ отечественных и зарубежных исследований и опытно-производственных работ, связанных с работой промежуточных рельсовых скреплений в различных конструкциях балластного и безбалластного пути. Рельсовые скрепления работают в непосредственном контакте с рельсом и подрельсовым основанием. Основной задачей рельсовых скреплений, с момента их применения в конструкции железнодорожного пути, является сохранение стабильности ширины рельсовой колеи на длительном промежутке времени под обращающимися поездами установленной массы с установленной скоростью. Также рельсовые скрепления являются связующим узлом, который передаёт разночастотную динамическую нагрузку от проходящего подвижного состава на нижние элементы конструкции пути. В отечественной практике промежуточные рельсовые скрепления классифицируются по типу подрельсового основания, типу прикрепителя, виду натяжения прикрепителя, виду соединения и т.д. Имеются различные подходы по классификации рельсовых скреплений. В зарубежных источниках литературы рельсовые скрепления классифицируются по признакам применения в конкретных условиях эксплуатации, а также в зависимости от решения ими определённых задач.

Рассмотрены вопросы работы рельсовых скреплений на участках высокоскоростного, скоростного и смешанного движения на магистральных линиях ОАО «РЖД». Приводится опыт эксплуатации линий высокоскоростного



железнодорожного сообщения на различных конструкциях пути. Каждый узел рельсового скрепления должен работать упруго в вертикальном направлении как при перемещении рельса под нагрузкой вниз, так и при его перемещении вверх в пределах обратной волны изгиба рельсов. Для условий работы в БКП особенно важны упругие характеристики рельсовых скреплений и их элементов. Основываясь на мировом опыте эксплуатации ВСМ в качестве базовых моделей рассматриваются рельсовые скрепления типа System 300 и WJ-8C. Согласно отечественной и зарубежной нормативной документации на промежуточные рельсовые скрепления, упругие свойства рельсовых скреплений должны быть стабильны в различных условиях воздействия температуры окружающего воздуха.

В результате проведённого анализа исследовательских работ, а также документации в области технического регулирования рельсовых скреплений сформулирован ряд постановочных вопросов:

- какая математическая модель позволяет определить упругий прогиб рельса при воздействии подвижного состава на БКП с учетом влияния низких температур для условий проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург»?

- каким образом влияет температура окружающего воздуха в диапазоне от +23 °С до -50 °С на упругие характеристики узла рельсового скрепления, работающего в БКП?

- какими должны быть требования к рельсовым скреплениям с промежуточным эластичным слоем БКП для условий проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург»?

- как проверить соответствие этим требованиям?

В следующих главах последовательно излагаются ответы на поставленные вопросы.

**Во второй главе** рассмотрены и проанализированы отечественные и зарубежные методы оценки воздействия подвижного состава на путь. На основании анализа рассматриваемых методов в качестве расчетной выбрана математическая модель Циммерманна-Айзенманна. Модель основана на теории Фусса-Винклера, позволяющая определить упругий прогиб рельса в БКП под воздействием нагрузок от подвижного состава. С целью адаптации расчётной модели под условия влияния низких температур до -50 °С, предлагается дополнить известную математическую модель формулой определения

жёсткости узла рельсового скрепления с промежуточным эластичным слоем (рисунок 1) с введением коэффициентов изменения статической и динамической жёсткости эластичных прокладок в зависимости от температуры окружающего воздуха в диапазоне от +23 °С до -50°С, определённых экспериментальным путём в лабораторных условиях.



Рисунок 1 – схематичное изображение прокладок в узле скрепления

Усовершенствованная расчётная модель позволяет определить упругий прогиб рельса как при статическом, так и динамическом нагружении рельса от подвижного состава. Таким образом упругий прогиб рельса определяется системой уравнений:

$$y = \frac{a}{2cL} \sum (Q_i \eta_i) \quad (1)$$

$$L = \left( \frac{4Ela}{c} \right)^{0,25} \quad (2)$$

$$c = \frac{c_{пр} \cdot c_{эл}}{c_{пр} + c_{эл}} \quad (3)$$

$$c_{stat\ эн\ ti} = c_{stat1} \cdot \tau_{stati} \quad (4)$$

$$c_{dyn\ эн\ ti} = c_{stat\ эн\ ti} \cdot \tau_{dyni} \quad (5)$$

$$\eta_i = \frac{\sin \xi_i + \cos \xi_i}{e^{\xi_i}} \quad (6)$$

$$\xi_i = \frac{x_i}{L}, \quad (7)$$

где  $E$  – модуль упругости рельсовой стали, Н/мм<sup>2</sup>;

$I$  – момент инерции рельса,  $\text{мм}^4$ ;

$a$  – расстояние между осями дискретных точек опирания (промежуточных рельсовых креплений),  $\text{мм}$ ;

$c$  – жёсткость узла рельсового крепления,  $\text{Н/мм}$ ;

$c_{\text{пр}}$  – жесткость подрельсовой прокладки (рисунок 1); для статического и динамического расчета соответственно  $c_{\text{statпр}} = 500$   $\text{кН/мм}$  и  $c_{\text{dynпр}} = 1500$   $\text{кН/мм}$  принимаются постоянными без учета влияния температуры окружающего воздуха

$c_{\text{эл}}$  – жесткость эластичной прокладки (рисунок 1);

$c_{\text{stat1}}$  – значение статической жёсткости эластичной прокладки, измеренное при комнатной температуре или заявленное производителем,  $\text{кН/мм}$ ;

$\tau_{\text{stati}}$  – коэффициент изменения статической жёсткости эластичной прокладки при  $i$ -той температуре окружающего воздуха;

$\tau_{\text{dyni}}$  – коэффициент изменения динамической жёсткости эластичной прокладки при  $i$ -той температуре окружающего воздуха;

$Q_i$  – сила, действующая на колесо, равная половине осевой нагрузки,  $\text{Н}$ ;

$\eta_i$  – параметрический функциональный фактор, для учёта влияния соседних осей.

$x_i$  – расстояние от  $i$ -той оси до рассматриваемой точки,  $\text{мм}$ ;

Принимая во внимание взаимовлияние близко расположенных друг к другу колёсных пар на прогиб рельса, автором построена расчётная модель определения прогиба рельса при воздействии на путь двух двухосных тележек, имитирующих сцепку двух вагонов, как представлено на рисунке 2.

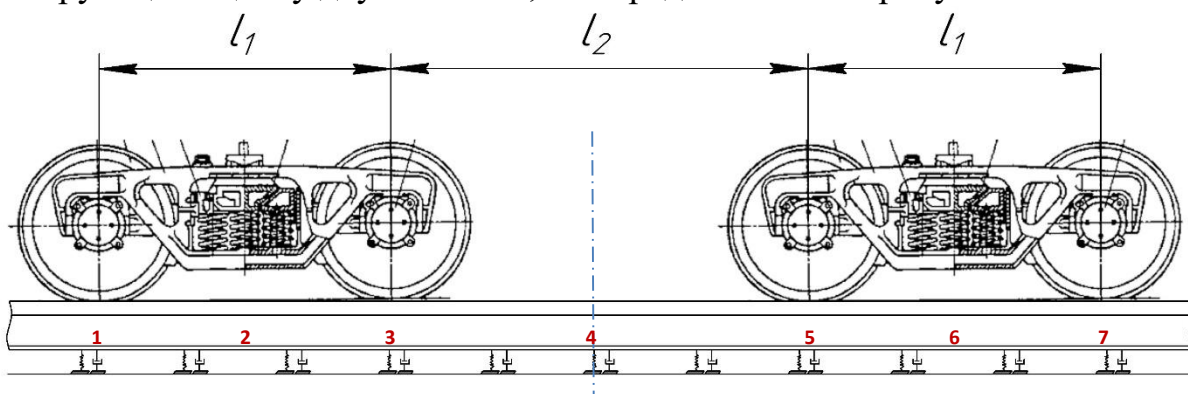


Рисунок 2 – Схема расположения тележек

В расчёте, связанном с динамическим взаимодействием подвижного состава на БКП согласно модели Айзенманна, учитывается коэффициент динамического увеличения жесткости узла рельсового крепления, который зависит от скорости движения и типа подвижного состава. Для условий эксплуатации БКП проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург»

коэффициент динамического увеличения определяется по следующему равенству:

$$k_{dyn} = 1 + 0,45\varphi \quad (8)$$

где,  $\varphi$  – коэффициент влияния скоростей движения подвижного состава.

При скоростях движения менее 60 км/ч данный коэффициент принимается  $\varphi = 1$  вне зависимости типа движения, в других случаях определяется по следующим равенствам:

для грузового движения при скоростях  $60 < V \leq 140$  км/ч

$$\varphi = 1 + 0,5 \cdot \frac{V-60}{80} \quad (9)$$

для пассажирского движения при скоростях  $60 < V \leq 400$  км/ч

$$\varphi = 1 + 0,5 \cdot \frac{V-60}{190} \quad (10)$$

Усовершенствованная математическая модель позволяет произвести вычисления прогиба рельса БКП в заданной точке с учётом влияния отрицательной температуры окружающей среды. Коэффициенты изменения статической и динамической жёсткости эластичной прокладки получены посредством обработки данных нижеприведенных результатов лабораторных испытаний. Согласно предлагаемой модели были рассчитаны прогибы рельса БКП при воздействии подвижного состава в статическом и динамическом нагружении в диапазоне температур от  $-50$  °С до  $+23$  °С для грузового движения с осевой нагрузкой 250 кН со скоростью 70 км/ч, статической жесткостью эластичной прокладки 27,5 кН/мм, расстоянием между узлами скрепления 650 мм и рельсом типа Р65, расстоянием  $l_1=1850$  мм, расстоянием  $l_2=3420$  мм (рисунок 3).

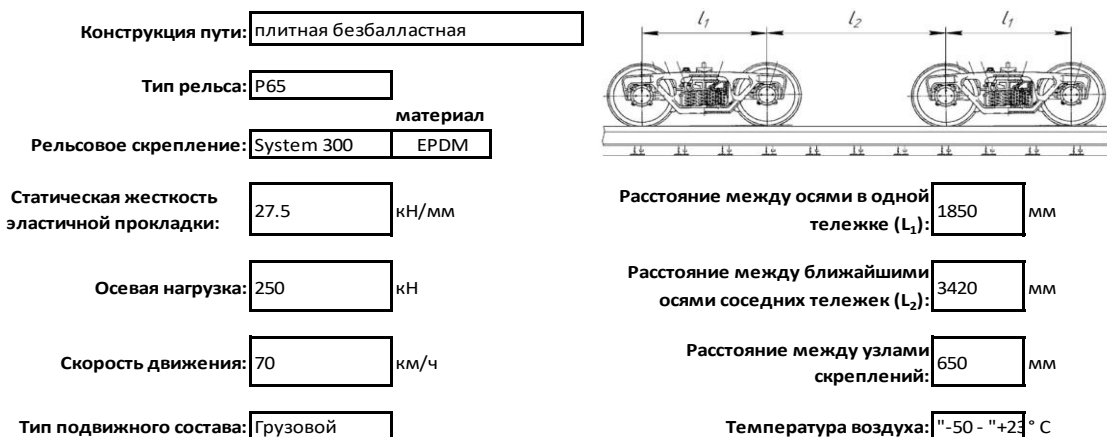


Рисунок 3 – Входные параметры для расчета

Результаты вычислений изменения прогиба рельса БКП от температуры для рельсового скрепления типа System 300 с промежуточным эластичным слоем для эластичных прокладок из двух материалов EPDM и Byrel, представлены в виде графика зависимостей на рисунке 4.

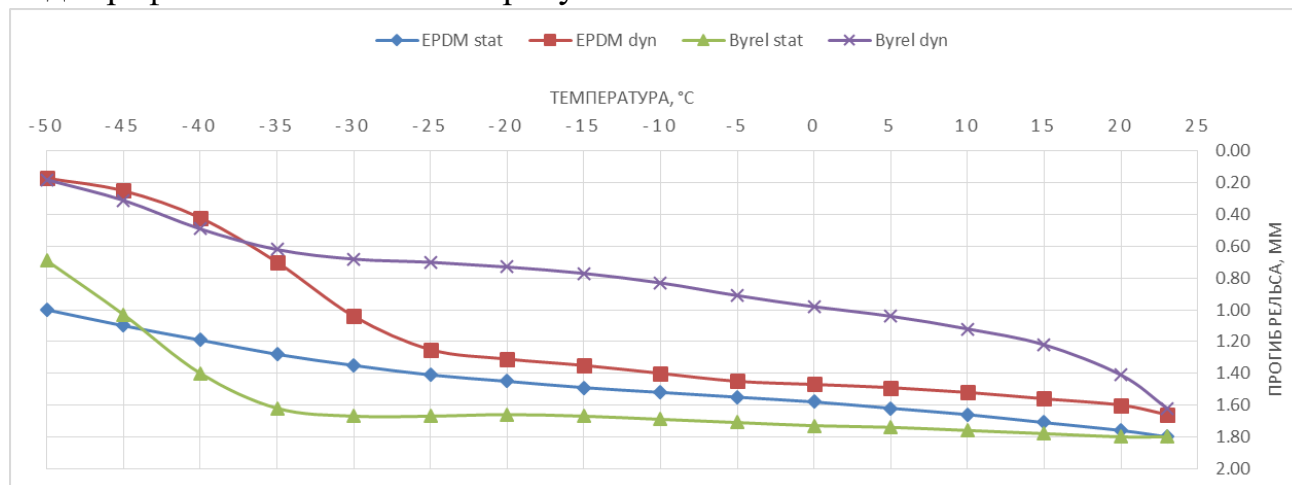


Рисунок 4 – График зависимостей прогиба рельса от температуры

Для систематизации процессов вычисления адаптированная математическая модель реализована автором в виде макроса в Excel и в виде программного кода комплекса Matlab. Таким образом, подтверждается теоретическая возможность применения предлагаемой математической модели по прогнозированию упругого прогиба рельса БКП при различных температурах окружающего воздуха условий эксплуатации БКП проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург».

**В третьей главе** представлены результаты лабораторных испытаний по определению статической и динамической жёсткости эластичных промежуточных прокладок при воздействии низких температур. Лабораторным испытаниям подвергались образцы эластичных прокладок с номинальной статической жесткостью 22,5 кН/мм изготовленных из материала EPDM и Byrel. Испытания проводились по методикам отличающимся от методик, рекомендованных ГОСТ 34078<sup>1</sup>. До начала испытаний испытываемую эластичную прокладку, а также все детали и оборудование оставляют в среде с температурой  $23\pm 3$  °C минимум на 24 часа. Затем, в случае проведения испытаний при температуре отличной от комнатной температуры, включается холодильная установка для достижения необходимой температуры. Испытания начинают через 16 часов после достижения требуемого значения (рисунок 5).

<sup>1</sup> ГОСТ 34078-2017 – Межгосударственный стандарт «Прокладки рельсовых скреплений железнодорожного пути. Технические условия»

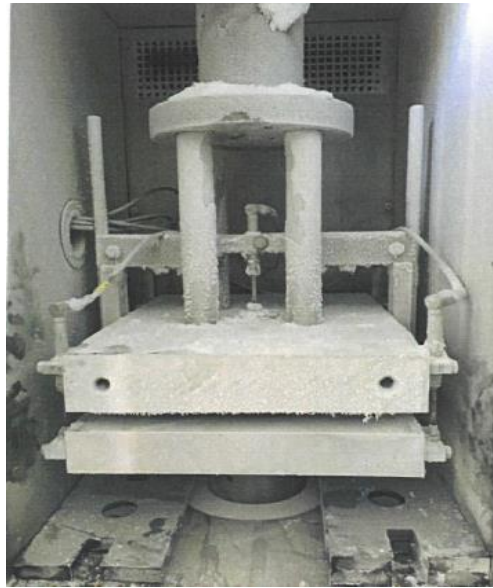


Рисунок 5 – Выдержка образцов и оборудования при температуре  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$

После помещения испытываемого образца на испытательную установку было первоначально выполнено три калибровочных цикла нагружения и снятия нагрузки в диапазоне от 18 кН до 85 кН. При третьем цикле нагружения была произведена регистрация нагрузки и деформации с частотой дискретизации 10 Гц. Статическая жесткость была определена на основании деформаций при диапазоне нагрузок от 18 кН до 68 кН. Скорость приложения нагрузки составила 2 кН/с. Затем на образце была повторно приложена нагрузка до соответствующего среднего нагружения в 43 кН применяемой синусоидальной нагрузки на основе со скоростью 2 кН/с. После достижения средней нагрузки была выполнена синусоидальная нагрузка с частотой 10 Гц при предельной нагрузке 68 кН и минимальной нагрузке 18 кН. При этом измеренные значения были получены при частоте дискретизации 500 Гц.

Для российских условий эксплуатации автор рассматривал изменение показателей жёсткости эластичных прокладок в диапазоне температур от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , которые представлены в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний эластичных прокладок при воздействии температур в диапазоне от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (номинальная жёсткость 22,5 кН/мм)

T, $^{\circ}\text{C}$	Значение жёсткости, кН/мм						
	-50	-35	-20	-10	0	+23	+50
EPDM							
$c_{stat}$	54,40	39,50	33,25	31,80	29,90	25,70	24,90
$c_{dyn}$	949,55	87,73	37,85	35,40	33,00	28,60	26,70
Byrel							
$c_{stat}$	88,00	28,01	26,94	26,41	25,78	24,56	23,92
$c_{dyn}$	797,70	96,28	78,52	65,48	53,19	27,99	25,12

Исходя из полученных в лабораторных условиях экспериментальным путем значений статической и динамической жёсткости эластичных прокладок определены коэффициенты зависимости изменения статической и динамической жесткости эластичных промежуточных прокладок от температуры воздуха окружающей среды в диапазоне температур от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Автор предлагает определять аналогии с ГОСТ 34078:

коэффициент изменения статической жёсткости эластичной прокладки, как отношение значения статической жёсткости, измеренного при заданной температуре, к значению статической жёсткости, измеренному при комнатной температуре ( $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ):

$$\tau_{stati} = \frac{c_{stati}}{c_{stati1}}, \quad (11)$$

где  $c_{stati1}$  – значение статической жёсткости эластичной прокладки, измеренное при комнатной температуре, кН/мм;

$c_{stati}$  – значение статической жёсткости эластичной прокладки, измеренное при заданной температуре, кН/мм.

Коэффициент изменения динамической жёсткости эластичной прокладки, как отношение значения динамической жесткости, измеренному при заданной температуре, к значению статической жесткости, измеренному при аналогичной температуре окружающей среды:

$$\tau_{dyni} = \frac{c_{dyni}}{c_{stati}}, \quad (12)$$

где  $c_{dyni}$  – значение динамической жёсткости эластичной прокладки, измеренное при заданной температуре, кН/мм;

$c_{stati}$  – значение статической жёсткости эластичной прокладки, измеренное при заданной температуре, аналогичной при определении  $c_{dyni}$ , кН/мм.

Были определены значения коэффициентов изменения статической и динамической жёсткости эластичных прокладок из материалов EPDM и Вулел в диапазоне температур от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Полученные значения коэффициентов аппроксимированы функциями и применены в уточнённой расчётной модели.

На Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» с участием автора проведены испытания четырех БКП с различными типами рельсовых креплений. На момент закрытия движения пропущенный тоннаж по экспериментальному участку составил 1066,55 млн. т брутто пропущенного



груза. Впервые в российских условиях эксплуатации был проведен эксперимент по определению фактического прогиба рельса, плиты и несущего бетонного слоя на конструкции пути Feste Fahrbahn Voegl (далее FFB) под обращающимся грузовым составом. Условия при проведении испытаний следующие: рельсовые крепления с эластичными прокладками номинальной статической жесткостью 27,5 кН/мм материала EPDM, грузовое движение со скоростью 70 км/ч, максимальная осевая нагрузка 250 кН/ось, температура воздуха -2 °С. На каждой плите в трех местах устанавливались датчики перемещения в трех различных слоях - между рельсом и путевой плитой (рисунок 6), путевой плитой и несущей плитой, несущей плитой и тощим бетоном соответственно. Согласно серии среднестатистических результатов измерения экспериментальным путем прогиба рельса, среднее значение прогиба рельса составляет 1,55 мм со среднеквадратичным отклонением 0,17 мм (рисунок 7).

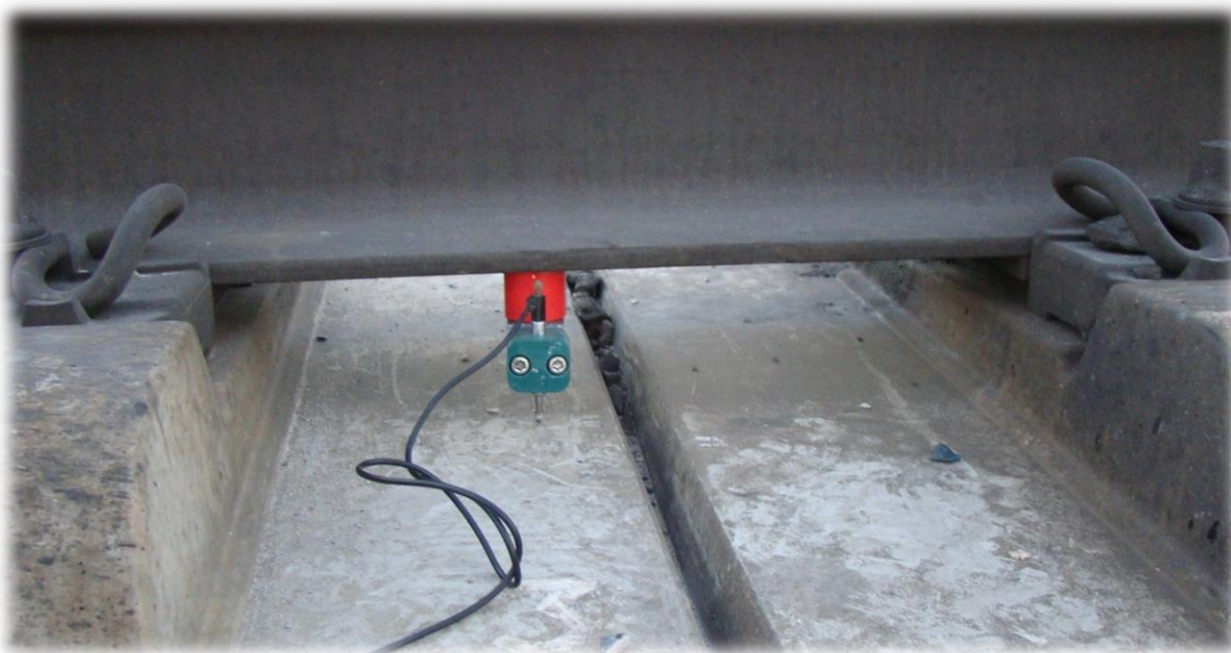


Рисунок 6 – Датчик перемещения между рельсом и плитой



Рисунок 7 – Прогибы рельса конструкции Feste Fahrbahn Voegl



Для условий, аналогичных имевшим место во время эксперимента, автором проведены вычисления прогибов рельса от статического и динамического нагружения подвижного состава безбалластного пути. Результаты расчетов представлены на рисунке 8. Расчетные значения прогиба рельса для заданных условий при статическом нагружении равняются 1,57 мм, а при динамическом нагружении – 1,47 мм. Измерения на Экспериментальном кольце осуществлялись под динамической нагрузкой от подвижного состава, таким образом сходимость результатов вычислений с экспериментальными данными составляет 94,8%.

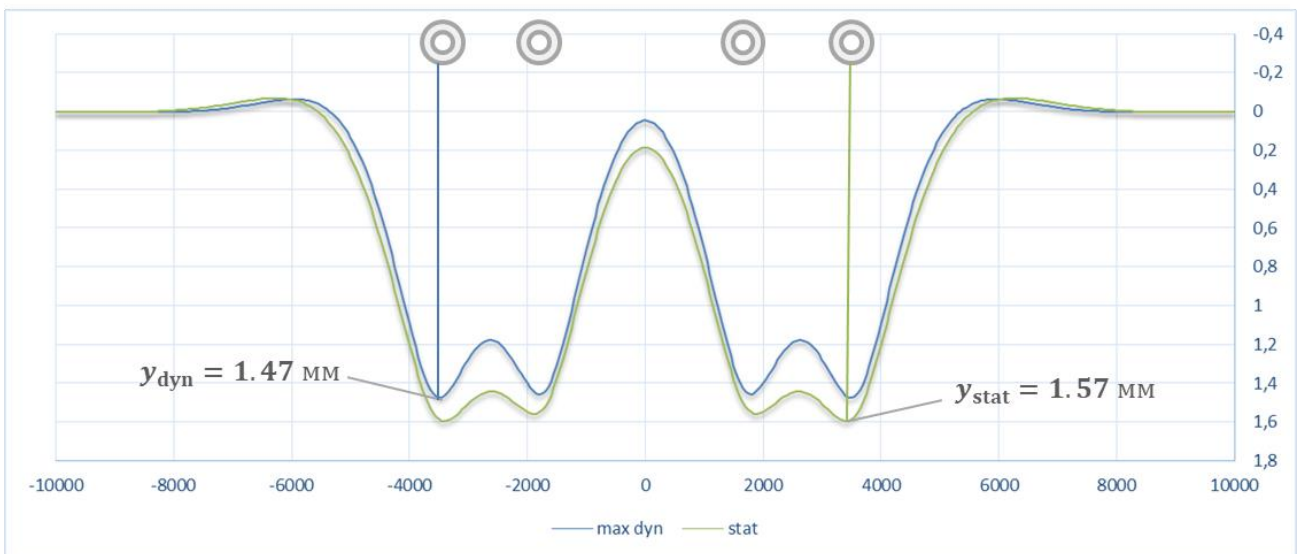


Рисунок 8 – Результаты математического моделирования аналогично условиям эксперимента на Экспериментальном кольце

С точки зрения надёжности рельсовых креплений с промежуточным эластичным слоем, за период опытной эксплуатации рельсовых креплений System 300 в конструкции FFB зафиксированы выходы и произведена замена 4 (четырех) клемм SKL 15, 1 (одного) бокового упора Wfp 15a и 1 (одного) шурупа Ss36/230. Выход элементов связан с выправочно-подбивочными работами на въездном участке переменной жёсткости.

**В четвертой главе** проводится анализ отечественной и зарубежной нормативной документации в области регулирования требований к промежуточным рельсовым креплениям. Наибольший объем требований и методы подтверждения данных требований прописаны в регулирующих документах Евросоюза и Китая, но в этих документах отсутствуют требования по проверке изменения упругих характеристик упругих прокладок при температурах окружающей среды ниже  $-35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для российских условий эксплуатации необходимо учитывать воздействие низкой температур  $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Действующая отечественная нормативно-техническая документация,

регулирующая требования к рельсовым скреплениям, распространяет действие на установление требований к рельсовым скреплениям и подрельсовым прокладкам, применяемым в конструкции классического пути со шпальным основанием. Отсутствуют требования к упругим характеристикам рельсовых скреплений с промежуточным эластичным слоем, применяемым в безбалластных конструкциях пути, а также отсутствуют методы подтверждения указанных требований.

Основываясь на мировой практике эксплуатации линий ВСМ на БКП для проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург» в расчетах принимается целевой прогиб рельса в диапазоне от 1 до 2 мм. Смоделирован прогиб рельса безбалластного пути в статическом (рисунок 9) и динамическом (рисунок 10 и 11) нагружениях от воздействия электропоезда ЭВС «Сапсан» на скорости до 400 км/ч для следующих условий: типа рельса R65; конструкция пути FFV, расстояние между узлами скреплений 650 мм; китайская конструкция пути CRTS III RUS, расстояние между узлами скреплений 592 мм; проектная конструкция пути 1840, расстояние между узлами скреплений 543 мм; температура воздуха +23 °С; жёсткость узлов рельсовых скреплений в диапазоне от 15 кН/мм до 33 кН/мм; материал эластичных прокладок EPDM и Byrel;

При статическом нагружении отмечено, что для конструкции FFV целевой минимальный прогиб рельса в 1 мм обеспечивается узлами рельсовых скреплений с жёсткостью 32 кН/мм, конструкции CRTS III RUS – 29 кН/мм, проектной конструкции 1840 – 27 кН/мм. При динамическом нагружении с эластичной прокладкой из материала EPDM для указанных конструкций соответственно – 25 кН/мм; 22,5 кН/мм; 20,5 кН/мм. При динамическом нагружении с эластичной прокладкой из материала Byrel для указанных конструкций соответственно – 23,5 кН/мм; 21,5 кН/мм; 20 кН/мм. В таком случае мы имеем наибольшее значение жёсткости эластичной прокладки в 27 кН/мм, при котором выполняется требования минимального прогиба рельса в 1 мм.

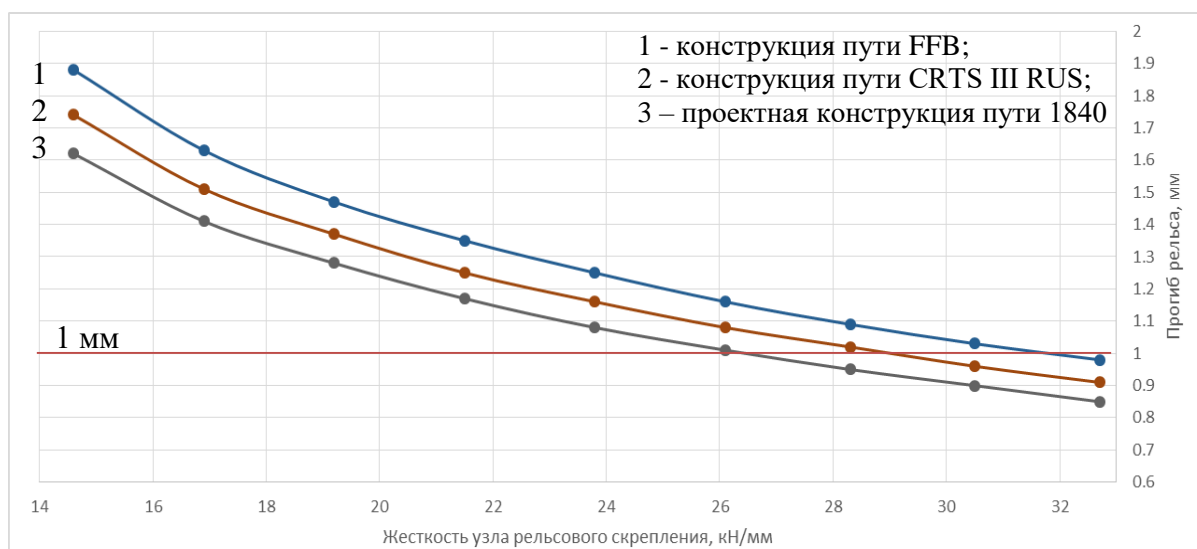


Рисунок 9 - Прогиб рельса при статическом нагружении БКП

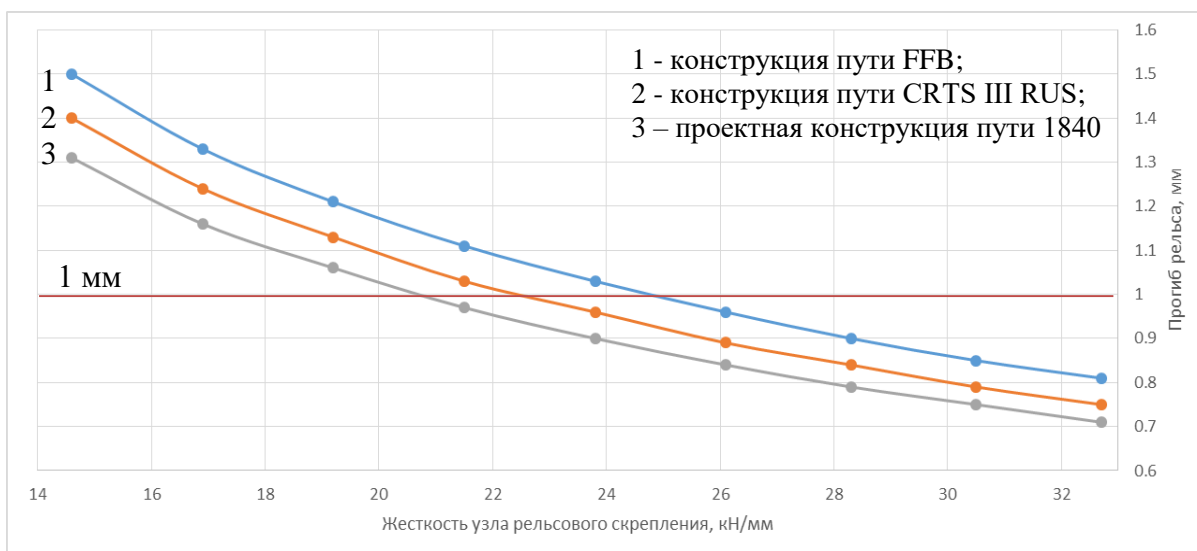


Рисунок 10 - Прогиб рельса при динамическом нагружении БКП с эластичной прокладкой из материала EPDM

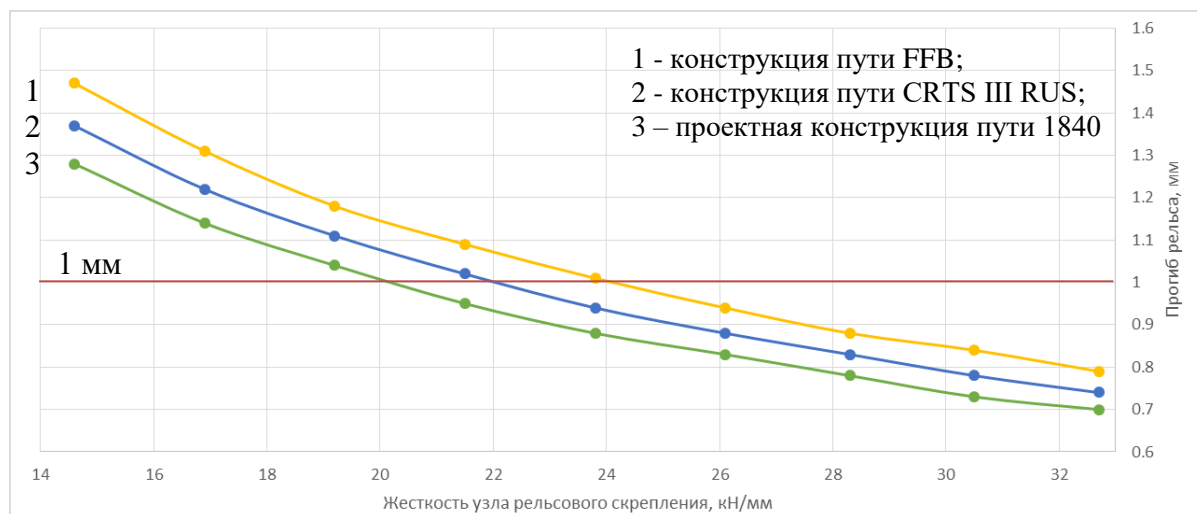


Рисунок 11 - Прогиб рельса при динамическом нагружении БКП с эластичной прокладкой из материала Vurel

Как правило, линии ВСМ проектируются под конкретные условия эксплуатации специального высокоскоростного подвижного состава. Но, в целях окупаемости строительства, могут быть организованы в ночные часы контейнерные перевозки. По этой причине также были проведены расчеты прогиба рельса БКП от динамического воздействия на скорости 160 км/ч вагона-платформы для перевозки контейнеров, в которых применяются двухосные тележки модели 18-100.

Исходя из результатов лабораторных испытаний эластичных прокладок, приведенных в третьей главе были получены зависимости изменений коэффициентов жесткости эластичных прокладок. Определено, что при понижении температуры от +23 °С до -50 °С происходит увеличение показателя статической жёсткости эластичных прокладок для БКП из материала EPDM в 2,12 раза, а из материала Бурил в 3,58 раза (рисунок 12). Оба показателя не превышают коэффициент 4, что коррелируются с требованиями ГОСТ 34078, но для температуры -50°С.

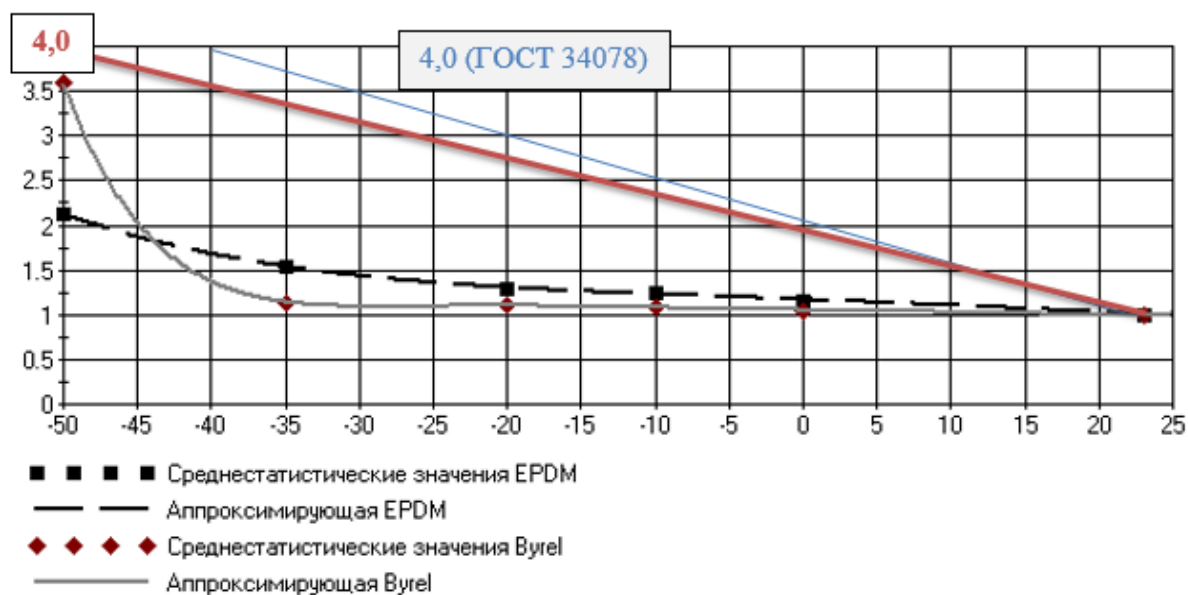


Рисунок 12 - График изменения коэффициентов статической жёсткости эластичных прокладок из материалов EPDM и Бурил с условной линией пределов

Также были проанализированы результаты значений динамических жёсткостей эластичных прокладок и сформированы предложения по соотношению динамической жёсткости к статической жесткости эластичных прокладок (рисунок 13).

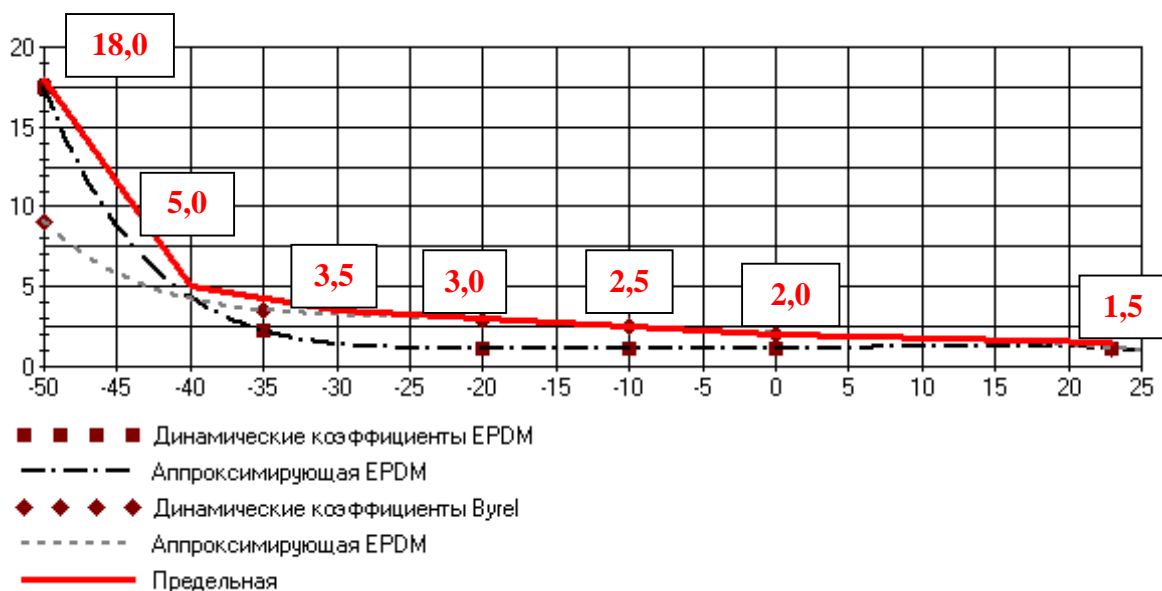


Рисунок 13 - График коэффициентов динамической жёсткости с линией предлагаемых пределов

На основании аналитических, экспериментальных и расчетных данных автор дает предложение по формированию требований к упругим характеристикам рельсовых креплений с промежуточным эластичным слоем БКП для линии ВСМ Москва – Санкт-Петербург. Для подтверждения соответствия сформированным требованиям к упругим характеристикам рельсовых креплений с промежуточным эластичным слоем БКП разработаны рекомендации по методам определения упругих характеристик элементов узла рельсового крепления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги, рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы:

1) Определено влияние низких температур на жёсткость узлов рельсовых креплений БКП. Уточнена расчётная модель определения упругого прогиба рельса от воздействия подвижного состава на БКП посредством введения коэффициентов, позволяющих учитывать влияние низких температур на изменение жёсткости рельсовых креплений с промежуточным эластичным слоем.

2) Определены коэффициенты изменения статической и динамической жёсткости эластичных прокладок из материалов EPDM и Бурил в состоянии заводского изготовления в диапазоне температур от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , полученные в лабораторных условиях. Экспериментально подтверждено, что с понижением температуры до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  для эластичных прокладок из материала EPDM и Бурил происходит, соответственно, увеличение статической жёсткости в

2,11 и 3,57 раза, а также происходит соответственно увеличение динамической жёсткости эластичных прокладок из материала EPDM и Byrel в 17,54 и 9,06 раза.

3) Проведены испытания на Экспериментальном кольце АО ВНИИЖТ по определению прогиба рельса на участке безбалластного пути конструкции Feste Fahrbahn Voegl. Адекватность расчётов подтверждена удовлетворительной сходимостью с экспериментальными данными. Сходимость расчётных результатов с экспериментальными данными составила 94,8%.

4) Сформированы дополнительные требования к упругим характеристикам рельсовых креплений БКП для российских условий эксплуатации для участков высокоскоростного железнодорожного сообщения со скоростями движения до 400 км/ч проектируемой линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург», рекомендуемые для включения в ГОСТ 32698:

- вертикальная жёсткость узла рельсового крепления должна быть в пределах, кН/мм – 16-27;

- изменение статической жесткости эластичных прокладок, эксплуатируемых в условиях низких температур (от -50 °С до +23 °С) не должно превышать коэффициент – 4;

- соотношение динамической жёсткости к статической жесткости эластичных прокладок, не должно превышать коэффициент: при температуре 23 °С – 1,5; при температуре 0 °С – 2,0; при температуре -10 °С – 2,5; при температуре -20 °С – 3,0; при температуре -30 °С – 3,5; при температуре -40 °С – 5,0; при температуре -50 °С – 18,0.

5) Разработаны рекомендации по методам определения упругих характеристик узла рельсового крепления с промежуточным эластичным слоем для БКП с учетом влияния низких температур.

6) Перспективой дальнейшей разработки темы является проведение исследований работы рельсовых креплений с промежуточным эластичным слоем БКП на реальных скоростях движения под нагрузками от реального высокоскоростного подвижного состава на высокоскоростном полигоне, которым должен стать участок линии ВСМ «Москва – Санкт-Петербург».

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **а) в рецензируемых научных изданиях:**

1) Петров, А.В. Рельсовые крепления безбалластных конструкций пути на Экспериментальном кольце ОАО "ВНИИЖТ" / А.В. Петров, А.В. Савин, А.В. Лебедев // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 12. – С. 2-5.

2) Петров, А.В. Совершенствование конструкции рельсового скрепления ПФК-350 / А.В. Петров, А.В. Лебедев // Путь и путевое хозяйство. – 2016. - №1. – С. 17-20.

3) Савин, А.В. Испытания безбалластных конструкций пути / А.В. Савин, А.В. Петров, К.И. Третьяков // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2016. – № 2 (34). – С. 46-56.

4) Петров, А.В. Анализ требований российских и европейских стандартов к рельсовым скреплениям / А.В. Петров, А.В. Савин, А.В. Лебедев // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 9. – С. 22-27.

5) Савин, А.В. Результаты испытаний безбалластных конструкций пути на Экспериментальном кольце АО "ВНИИЖТ" / А.В. Савин, В.В. Третьяков, В.Н. Каплин, А.В. Петров, К.И. Третьяков // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2017. – №4 (Т. 76) – С. 195-201.

6) Савин, А.В. Переходные участки после пропуска 1,1 млрд т груза брутто / А.В. Савин, К.И. Третьяков, А.В. Петров // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 8. – С. 25-28.

7) Петров, А.В. Жесткость рельсовых скреплений безбалластной конструкции пути / А. В. Петров, С. В. Михайлов, А. В Савин // Путь и путевое хозяйство. – 2022. – №1. – С. 8-10.

**б) в других изданиях и материалах конференций:**

8) Савин, А.В. Рельсовые скрепления в безбалластных конструкциях пути на Экспериментальном кольце ОАО "ВНИИЖТ". Часть 1 / А.В. Савин, А.В. Лебедев, А.В. Петров // РСП Эксперт. – 2016. – № 9. – С. 16–18.

9) Савин, А.В. Рельсовые скрепления в безбалластных конструкциях пути на Экспериментальном кольце ОАО "ВНИИЖТ". Часть 2 / А.В. Савин, А.В. Лебедев, А.В. Петров // РСП Эксперт. – 2016. – № 10. – С. 27–29.

10) Петров, А.В. Изменение параметров рельсовой колеи безбалластного пути на участках с различными типами рельсовых скреплений / А.В. Петров // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. Труды XIII Международной научно-технической конференции. Чтения, посвященные памяти профессора Г.М. Шахунянца. / Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II. – Москва, 2016. – С. 173-175.

11) Савин, А.В. Концепция проведения испытаний на Экспериментальном кольце АО "ВНИИЖТ" / А.В. Савин, А.В. Петров, К.И. Третьяков, С.С. Князев // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2018. – Т. 12. – С. 136-141.

12) Савин, А.В. Безбалластный путь для грузового движения / А.В. Савин, А.В. Петров, К.И. Третьяков, С.С. Князев // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2018. – Т. 12. – С. 142-145.

13) Петров, А.В. Эластичные прокладки рельсовых креплений – фундаментальная часть безбалластного пути / А.В. Петров // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2019. – Т. 14. – С. 87-93.

14) Савин, А.В. Переходные участки после пропуска 1,1 млрд т брутто / А.В. Савин, К.И. Третьяков, А.В. Петров // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2019. – Т. 14. – С. 57-63.

15) Петров, А.В. Упругие свойства эластичных прокладок рельсовых креплений для безбалластных конструкций пути в зависимости от температуры. / А.В. Петров // Актуальные вопросы развития железнодорожного транспорта: материалы Всероссийской научно-практической конференции к 75-летию аспирантуры Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. Часть 2. – Москва: РАС, 2019. – С. 276-281.

16) Савин, А.В. Вопросы снятия ограничений скорости в условиях низких температур / А.В. Савин, К.И. Третьяков, А.В. Петров и др. // Сборник статей всероссийской науч.-техн. конф. «Транспортное строительство». – 2020. – С. 32-43.

17) Петров, А.В. Влияние температур на упругие характеристики рельсовых креплений безбалластного верхнего строения пути // Транспортное строительство: сборник статей Второй всероссийской научно-технической конференции – М. – 2021. – С. 215-221.

**Петров Александр Владимирович**

**ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ЖЕСТКОСТЬ УЗЛОВ  
РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ БЕЗБАЛЛАСТНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПУТИ**

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать

Заказ №

Формат 60×90/16

Усл. печ. л. 1,5.

Тираж 80 экз.