

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

На правах рукописи

Краснов Олег Геннадьевич

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗНОСА И КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОЙ
ПОВРЕЖДАЕМОСТИ РЕЛЬСОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ
ГРУЗОВОГО ДВИЖЕНИЯ

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, доцент
Савин Александр Владимирович

Москва - 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	17
1.1 Эксплуатационные данные по износу и контактно-усталостной по- вреждаемости рельсов.....	17
1.2 Аналитический обзор теоретических исследований в области износа и контактно-усталостной прочности рельсов.....	28
1.3 Аналитический обзор экспериментальных исследований в области износа и контактно-усталостной прочности рельсов.....	38
1.4 Постановка цели и задач исследования.....	44
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ БОКОВОГО И ВЕРТИКАЛЬНОГО ИЗНОСА РЕЛЬСОВ В КРИВЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ.....	48
2.1 Структурная схема прогнозирования износа рельсов в кривых участках пути при разных условиях эксплуатации.....	48
2.2 Аналитические выражения для прогнозирования износа рельсов в разных условиях эксплуатации.....	52
2.3 Теоретические исследования интенсивности износа рельсов.....	54
2.4 Понятие «базовой интенсивности износа». «Базовые интенсивно- сти» бокового и вертикального износа рельсов.....	67
Выводы по главе 2.....	73
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИЗНОС РЕЛЬСОВ В УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	75

3.1	Влияние категории качества рельсов на интенсивность износа. Нормативы интенсивности износа рельсов различных категорий качества.....	75
3.2	Влияние конструкции экипажных частей и осевых нагрузок подвижного состава на интенсивности износа рельсов.....	85
3.3	Влияние лубрикации рельсов на интенсивность их износа.....	113
3.4	Влияние продольного профиля пути, массы поезда на интенсивность износа рельсов.....	118
3.5	Влияние непогашенного ускорения на интенсивность износа рельсов.....	127
3.5.1	Влияние уровней положительных непогашенных ускорения на износ рельсов.....	127
3.5.2	Влияние уровней отрицательных непогашенных ускорений на износ рельсов.....	130
3.6	Влияние типа промежуточных рельсовых скреплений на интенсивность износа рельсов.....	136
3.7	Влияние подуклонки рельсов на их износ.....	156
3.8	Ранжирование функциональных факторов по вкладу их в интенсивность износа рельсов.....	159
	Выводы по главе 3.....	163
4	ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ РЕЛЬСОВ	166
4.1	Кинематика образования и роста контактно-усталостных трещин на поверхности катания рельсов.....	166
4.2	Алгоритм определения контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов.....	169

4.3	Результаты расчета напряженно-деформированного состояния зоны контакта колеса с рельсом.....	172
4.4	Расчет деформационных кривых усталости рельсов.....	178
4.5	Выбор модели для расчета контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов.....	184
4.6	Исследование вероятности распределения точек контакта колеса с рельсом по поперечному сечению поверхности катания рельса.....	187
	Выводы по главе 4	196
5	РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СИЛ ОТ РАЗНЫХ ТИПОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И СОСТОЯНИЯ ПУТИ.....	198
5.1	Задачи, условия и методы проведения испытаний по воздействию подвижного состава на рельсы.....	198
5.2	Результаты экспериментальных исследований вертикальных сил от воздействия грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками	202
5.3	Экспериментальное исследования влияния выплесков на силовое воздействие подвижного состава на рельсы	207
5.4	Методика определения интегрального распределения вертикальных сил, действующих на рельсы.....	218
5.4.1	Алгоритм определения интегрального распределения вертикальных сил	219
5.4.2	Расчет интегрального распределения вертикальных сил от суточного пакета поездов на произвольном участке пути.....	223
	Выводы по главе 5.....	231

6	МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ РЕЛЬСОВ.....	233
6.1	Теоретические основы прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости рельсов.....	233
6.2	Прогнозирование контактно-усталостной повреждаемости с учетом деградации механических свойств материала рельсов от пропущенного тоннажа.....	236
6.3	Контактно-усталостная прочность дифференцированно-термоупрочненных рельсов.....	243
6.4	Расчет контактно-усталостной повреждаемости рельсов на примере Зиловской дистанции пути.....	247
	Выводы по главе 6.....	252
7	СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ РЕЛЬСОВ В ПУТИ.....	254
7.1	Состояние вопроса по технологии фрезерования рельсов.....	254
7.2	Условия проведения исследований по отработке технологии фрезерования рельсов.....	256
7.3	Результаты исследований технологии фрезерования рельсов в пути.....	257
7.3.1	Исследование качества формирования поперечного профиля рельсов при фрезеровании в прямом и кривом участке пути.....	257
7.3.2	Разработка методики определения геометрических параметров режущего инструмента фрезерных колес.....	260
7.3.3	Исследование геометрических параметров режущего инструмента фрезерных колес.....	261

7.4	Исследование качественных показателей по удалению дефектов контактно усталостного характера на поверхности катания рельсов методом фрезерования.....	269
7.5	Недостатки технологического оборудования, выявленные в процессе отработки технологии фрезерования рельсов в пути.....	273
	Выводы по главе 7.....	274
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	276
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	280
	Приложение 1. Акты о закладке опытных участков в кривых участках пути Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской ДИ	313
	Приложение 2. Протокол испытаний по воздействию на рельсы в кривых участках Слюдянской дистанции Восточно-Сибирской ДИ.....	325
	Приложение 3. Пример определения коэффициентов приведения боковых, вертикальных сил	335
	Приложение 4. Описание программы для расчета бокового и вертикального износа рельсов для разных условий эксплуатации.....	339
	Приложение 5. Программное обеспечение в среде графического программирования LabView 2011.....	352
	Приложение 6. Верификация расчетных и экспериментальных данных по износу рельсов.....	377
	Приложение 7. Акт внедрения Программного обеспечения по методике прогнозирования износа рельсов разных категорий для разных эксплуатационных условий Московская ДИ, Голутвинская дистанция, ПЧ-7.....	382
	Приложение 8. Акт внедрения Программного обеспечения по методике прогнозирования износа рельсов разных категорий для разных эксплуатационных условий, Рязанская дистанция ПЧ-39 Московская ДИ.....	384

Приложение 9. Акт внедрения Программного обеспечения по методике прогнозирования износа рельсов разных категорий для различных эксплуатационных условий. Восточно-Сибирская ДИ, Слюдянская дистанция, ПЧ-9.....	386
Приложение 10. Расчет эквивалентной нагрузки и интегральной повреждаемости рельсов для условий Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ».....	388
Приложение 11 Расчет эквивалентной нагрузки и относительной повреждаемости рельсов при 9% и 64% грузовых вагонов с осевой нагрузкой 245 кН в суточном пакете поездов в летних и зимних условиях пути в границах Зиловской дистанции пути Забайкальской ДИ.....	396

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Повышение осевых нагрузок признано во всем мире одним из главных направлений, позволяющих кардинально увеличить провозную способность линий за счет увеличения производительности вагонов. По этому пути пошли США, Канада, Австралия, ЮАР, Швеция [1–4]. Внедрение подвижного состава с повышенными осевыми нагрузками происходит на российских железных дорогах [5–7]. Для повышения ресурса рельсов в 2012–2013 гг. проведена реконструкция технологических линий на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [8], строительство нового производства на ПАО «ЧМК» [9]. Реконструкция производства позволила организовать выпуск дифференцированно-термоупрочненных рельсов с печного нагрева разных категорий качества по ГОСТ Р 51685-2013 [10].

В соответствии со «Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» [11] поставлена задача доведения технического и технологического уровня инфраструктуры, сферы ее содержания и ремонта до лучших мировых стандартов. Протоколом совещания под председательством Министра промышленности и торговли Российской Федерации Д. В. Мантурова [12] основными целевыми показателями предусматривается увеличение межремонтного срока между капитальными ремонтами пути до 2000–2500 млн т брутто. В соответствии с «Долгосрочной программой развития ОАО «РЖД» до 2025 г.» [13] предусмотрено увеличить срок службы рельсов до 1500 млн т брутто. Вместе с тем, по данным Управления пути и сооружений ОАО «РЖД» за 2020 г., на российских железных дорогах было заменено 142 838 рельсов в 25-метровом эквиваленте. Из них 30636 (или 21,4 %) изъятий рельсов приходится при достижении предельного состояния по износу, 70838 (или 49,6 %) изъятий по контактно-усталостным дефектам. Таким образом, более 71 % всех изъятий рельсов приходится на износ и дефекты контактно-усталостного характера, что усугубляется интенсификацией грузового движения путем внедрения грузовых вагонов и локомотивов с осевыми нагрузками 245 кН.

Проблема установления научно обоснованных факторов, определяющих интенсивность износа рельсов и образования контактно-усталостных дефектов на их поверхности, разработка методов прогнозирования износа рельсов и их контактно-усталостной долговечности с учетом категорий качества, структуры поездопотока и величин осевых нагрузок, уровней непогашенных ускорений, лубрикации рельсов, уклонов продольного профиля пути и массы поездов, типов применяемых промежуточных рельсовых скреплений, а также более точных способов учета силового воздействия на путь от подвижного состава с повышенными осевыми нагрузками и состояния пути, является **актуальной**.

Степень разработанности темы исследования. Исследования, посвященные изучению износа рельсов, развитию методов расчета, совершенствованию критериев и анализу результатов износа в разных условиях эксплуатации, проводились под руководством и с участием отечественных ученых А. Ю. Абдурашитова, С. М. Андриевского, Е. С. Антерейкина, М. Ф. Вериги, А. А. Воробьева, Т. К. Голутвиной, С. М. Захарова, Н. И. Карпущенко, А. Я. Когана, Д. П. Маркова, Л. П. Мелентьева, К. Н. Мищенко, А. М. Орловой, В. О. Певзнера, Г. М. Шахунянца, Е. А. Шура, Н. П. Щапова и др.

Известны работы зарубежных ученых в области теории и практики износа в системе «колесо – рельс» Д. Арчарда, А. Капура, Д. Кика, Е. Клятона, Е. Магель, Д. Пиотровски, Д. Хендрика, Д. Станфорда, В. Шнехта и др.

Исследованиями контактно-усталостной повреждаемости рельсов, совершенствования методов расчета контактно-усталостной прочности, изменения структуры поверхностного слоя от длительного воздействия поездной нагрузки, влияния остаточных напряжений на контактно-усталостную прочность, повышения ресурса рельсов методами механической обработки поверхности катания проводились под руководством и с участием отечественных ученых А. Ю. Абдурашитова, А. И. Александрова, М. Х. Ахметзянова, И. С. Баулина, А. И. Борца, М. Ф. Вериги, Ж. А. Галина, М. Н. Георгиева, И. З. Генкина, В. Е. Громова, В. Н. Данилова, В. А. Кислика, Б. С. Ковальского, А. Я. Когана, А. Д. Конюхова, В. С. Коссова, Н. Н. Кудрявцева, Н. А. Махутова,

К. В. Морозова, Н. И. Мусхелишвили, В. В. Павлова, Д. Л. Петрова, Д. Ю. Погорелова, Е. В. Полевого, В. Л. Порошина, В. А. Рейхарта, А. В. Савина, В. И. Сакало, Ю. А. Самойловича, Л. А. Сосновского, С. П. Тимошенко, Е. А. Шура, В. Ф. Яковлева и многих других.

Известны работы зарубежных ученых в области контактно-усталостной прочности и повреждаемости рельсов М. Брауна, К. Джонсона, К. Данг Вана, А. Екберга, М. Ишиды, Ф. Картера, Дж. Калкера, Дж. Коллинза, Ю. Шена, Ш. Шенга, А. Фатеми, Г. Фромма и др.

Цель работы – разработка научно обоснованных методов прогнозирования износа рельсов разных категорий качества и их контактно-усталостной повреждаемости для условий интенсификации грузового движения.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие **задачи**:

- разработана структурная схема и аналитические выражения для расчета бокового и вертикального износа рельсов различных категорий качества для разных условий эксплуатации;

- установлены нормативы интенсивности износа рельсов разных категорий качества для «базовых» условий эксплуатации;

- определены количественные значения функциональных коэффициентов, определяющие интенсивность бокового и вертикального износа рельсов разных категорий качества, от эксплуатационных факторов (радиуса кривых участков пути, уровней непогашенных ускорений, периодичности лубрикации рельсов, продольного профиля пути и массы поездов, конструкции экипажных частей подвижного состава и величин осевых нагрузок, типа применяемых промежуточных рельсовых скреплений);

- разработана методика прогнозирования износа рельсов различных категорий качества для разных условий эксплуатации и программное обеспечение для автоматизированного расчета износа рельсов;

- разработан алгоритм прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов, определены параметры деформационных

кривых пластической и упругой усталости рельсовой стали, влияние на контактно-усталостную повреждаемость извилистого движения колесных пар и деградацию механических свойств поверхности катания от пропущенного тоннажа;

– разработана методика формирования интегрального распределения вертикальных сил от суточного пакета поездов для конкретного перегона с учетом наиболее значимых факторов состояния пути, в том числе выплесков во влажном и сухом состояниях;

– разработана методика прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов до образования трещин с учетом деградации механических свойств от пропущенного тоннажа;

– определены закономерности технологии фрезерования рельсов в пути при репрофилировании изношенной головки рельса и удаления контактно-усталостных повреждений, распространяющихся на глубину до 2,5 мм.

Объектом исследования являются рельсы железнодорожного пути.

Предметом исследования являются методы расчета интенсивности износа и контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов в условиях интенсификации грузового движения.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1 Разработана структурная схема и аналитические выражения для расчета количественных значений бокового и вертикального износа рельсов с использованием впервые введенного понятия «базовая интенсивность износа».

2 На основании комплексных экспериментальных и теоретических исследований установлены количественные значения функциональных коэффициентов, определяющих интенсивность бокового и вертикального износа рельсов разных категорий качества, от эксплуатационных факторов (радиуса кривых участков пути, уровней непогашенных ускорений, периодичности лубрикации рельсов, продольного профиля пути и массы поездов, конструкции экипажных частей подвижного состава и величин осевых нагрузок, типа применяемых промежуточных рельсовых скреплений);

3 Установлено, что распределения вертикальных сил от взаимодействия ко-

лес подвижного состава и пути в составе поездов, сформированных из вагонов с близкими осевыми нагрузками, представляют стационарные, эргодичные процессы с незначительными величинами асимметрии (не более 3...3,5 % от средних значений) и хорошо аппроксимируются нормальным законом по критерию согласования Колмогорова – Смирнова.

4 Разработан алгоритм определения контактно-усталостной повреждаемости рельсов до образования трещин на поверхности катания. Разработана конечно-элементная модель прокатки вагонного колеса по рельсу, которая позволила установить, что компоненты тензора напряжений на поверхности рельса находятся в непропорциональном многоосном напряженном состоянии, и обосновать использование деформационной модели многоосной усталости Брауна – Миллера для прогнозирования повреждаемости рельсов.

5 Разработана методика определения интегрального распределения вертикальных сил, позволяющая учитывать воздействие от разного типа подвижного состава с учетом конструкции ходовых частей и величин осевых нагрузок, скорости движения, жесткости подрельсового основания от сезонности (лето, зима), поперечного профиля пути, состояния пути (наличия влажных или сухих выплесков), доли каждого типа подвижного состава в суммарном воздействии на путь.

6 Разработана методика определения контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов до образования трещин с использованием деформационной модели многоосной усталости Брауна – Миллера и учетом деградации механических свойств поверхности катания рельсов от пропущенного тоннажа.

7 Впервые для российских железных дорог установлены закономерности технологии фрезерования рельсов в пути при репрофилировании изношенной головки рельса и удаления контактно-усталостных повреждений, распространяющихся на глубину до 2,5 мм. Разработана методика определения геометрических параметров режущего инструмента фрезерных колес с преобразованием облака точек, полученных в процессе измерений координатно-измерительной машиной, методом сингулярного разложения и использования алгоритмов Делоне.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1 Разработаны и подготовлены к утверждению «Нормативы интенсивности износа рельсов разных категорий качества».

2 Разработана и подготовлена к утверждению «Методика прогнозирования износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации».

3 Для автоматизации расчета износа рельсов разработана программа для ЭВМ «Программа расчета интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации».

4 Для определения распределений точек контакта колеса с рельсом по поперечному сечению с учетом извилистой траектории движения колесных пар разработано и изготовлено устройство на основе системы технического зрения и предложен алгоритм обработки видеосигналов.

5 Установлены средние значения и статистические характеристики вертикальных и боковых сил, действующих на наружный и внутренний рельсы от разных типов грузовых, пассажирских вагонов и локомотивов в кривых участках пути малого и среднего радиуса, в том числе от грузовых вагонов с осевыми нагрузками 245 и 265 кН. Предложено ранжирование подвижного состава по кластерам в зависимости от диапазона силового воздействия.

6 Разработана и предложена к внедрению методика прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов до образования трещин, позволяющая определять влияние повышенных осевых нагрузок от подвижного состава на снижение ресурса рельсов по контактно-усталостной повреждаемости.

7 Разработаны и переданы на АО «Калужский завод «Ремпутьмаш» мероприятия по совершенствованию технологии фрезерования рельсов, конструкции рабочих органов и измерительной системы рельсофрезерного поезда РФП-1.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования в диссертации строились на основе: методов теории вероятностей и математической

статистики, деформационных моделях при многоосном циклическом нагружении, численного моделирования с использованием программных комплексов «Универсальный механизм», MARC, Fatigue (MSC Software), математического программирования и современных методов вычислительной математики. Экспериментальные методы реализовывались с применением вибро- и тензометрирования.

Положения, выносимые на защиту:

1 Методика прогнозирования износа рельсов различных категорий качества для разных условий эксплуатации.

2 Методика формирования интегрального распределения вертикальных нагрузок от суточного пакета поездов и структуры поездопотока.

3 Методика определения контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов до образования трещин с использованием деформационной модели многоосной усталости Брауна – Миллера и учетом деградации механических свойств рельсовой стали от пропущенного тоннажа.

4 Методика определения геометрических параметров режущего инструмента фрезерных колес рельсофрезерного поезда с преобразованием облака точек методом сингулярного разложения и использования алгоритмов Делоне.

Степень достоверности и апробация результатов исследования основана на корректном использовании математических моделей, аналитических решений и численных расчетов, сопоставлении теоретических решений с экспериментальными данными, применении современных программных вычислительных средств, удовлетворительной сходимости в пределах 15 % результатов расчетов и экспериментальных исследований, проведенных в условиях рядовой эксплуатации на Большом московском окружном кольце Московской дирекции инфраструктуры (ДИ); на перегонах Блокпост Южный – Калманка Западно-Сибирской ДИ, Качканар – Смычка Свердловской ДИ, Слюдянка 2 – Ангасолка Восточно-Сибирской ДИ, Голутвин – Луховицы Московской ДИ.

Основные положения работы изложены и одобрены:

- на XIII Международной научно-практической конференции «Проблемы механики железнодорожного транспорта» (Днепропетровск, ДИИТ, 2012 г.);

- на 14-й и 15-й научно-технических конференциях «Подвижной состав XXI века (Идеи. Требования. Проекты)» (Санкт-Петербург, ПГУПС, 2017, 2018 гг.);
- на 12-й научно-практической конференции «Проблемы измерения и метрологии в технике» (Москва, МГТУ им. Баумана, 2017 г.);
- на 17-й научно-практической конференции «Новые материалы» (Москва, ВИАМ, 2017 г.);
- на 4-й научно-технической национальной конференции «Путь XXI века» (Санкт-Петербург, ПГУПС, 2018 г.);
- на научно-техническом совете ОАО «РЖД» от 29.12.2017;
- на XVI международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», на чтениях, посвященных памяти профессора Г. М. Шахунянца (Москва, РУТ МИИТ, 3–4 апреля 2019 г.);
- на международной научной конференции «FarEastCon-2019» (Владивосток, ДВФУ, 1–4 октября 2019 г.);
- на объединенном ученом совете ОАО «РЖД» (Москва, ВНИИЖТ, 14 марта 2019 г.);
- на круглом столе в пресс-центре издательского дома «Гудок» «Инновационные решения для ремонта и модернизации путевой инфраструктуры» (Москва, 9 октября 2019 г.);
- на III международной научно-практической конференции «Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах» (Санкт-Петербург, ПГУПС, 23–25 октября 2019 г.);
- на 134-й рельсовой комиссии (Владивосток, 3–4 октября 2018 г.);
- на 135-й рельсовой комиссии (Новокузнецк, 25–27 сентября 2019 г.);
- на 136-й рельсовой комиссии (Анапа, 21–23 октября 2020 г.);
- на 137-й рельсовой комиссии (Челябинск, 22–24 сентября 2021 г.);
- на I международной научно-практической конференции «Наука 1520. ВНИИЖТ: загляни за горизонт» (Москва, ВНИИЖТ, 26–27 августа 2021 г.);
- на научно-технических советах в ОАО «РЖД» (2016–2021 гг.), посвящен-

ных проблемам повышения эксплуатационной стойкости рельсов и развитию тяжеловесного движения на российских железных дорогах.

Исследования по данной работе поддержаны грантом по проекту РФФИ 17-20-01-088/17.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 40 научных работ, в том числе в журналах «Железнодорожный транспорт», «Вестник ВНИИЖТ», «Мир транспорта», «Вестник транспорта Поволжья», «Транспорт Российской Федерации», «Путь и путевое хозяйство», «Вагоны и вагонное хозяйство» и материалах конференций всероссийского и международного уровней.

на; сокращение времени перевозки контейнеров железнодорожным транспортом, в частности, с Дальнего Востока до западной границы Российской Федерации до 7 дней и увеличение объема транзитных перевозок контейнеров железнодорожным транспортом в 4 раза. Одним из главных направлений, позволяющих кардинально увеличить провозную способность линий, является повышение осевых нагрузок подвижного состава, увеличение массы и длины поездов. Это возможно за счет применения конструкций и материалов верхнего строения пути повышенной долговечности и надежности, в частности, рельсов повышенной надежности и долговечности.

Для повышения ресурса рельсов с 700 до 1100 млн т брутто и далее до 1500 млн т брутто в 2012...2013 гг. выполнена реконструкция технологических линий на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [8], проведено строительство нового производства на ПАО «ЧМК» [9]. Реконструкция производства позволила организовать выпуск дифференцированно-термоупрочненных рельсов с печного нагрева разных категорий качества по ГОСТ Р 51685 [10]: ДТ350 – для обычных условий эксплуатации; ДТ350СС – для совмещенного скоростного движения; ДТ350НН – низкотемпературной надежности; ДТ370ИК – повышенной износостойкости и контактно-усталостной прочности.

Реконструкция металлургического производства позволила перейти на рельсы длиной 100 м вместо 25 м, сократив тем самым количество сварных швов.

Выполним анализ показателей износостойкости дифференцированно термоупрочненных рельсов в кривых участках пути в сложных эксплуатационных условиях, которыми является эксплуатация рельсов в условиях горно-перевальных участках.

Горно-перевальный участок – участок железнодорожного пути, имеющий переломы продольного профиля, затяжные подъемы и спуски с приведенным уклоном не менее 8 ‰ в сочетании с кривыми малого радиуса, расположенный в горных условиях, где требуется применение продолжительного (усиленного) режима тяги и обеспечения особых условий работы тормозных средств (при этом возможно ограничение скорости в режиме тяги из-за нагрева электродвигателей

электровозов) для обеспечения движения поездов расчетного веса.

Из всех дистанций пути Восточно-Сибирской ДИ по своим эксплуатационным характеристикам наиболее сложной является Слюдянская дистанция пути. В ее составе находится перевальный участок с кривыми радиусом до 300 метров в сочетании с уклоном профиля до 21 %. 50 % всего участка составляют кривые малого радиуса и более половины участка – подъемы и спуски от 10 до 21%.

По данным Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской ДИ на примере двух кривых радиусом 293 и 298 метров в условиях подъема до 17,3 % проанализирована продолжительность срока эксплуатации рельсовых плетей по боковому износу [15]. Результаты наблюдений представлены на рисунке 1.2.

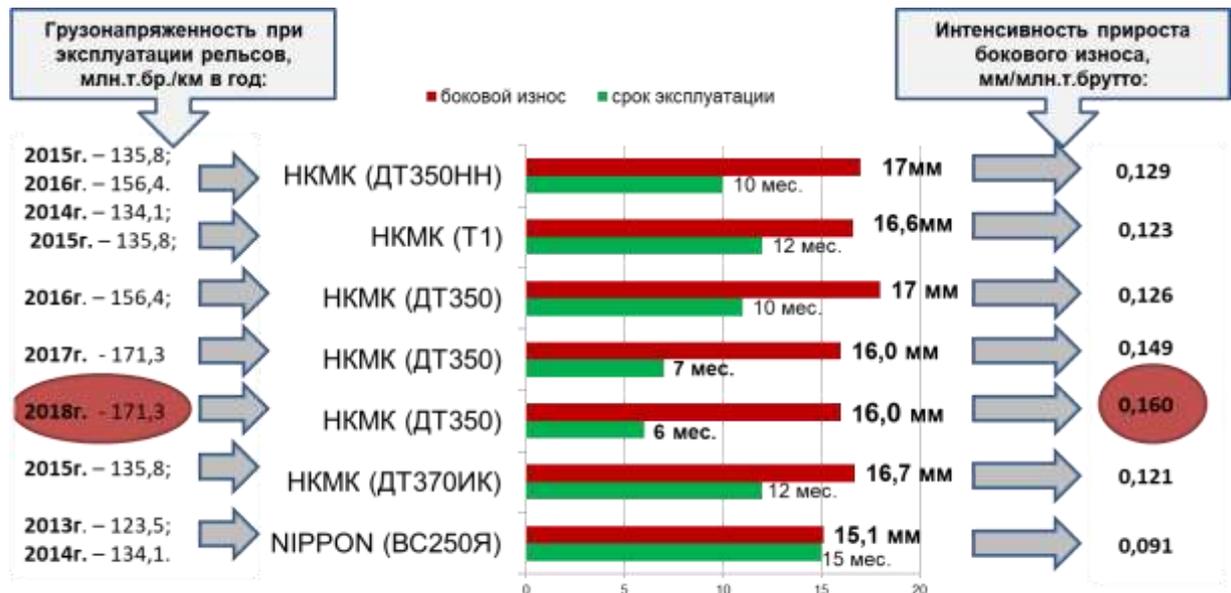


Рисунок 1.2 – Зависимость интенсивности бокового износа рельсов разных категорий качества при разной грузонапряженности в кривых участках пути радиусами 293 и 298 метров в условиях подъема до 17,3 % в границах Слюдянской дистанции пути [15]

В условиях грузонапряженности 123,5 и 134,1 млн т брутто интенсивность бокового износа рельсов BC250Я производства Nippon Steel (Япония) составила 0,091 мм/млн т брутто. При повышении грузонапряженности 135,8 млн т брутто интенсивность бокового износа на рельсах ДТ370ИК производства Новокузнецко-

го металлургического комбината составила 0,121 мм/млн т брутто. При грузонапряженности 134,1 и 135,8 млн т брутто интенсивность бокового износа объемно-закаленных рельсов Т1 составила 0,123 мм/млн т брутто. При грузонапряженности 156,4 млн т брутто на рельсах ДТ350 интенсивность бокового износа составила 0,126 мм/млн т брутто, на рельсах ДТ350НН – 0,129 мм/млн т брутто. В 2017 году при дальнейшем росте грузонапряженности с 156,4 до 171,3 млн т брутто наблюдался рост интенсивности бокового износа. Так на рельсах ДТ350 интенсивность бокового износа возросла с 0,126 мм/млн т брутто в 2016 году до 0,149 мм/млн т брутто в 2017 г. В 2018 г. произошел дальнейший рост грузонапряженности до 180 млн т брутто, что привело к увеличению интенсивности бокового износа до 0,160 мм/млн т брутто, что определило требование повторной замены рельсовых плетей в кривых участках пути в течение полугода.

На рисунке 1.3 представлена средняя интенсивность нарастания бокового износа рельсов ДТ350 в зависимости от величины радиуса кривых в условиях горно-перевального участка Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской ДИ в 2018 году по первому главному пути с грузонапряженностью 59,1 млн т брутто и по второму главному пути грузонапряженностью 170,1 млн т брутто.

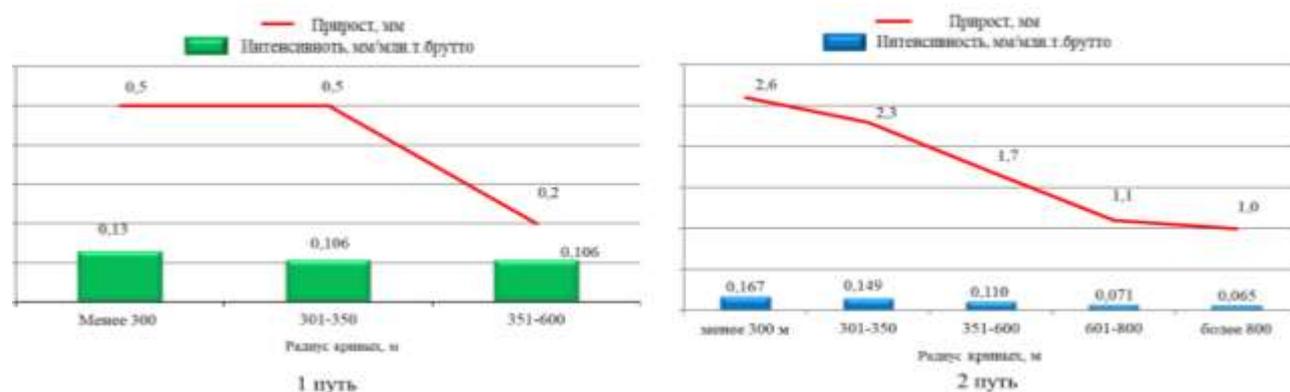


Рисунок 1.3 – Средняя интенсивность нарастания бокового износа рельсов в зависимости от радиуса кривых: 1-й путь грузонапряженностью 59,1 млн т брутто; 2-й путь грузонапряженностью 170,1 млн т брутто [15]

Анализ опытных данных показал, что интенсивность бокового износа рельсов существенно зависит от радиуса кривых участков пути, что связано с затруднительным вписыванием экипажей в кривые малого радиуса, а также от грузонапряженности, что определяется движением подвижного состава с повышенными осевыми нагрузками и с более высокими боковыми силами.

Специалистами ПКБ И проведены наблюдения за интенсивностью бокового износа рельсов разных категорий качества – ДТ350, ДТ350У, ДТ370ИК, ВС250Я в схожих условиях эксплуатации Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры [14]. Параметры опытных кривых представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1– Местоположение и параметры опытных кривых участков пути [14]

Параметры	Перегон / категория рельсов	
	Тягун – Аламбай, 1 путь / ДТ350(У)	Издrevая – Жеребцово, 1 путь / В, ДТ370ИК, ДТ350
ПК, км	161 км ПК8 – 162 км ПК4	26 км ПК5 – 27 км ПК4
Радиус кривой, м	397	392
Профиль, ‰	Подъем 9,8	Подъем 7,7
Грузонапряженность, млн т брутто	130,5	83,8
Максимальная осевая нагрузка, т/ось	25	

На рисунке 1.4 представлены результаты наблюдений по износостойкости рельсов разных категорий качества, полученные специалистами ПКБ И в условиях эксплуатации [14].

Анализ экспериментальных данных показал, что имеются значительные отличия в величинах интенсивности изнашивания рельсов разных категорий качества в близких условиях эксплуатации.

Специалистами ПКБ И проведены наблюдения за интенсивностью бокового износа рельсов ДТ350 в кривых участках пути разного радиуса и при разных типах промежуточных рельсовых скреплений в условиях эксплуатации Западно-

Сибирской дирекции инфраструктуры [16]. Результаты исследований представлены на рисунке 1.5.

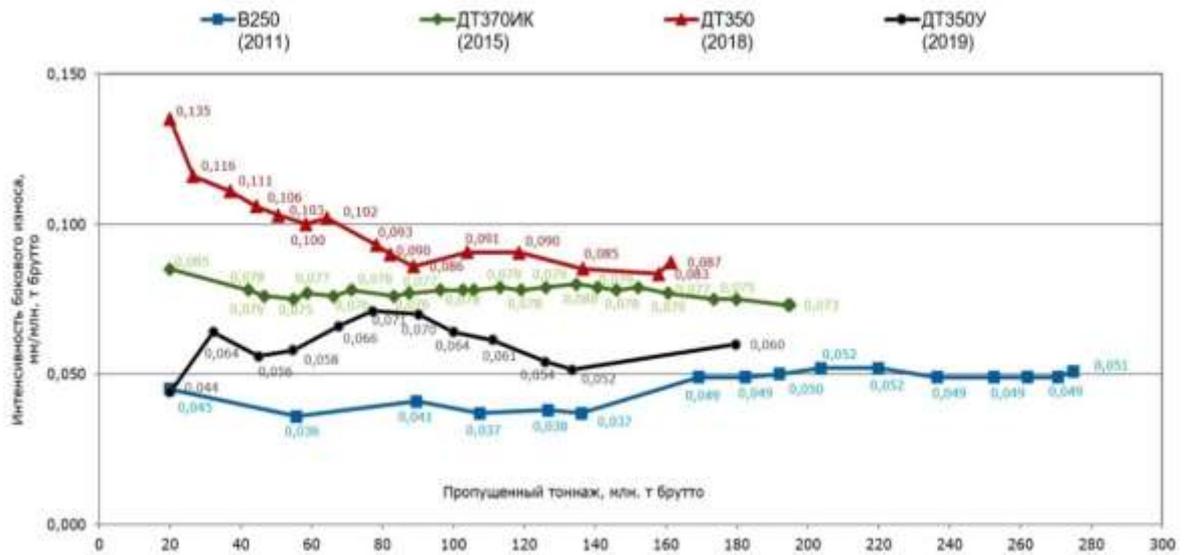


Рисунок 1.4 – Зависимость интенсивности износа рельсов разных категорий качества от пропущенного тоннажа в схожих эксплуатационных условиях [15]

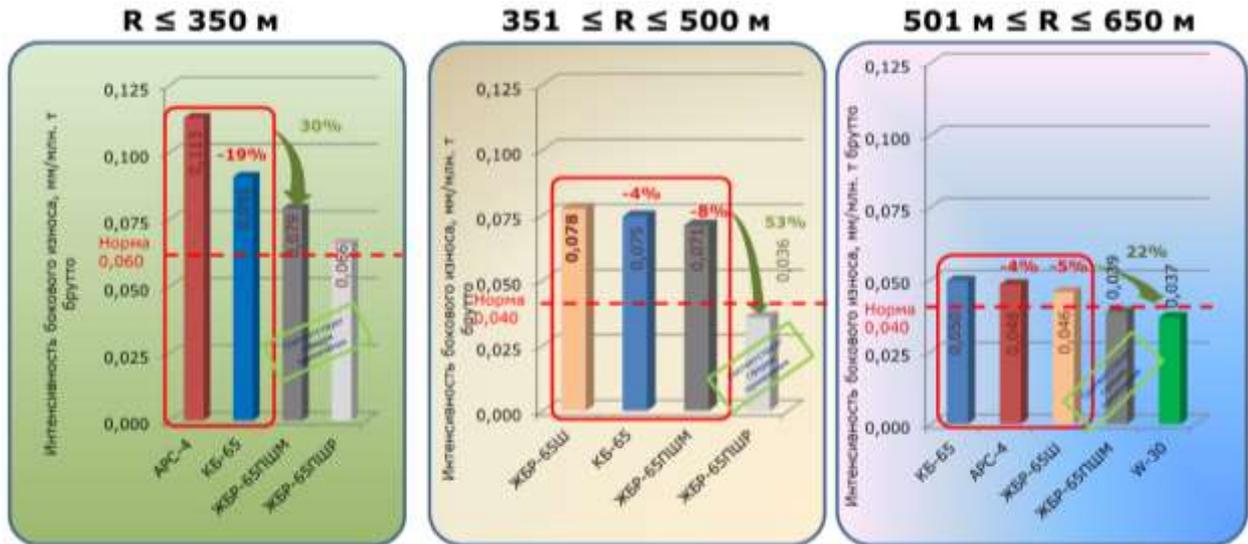


Рисунок 1.5 – Зависимость интенсивности износа рельсов DT350 в кривых разного радиуса при разных типах промежуточных рельсовых скреплений [16]

Анализ интенсивности бокового износа рельсов DT350 показал, что износ рельсов зависит от конструкции промежуточных рельсовых скреплений. При этом, чем круче кривая, тем сильнее проявляется влияния типа скреплений на из-

нос рельсов. Так, в кривых участках $R < 350$ м интенсивностью бокового износа рельсов ДТ350 при скреплениях ЖБР-65ПШМ на 30 % ниже, чем при использовании скреплений АРС-4. При кривых участках радиусами $351 < R < 500$ м наилучшие показатели износа получены при скреплениях ЖБР-65ПШР. При скреплениях ЖБР-65, КБ-65, ЖБР-65ПШМ интенсивность износа снижалась менее заметно и, соответственно, составила 4 и 8 %, чем при использовании скреплений АРС-4. При кривых участках радиусами $501 < R < 650$ м наилучшие показатели износа получены при скреплениях ЖБР-65ПШМ и W30 (ф. Фоссло). При этих скреплениях интенсивность износа соответствует нормативным требованиям 0,04 мм/млн т брутто. При скреплениях КБ-65, АРС-4, ЖБР-65Ш интенсивность износа была выше на 17–22 %.

Специалистами «ЕВРАЗ ЗСМК» [17] в процессе наблюдений на перегоне Тягун- Аламбай Заринской дистанции пути (ПЧ-19) Западно-Сибирской ДИ за кривыми участками радиусами 397 и 296 м с уложенными рельсами ДТ350 установлено, что на интенсивность износа влияют климатические условия – зима, лето. Сделан вывод, что летний прирост интенсивности износа по сравнению с зимними условиями составляет 1,67 раза, что может быть объяснено повышенной жесткостью пути в зимний период и более низкими значениями сил трения за счет попадания снега в зону контакта колеса с рельсом, который выполняет функции смазки (рисунок 1.7).



Рисунок 1.6 – Зависимость интенсивности износа рельсов ДТ350 в кривых малого радиуса при разных климатических условиях [17]

Анализ особенностей эксплуатации железнодорожных путей в различных условиях, в том числе на перевальных участках Восточно-Сибирской, Дальневосточной, Западно-Сибирской железных дорог в сложных условиях эксплуатации показал, что рельсы ДТ350 производства «ЕВРАЗ ЗСМК» в условиях перевальных участков, на участках с высокой грузонапряженностью, в кривых малого радиуса имеют ресурс ниже заявленного по причинам интенсивного изнашивания боковых граней наружного рельса, вертикального износа головки внутреннего рельса. Согласно приказа Министерства Транспорта Российской Федерации от 9 февраля 2018 г. № «О внесении изменений в Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации», утвержденного Министерством транспорта Российской Федерации 21 декабря 2010 г. № 286 [18], срок службы рельсов в тяжелых условиях эксплуатации должен быть не менее 700 млн тонн брутто с возможностью снижения норматива до 25 %, т.е. до 525 млн тонн брутто. В кривых радиусами менее 350 м для путей 1 и 2 классов допускается смена плетей в кривых малого радиуса два раза в период до капитального ремонта пути на новых

материалах (КРН) (таблица 1.2), что определяет минимальный нормативный ресурс не менее 175 млн т брутто. Для кривых радиусом 351–650 м для путей 1 и 2 классов при одной дополнительной смене плетей в период до КРН минимальный нормативный ресурс должен составлять не менее 262,5 млн т брутто.

Таблица 1.2 – Периодичность дополнительной сплошной смены рельсов в кривых участках железнодорожного пути [18]

Группа железнодорожного пути	Количество дополнительной сплошной замены рельсов в кривых участках железнодорожного пути в зависимости от радиуса кривой	
	351-650 м	350 м и менее
О, I, II	1 раз	2 раза
III, IV	-	1 раз

С учетом сказанного выше, величина интенсивности бокового износа рельсов не должна превышать:

- для кривых радиусом 350 м и менее – 0,091 мм/млн т брутто;
- для кривых радиусом 351...650 м – 0,061 мм/млн т брутто.

Для повышения износостойкости рельсов «ЕВРАЗ ЗСМК» разработана и проходит подконтрольную эксплуатацию новая категория рельсов ДТ400ИК. В работе [19] приведены результаты сравнительных стендовых испытаний образцов рельсов ДТ350 и ДТ400ИК. В лабораторных условиях установлено, что интенсивность износа образцов изготовленных из рельсов категории ДТ400ИК примерно на 35 % ниже, чем интенсивность износа образцов изготовленных из рельсов категории ДТ350.

Таким образом, в условиях перевальных участков, на участках с высокой грузонапряженностью, в кривых малого радиуса рельсы имеют ресурс ниже заявленного по причинам интенсивного изнашивания боковых граней наружного рельса, вертикального износа головки внутреннего рельса.

Вместе с внедрением подвижного состава с повышенными осевыми нагруз-

ками, ростом грузонапряженности наблюдается увеличение количества дефектных (ДР) и остродефектных (ОДР) рельсов по кодам 10, 11 – отслоение, выщербины и др. дефекты поверхности катания (рисунок 1.7) [20]. Общее количество таких дефектов в 2019 г. составило 70838 шт. или близкое к половине всех дефектов – 152753 шт. На втором месте располагаются поперечные трещины в головке рельсов. Следует отметить тенденции к снижению данного дефекта. Так, с 2006 г. когда количество этих дефектов достигало 22981 шт., к 2019 г. количество их сократилось до 9630 шт. (т. е. более чем в два раза).

На рисунке 1.8 показана динамика изъятия, нахождения в пути, образования новых ДР по кодам дефектов 10, 11 за 8 месяцев 2020 г. [21].

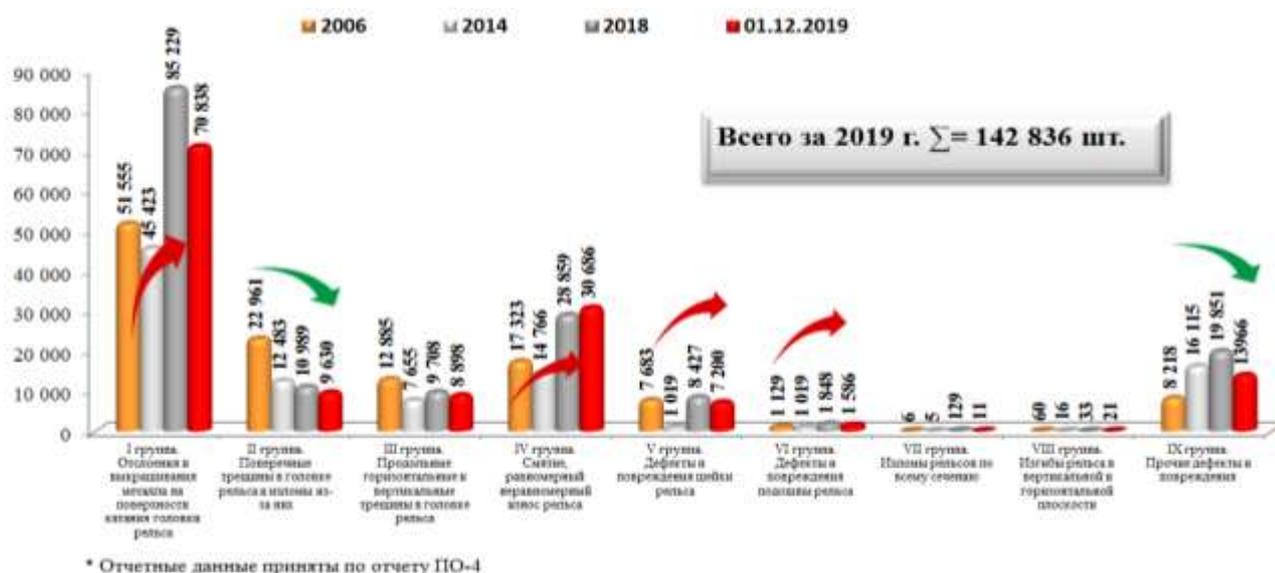


Рисунок 1.7 – Динамика изменения дефектов рельсов по группам (изъятые рельсы) [20]

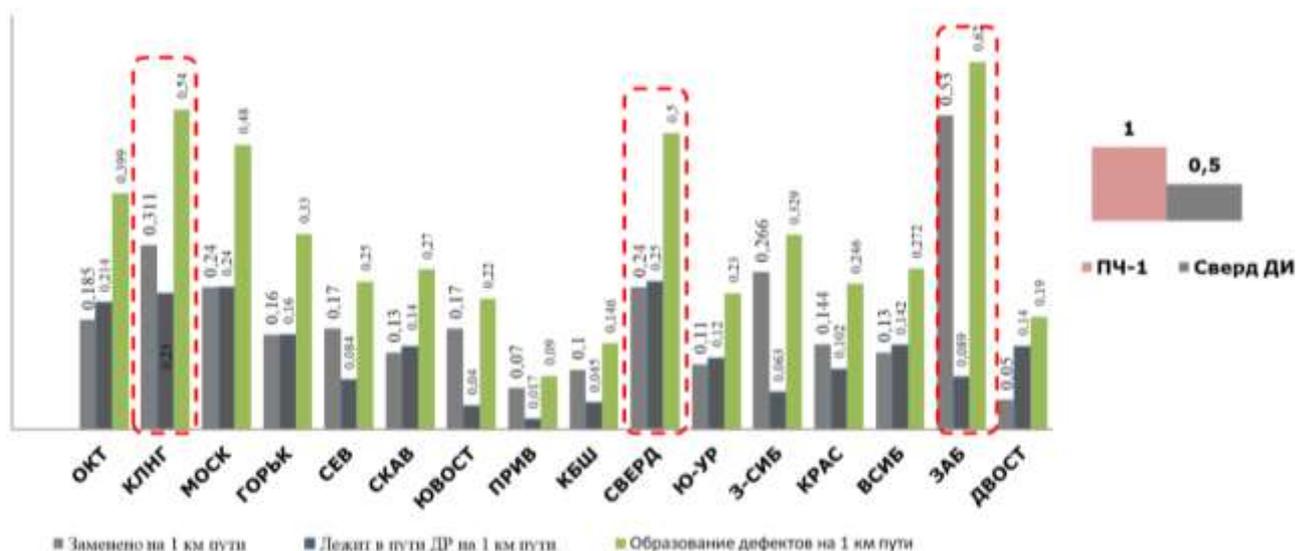


Рисунок 1.8 – Динамика образования дефектов по код 10, 11 на сети железных дорог [21]

Анализ динамики образования дефектов по кодам 10, 11 показал их рост практически на всей сети [20]. Наибольший прирост имеет место на Забайкальской, Свердловской и Калининградской железных дорогах.

Таким образом, в кривых участках пути доминирующее место среди дефектов рельсов занимают дефекты по коду 44 – боковой износ головки и в прямых участках пути дефекты по кодам 10, 11 на поверхности катания – отслоение, выщербины и др., по коду 21 – поперечные трещины в головке рельсов.

Причинами повышенного износа рельсов являются:

- затруднительное вписывание экипажей в кривые малого радиуса, что определяет зависимость интенсивности износа рельсов от радиуса кривого участка по зависимости, близкой к гиперболической;
- значительная зависимость интенсивности износа рельсов от категории качества, свойства которых определяются технологией изготовления, закалки, микрорегирования.

Причинами повышенной дефектности рельсов от контактно-усталостных повреждений поверхности катания являются высокий уровень контактных напряжений, сложное многоосное напряженно-деформируемое состояние в зоне контакта колеса с рельсом.

Из проведенного анализа можно сделать вывод о том, что для установления научно обоснованных причин повышенной интенсивности износа рельсов в кривых участках малого радиуса и повреждаемости их контактно-усталостными дефектами от повышенных осевых нагрузок в зависимости от категорий качества и условий эксплуатации необходимо провести комплексные теоретические и экспериментальные исследования по установлению факторов, влияющих на интенсивность рассмотренных процессов и разработать научно-обоснованные методы прогнозирования износа и контактно-усталостной долговечности рельсов в условиях интенсификации грузового движения.

1.2 Аналитический обзор теоретических исследований в области износа и контактно-усталостной прочности рельсов

На отечественных железных дорогах использовались Правила расчетов пути, действующих в редакциях 1925 г., 1931 г., 1936 г., 1940 г. и действующие в настоящее время Правила расчета пути на прочность 1954 г. [22] в редакции 2000 года [23] и в редакции 2017г. [24], базируются на аналитических методах расчета [25, 26]. Аналитические методы расчета используются и на зарубежных железных дорогах [27]. Задача увеличения провозной и пропускной способности основных направлений может быть решена за счет увеличения массы поездов и использования вагонов повышенной грузоподъемности для перевозки соответствующей номенклатуры грузов. При этом основная проблема состоит в необходимости определения прогноза работы инфраструктуры и, в первую очередь, рельсов при изменении уровня их нагруженности.

По первому предельному состоянию - показателям рельсовой прочности - имеется достаточный запас. Это создает иллюзию неограниченных возможностей повышения осевых нагрузок. Однако не менее острой является проблема их изно-

са, накопления усталостных и контактно-усталостных повреждений в рельсах т.е. оценка состояния рельсов по второму предельному состоянию.

Актуальность этого подхода неоднократно отмечалась в трудах отечественных ученых [25, 26]. Цель назначения критериев для оценки расчетов по предельному состоянию второй группы - определить такие силы, напряжения, перемещения и деформации (упругие и остаточные), при которых, в пределах заданного срока и условий эксплуатации, гарантируется нормальная эксплуатация объектов, не снижается их долговечность, представлены в стандартах [28-30].

В связи с интенсификацией в последние годы грузового движения актуальным стала необходимость развития научно-обоснованных методов прогнозирования предельного состояния элементов верхнего строения пути, в частности рельсов как наиболее ответственного за безопасность движения и дорогостоящего элемента пути.

Выполним анализ теоретических исследований, проведенных отечественными и зарубежными учеными в области износа и контактно-усталостной прочности рельсов. Л.П. Мелентьев определил геометрию контакта «колесо – рельс» и возвышение наружного рельса в кривых как основные факторы, влияющие на износ [31]. С.М. Андриевский предложил для снижения бокового износа рельсов увеличение возвышения наружного рельса, лубрикацию, снижение необрессоренных масс и другие меры для уменьшения удельных давлений в контакте колес с рельсом [32]. Проф. М. Ф. Вериго в 1950— 1960-х гг. описал механические и динамические составляющие сил, действующих в контакте колесо – рельс и вызывающих боковой износ рельса в кривых [33].

Задачу качения колеса по рельсу обычно рассматривают отдельно в нормальном и тангенциальном направлениях, при этом в первом случае определяется форма и размер пятна контакта, во втором – вычисляются нормальные напряжения. Герцем решена статическая задача [34] при предположении, что при взаимодействии двух цилиндрических тел пятно контакта имеет эллиптическую форму с полуосями a и b в продольном (длина) и поперечном (ширина) направлениях. Н. Е. Жуковский предположил, что из-за разности радиусов кругов катания одно

из колес имеет постоянный упругий контакт, а другое проскальзывает [35]. Плоская контактная задача рассмотрена в работах Н.И. Мухелишвили [36, 37] и И. Я. Штаермана [38]. Применительно к рельсам контактную задачу качения в теории упругости решал Ф.В. Картер [39, 40]. Ф.В. Картером решена плоская тангенциальная контактная задача с учетом сил упругого скольжения (крипа), характеристик сцепления колес с рельсами, а также износа колеса и рельса. Х. Фромм в работе [41] указывает, что по всей длине пятна контакта могут возникать два участка: сцепления и скольжения, один из которых прилегает к сбегающему краю, другой – к набегающему. Теория Картера точно описывает взаимодействие колеса и рельса в двумерной плоскости, но не позволяет определять поперечные силы, возникающих при качении колеса по рельсу. К. Джонсоном [42] предложено решение контактной задачи для квазиидентичных тел, при этом область контакта представлялась в форме круга. П. Вермюленом и К. Джонсоном [43] обобщены результаты этой работы с эллиптической областью контакта, область контакта качения разделена на два участка: участок сцепления, в котором скольжение отсутствует, и участок скольжения. В случае пространственной конфигурации пятен контакта для решения применяют численные алгоритмы [44]. Д. Д. Калкер впервые использовал вариационный метод для решения контактной задачи качения [45]. Метод позволяет учитывать произвольное направление скольжения, а также верчение (спин). Им решалась задача как в двухмерной, так и в трехмерной постановке. Д.Д. Калкером разработана теория, в основу которой положена пропорциональная зависимость между перемещениями точек в контакте, вычисляемыми через крипы и спин, и касательными силами [46]. На основе теории полос и упрощенной теории Д.Д. Калкером предложена теория, реализованная в программе FASTSIM [47].

Дальнейшее развитие теории крипа получило в работах: Де Патера, которым разработан подход с делением пятна контакта на участки для учета зон сцепления и скольжения [48, 49]. В. Киком и И. Пиотровски [50] разработаны численные алгоритмы CONTACT и FASTSIM для их вычисления. Ими введен упрощенный подход к расчету нормальных и касательных сил в пятне контак-

та, численные алгоритмы для работы с множествами пятен контакта между колесом и рельсом.

На основании модифицированного алгоритма FASTSIM под руководством Д.Ю. Погорелова [51] в программном комплексе «Универсальный механизм» разработан инструмент Rail Profile Wear Evolution, позволяющий прогнозировать изменения профилей железнодорожных колес и рельсов в процессе износа. Конфигурации различаются макрогеометрией пути, неровностями рельсовых нитей, массой экипажа и т.д. Совокупность конфигураций представляет собой репрезентативный набор условий, в которых функционирует рельсовый экипаж. Расчет потерь материала основан на теории, предложенной Арчардом. Согласно этой теории потери материала прямо пропорциональны работе сил трения в контакте. Контактные силы рассчитываются по модели В. Кика и И. Пиотровски или при помощи программы CONTACT [50].

В работе С. Casanueva, R. Enblom, M. Berg [52] представлено сравнение моделирования износа колес с рельсами при разных условиях контактирования и с применением модели износа Арчарда – двухвариантный метод и одновариантный метод. При проведении моделирования оба подхода дают примерно одинаковый результат при стабильных нагрузках и одинаковом пятне контакта, но при изменении динамических воздействий и при изменении формы пятна контакта, полученные расчетные данные по модели износа Арчарда более точно соответствуют экспериментальным наблюдениям. А.В. Саидова [53] в своей работе исследовала и обосновывала коэффициенты износа для сильной и слабой стадий изнашивания в модели Арчарда для колес из стали марки Т.

Большой вклад в развитие компьютерного моделирования сил взаимодействия, напряженного состояния в зоне контакта колеса с рельсом, теории изнашивания в системе «колесо-рельс» внесли иностранные и отечественные ученые. В работах Картера [39, 40], Джонсона и Вермюлена [43], Калкера Д.Д. [45,46], Пиотровски и Кика [50], Д.Ю. Погорелова [51], Шена [54] и др. Рассмотрены и применены численные алгоритмы для решения задач по определению сил, возникающих в пятне контакта (нормальные силы и силы крипа), и нахождение

формы и площади пятна контакта при взаимодействии колеса с рельсом. Это позволило создать программы расчета износа колес и рельсов для различных условий их эксплуатации. Численные методы расчета износа рельсов приведены в исследованиях E. Magel [55], E. Clayton, [56], A. Kapoor [57].

Наиболее сложной задачей является определение контактно-усталостной повреждаемости рельсов на поверхности катания до образования трещин ввиду достаточно сложных процессов силового взаимодействия, происходящих в зоне контакта при качении колеса по рельсу.

Наиболее широко распространенный способ количественной оценки характеристик усталости материала является метод расчета ресурса в зависимости от напряжений. Данный метод основан на допущении, что поведение материала является преимущественно упругим и материал выдерживает большое число циклов, поэтому его применение ограничено расчетом на многоцикловую усталость. Стандартный метод расчета ресурса в зависимости от напряжения предусматривает построение диаграммы Велер, которая представляет собой график взаимосвязи сопротивления усталости материала и числа циклов до разрушения в соответствии с экспериментальными испытаниями на усталость [58, 59]. Баскин [60] для диаграммы усталости предложил линейную дважды логарифмическую аппроксимацию, которую можно записать в следующем виде:

$$S_a \text{ или } S_{N_f} = \sigma'_f (2N_f)^b, \quad (1.1)$$

где S_{N_f} – это сопротивление усталости материала для числа циклов N_f при знакопеременном нагружении;

b – показатель наклона кривой усталости;

S_a – амплитуда истинных напряжений;

σ'_f – константа материала.

Коффин [61] и Мэнсон [62] первыми обнаружили, что связь между амплитудой пластической деформации (ϵ_{ap}) и количеством циклов до разрушения (N_f) может быть линеаризована в логарифмическом масштабе. Эта взаимосвязь подобна предложенной Баскином в методе расчета ресурса в зависимости от напря-

жений:

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f (2N_f)^c, \quad (1.2)$$

где (ε'_f) и c – параметры материала, называемые коэффициентом усталостной пластичности и показателем усталостной пластичности.

Если уравнение (1.1), объединить с уравнением (1.2), получится общее соотношение, которое является основанием для метода расчета ресурса в зависимости от деформаций [62]:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ap} + \varepsilon_{ae} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c, \quad (1.3)$$

где ε_a – полная амплитуда деформации;

ε_{ae} – амплитуда упругой деформации;

E – модуль упругости.

Преимущество уравнения (1.3) состоит в том, что оно применимо как при многоциклового усталости, так и при малоциклового усталости.

Для учета среднего напряжения (σ_m) предложено несколько методов, среди которых лучше соответствует экспериментальным данным преобразованное соотношение Морроу [63]:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ap} + \varepsilon_{ae} = \frac{\sigma'_f}{E} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f}\right) (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c. \quad (1.4)$$

Согласно Капуру [64], механизм прогрессирующей деформации и малоциклового усталость представляют собой отдельные явления, а окончательное разрушение регулируется механизмом, который обеспечивает меньшее число циклов до отказа. Прогрессирующая деформация является одним из наиболее активных механизмов разрушения, вызывающих образование контактной усталости при качении в условиях контакта качения/скольжения.

Сайнс [65] проанализировал результаты испытаний на усталость при знакопеременном изгибе и кручении и обнаружил, что знакопеременное напряжение сдвига вызывает усталостное повреждение. В связи с этим, он предложил критерий разрушения, объединяющий октаэдрическое напряжение сдвига и среднее

гидростатическое напряжение в следующем виде:

$$\frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_{a1} - \sigma_{a2})^2 + (\sigma_{a2} - \sigma_{a3})^2 + (\sigma_{a3} - \sigma_{a1})^2} + \beta(\sigma_{mx} + \sigma_{my} + \sigma_{mz}) \leq \gamma, \quad (1.5)$$

где β и γ – параметры материала, определенные с помощью простых испытаний на усталость;

$\sigma_{mx}, \sigma_{my}, \sigma_{mz}$ – средние напряжения в направлениях x, y, z .

Модификацией критерия Сайнса является критерий Кроссланда [66], в котором максимальное гидростатическое напряжение заменяет среднее значение. Этот критерий особенно подходит для условий, связанных с большими гидростатическими напряжениями.

Согласно наблюдениям усталостные трещины в пластичных материалах возникают в плоскостях с максимальными амплитудами напряжений сдвига, и на рост трещин влияют нормальные напряжения в прилегающих зонах. В 1959 году Финдли [67] разработал критерий для расчета на многоцикловую усталость с учетом составляющих напряжений, действующих в критической плоскости. Критерий подразумевает, что в материале происходит усталостное разрушение, если во время цикла нагружения выполняется следующее неравенство:

$$\frac{\Delta\tau_{\max}}{2} + k\sigma_{n,\max} > f, \quad (1.6)$$

где $\frac{\Delta\tau_{\max}}{2}$ – амплитуда напряжений сдвига или половина максимального размаха напряжений сдвига в рассматриваемой плоскости сдвига;

$\sigma_{n,\max}$ – максимальное нормальное напряжение, действующее в плоскости сдвига;
 f и k – параметры материала, которые связаны с пределом выносливости при знакопеременном изгибе (f_{-1}) и знакопеременном чистом кручении (t_{-1}).

В 1973 г. Браун и Миллер [68] сформулировали подобный критерий, но только с учетом сдвига и нормальных деформаций. Этот критерий основан на деформации и может использоваться как при многоцикловой, так и при малоцикловой усталости. В простом виде данный критерий представлен следующим образом [68]:

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \alpha\Delta\epsilon_n = \beta, \quad (1.7)$$

где $\Delta\gamma_{\max}/2$ – это максимальная амплитуда деформаций сдвига;

$\Delta\varepsilon_n$ – диапазон нормальных деформаций в рассматриваемой плоскости сдвига;

β – константа материала;

α – весовой коэффициент, который определяет значение влияния нормальной деформации (напряжения) на возникновение усталостной трещины.

По мнению Фатеми и Соси [69, 70] рост небольших усталостных трещин под действием только сдвиговых напряжений может быть ограничен явлением закрытия. Учитывая этот факт, Fatemi и Socie разработали критерий в следующей форме:

$$\frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} \left(1 + \alpha \frac{\sigma_{n,\max}}{\sigma_Y}\right) = \beta, \quad (1.8)$$

где $\Delta\gamma_{\max}/2$ и $\sigma_{n,\max}$ – максимальная амплитуда деформаций сдвига и максимальное нормальное напряжение в плоскости максимального напряжения сдвига;

σ_Y – предел текучести материала;

α и β – константы материала.

Этот критерий принимается как метод, основанный на деформациях, и широко используется для расчета на малоцикловую усталость.

Данг Ван [71–73] разработал критерий для расчета на многоцикловую усталость, основанный на микроскопических исследованиях, подтверждающих, что трещины возникают в полосах скольжения материала под влиянием локальной максимальной амплитуды сдвигового напряжения, и их рост ускоряется за счет раскрытия трещин вследствие растягивающего гидростатического напряжения в прилегающих зонах. В соответствии с критерием в его простой линейной форме усталостная трещина возникает в точке материала, если выполняется следующее неравенство в плоскости сдвига данной конкретной точки в течение временного блока всего цикла напряжения [74]:

$$\tau_{DV} = \tau_a(t) + a_{DV}\sigma_h(t) > b_{DV}, \quad (1.9)$$

где τ_{DV} – это параметр повреждаемости Данг Вана, который считается числовым указателем усталостного повреждения;

$\tau_a(t)$ – амплитуда напряжения сдвига в рассматриваемой плоскости сдвига, зависящая от времени и определяемая как разница между мгновенным и средним напряжением сдвига всего цикла;

$\sigma_h(t)$ – зависящее от времени гидростатическое напряжение в интересующей точке; a_{DV} и b_{DV} – параметры материала, полученные в результате двух обычных испытаний на усталость трещины (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Графическое представление критерия усталости Данг Вана в состоянии отказа, показывающее, что путь нагружения и напряжения образца пересекает линию критерия во время цикла нагружения [76]

Плоскости, на которых выполняется указанное неравенство, называются критическими плоскостями. Определение критической плоскости в каждой материальной точке представляет собой часть расчета на усталость, поскольку критическая плоскость не является очевидной в начале процесса. Следовательно, неравенство следует оценивать в любой плоскости сдвига, проходящей через материальную точку, для которой выполняется расчет на усталость.

Критерий Данг Вана применим в случаях упругого равновесия. Данный критерий успешно применен в исследованиях по формированию повреждений вследствие контактной усталости при качении на поверхности катания колес по рельсам в состоянии равновесия [75–77].

Среди отечественных ученых развитие вопросов контактной усталости применительно к колесу развито в работах В.И. Сакало [78], А.В. Сакало [79] и др.

Л.А. Сосновским [80] предложена абсолютная мера контактно-усталостной поврежденности, как опасный объем – область циклически деформируемого твердого тела, в пределах которой зарождается и развивается усталостное повреждение. Она обнаруживается в зонах пересечения (наложения) опасных объемов, обусловленных либо только нормальными, либо только касательными, либо одновременно нормальными и касательными напряжениями разных знаков.

Н.А. Махутов и др.[81], В.А. Гапанович, Л.А. Сосновский [82] описывают метод расчетно-экспериментальной оценки и прогнозирования механического состояния рельсовой стали в зоне контакта колеса и рельса. Сделан вывод, что если твердость превышает 350 HV сопротивление усталости замедляется, а потом падает. Увеличение твердости от перенаклепа сопровождается накоплением микро- и макроусталостных повреждений. В работах [83, 84] под руководством Н. А. Махутова исследованы закономерности контактно-усталостных повреждений и разрушений рельсовой стали. Л.Р. Ботвиной [85, 86] выполнены исследования по деструкции рельсовой стали поверхности катания при циклическом упруго-пластическом деформировании. Е.А.Шуром [87] выполнена оценка влияния технологии термической обработки (объемно- и дифференцированно-закаленных рельсов) на их контактно-усталостную стойкость .

Таким образом, анализ теоретических исследований по износу в системе «колесо - рельс» показал, что основной причиной износа рельсов является работа сил трения скольжения между взаимодействующими поверхностями, возникающая при движении подвижного состава. Разработаны основные научные положения теории износа в системе «колесо - рельс», в которых учитывается негерцевский контакт, пятно контакта представляется в виде совокупности площадок сцепления и скольжения. Для моделирования изнашивания в качестве инструмента выбран программный комплекс «Универсальный механизм» с подключенными модулями UM Subsystems и UM Loco, а также входящий в него программный инструмент Rail Profile Wear Evolution, в котором реализованы последние теоретические положения процесса изнашивания рельсов.

В области контактной прочности для случая качения колеса по рельсу раз-

работано несколько критериев для расчета на многоцикловую и малоцикловую усталость с учетом нормальных составляющих и напряжений сдвига. В зависимости от напряжений фактический механизм усталости подразумевает пластичность в месте зарождения трещины. Установлена связь между амплитудой пластической деформации (ε_{ap}) и сроком службы до разрушения (N_f), которая может быть линеаризована в логарифмическом масштабе. Браун и Миллер сформулировали подобный критерий с учетом сдвига и нормальных деформаций, что наиболее близко к условиям нагружения рельса при качении колеса.

1.3 Аналитический обзор экспериментальных исследований в области износа и контактно-усталостной прочности рельсов

По оценкам отечественных и зарубежных исследователей количество факторов, влияющих на интенсивность износов в системе «колесо – рельс», исчисляется десятками. Специалисты выделяют около 20 различных факторов [88–90], однако не все они имеют существенное значение. Из анализов результатов наблюдений [91–93] следует, что на участках, где преобладают кривые радиусом 350–400 м, интенсивность бокового износа в 2,5 раза выше, чем на участках, где преобладают кривые радиусом 550–600 м. Как показали исследования, основным фактором, определяющим интенсивность износа рельсов и колес подвижного состава, является затрудненное вписывание экипажей в кривые малого радиуса. В работах [94, 99] установлено, что по мере роста непогашенного центростремительного ускорения и скорости движения поездов интенсивность износа повышается, а по мере увеличения возвышения наружного рельса – понижается. При снижении непогашенного ускорения на $0,3 \text{ м/с}^2$ интенсивность бокового износа рельсов уменьшается на 10 %. Падение непогашенного ускорения на $0,3 \text{ м/с}^2$ достигается увеличением возвышения наружного рельса на 50 мм или снижением скорости движения поездов на 34 км/ч

в кривых радиусом 300 м [94].

Проведенные исследования [95] на перевальном участке Заринская – Артышта II, расположенном на Западно-Сибирской магистрали, дали следующие результаты. На подъеме в диапазоне радиусов от 250–350 м интенсивность износа в 2,4 раза больше, чем в интервале радиусов 651–850 м. На спуске в этом же диапазоне интенсивность износа в 3,2 раза больше, чем в интервале радиусов 651–850 м. Данные по участкам спуска и подъема значительно разнятся между собой, особенно в кривых участках малого радиуса.

В работе [95] теоретические исследования показали, чем больше возвышение при одинаковых радиусах и скоростях движения, тем меньше интенсивность износа. На практике убедительных данных, подтверждающих теорию, пока не получено. Резкое снижение интенсивности износа наблюдается только при возвышении наружного рельса 120–140 мм.

В работе О.М. Соколова [16] представлены данные, показывающие разницу в зависимостях интенсивности бокового износа рельсов, уложенных на участках пути радиусом $R \leq 350$ м от пропущенного тоннажа с различными промежуточными рельсовыми скреплениями – АРС-4, КБ-65, ЖБР-65ПШМ и ЖБР-65ПШР.

Эти данные показывают, что наибольшая интенсивность бокового износа рельсов ДТ350 производства АО «ЕВРАЗ» в кривых участках $R \leq 350$ м имеет место, где рельсы закреплены промежуточными скреплениями АРС-4. За ними по нисходящей следуют КБ-65, ЖБР-65ПШМ и ЖБР-65ПШР.

В работе профессора Н.И.Карпущенко [97] на основе эксплуатационных наблюдений за интенсивностью бокового износа в разных условиях эксплуатации в кривых радиусами более 350 м определено влияние ряда факторов – лубрикации, подуклонки, радиуса кривой, уровня непогашенного ускорения на износ рельсов.

Проведенные исследования [98, 99] позволили оценить влияние ширины колеи на интенсивность износа. Показано, что состояния ходовых частей подвижного состава (повышенный момент сопротивления повороту тележки,

перекос колесной пары, разница диаметров колес в колесной паре) являются значимыми факторами, оказывающими интенсивное влияние на износ рельсов в кривых участках пути. Однако учитывая, что вероятность этих отступлений в ходовых частях подвижного состава невелика и определяется регламентом технического обслуживания, данные факторы не рассматривались в настоящей работе.

Первая гипотеза о причинах возникновения и развития контактно-усталостных повреждений рельсов была высказана и опубликована профессором Г.М. Шахунянцем в работе [100]. В ней высказывалось предположение, что в процессе остывания рельсовой стали в головках рельсов возникают неоднородности в виде ликвадий и газовых пузырей, а также шлаковин, плен и других загрязнителей металла. Влияние неметаллических включений на образование дефектов контактно-усталостного характера рассмотрено в работах [101–104]. Исследования А.Д. Конюхова [104] по остаточным напряжениям в образцах рельсов, изъятых из эксплуатации, показали, что на глубине 4÷5 мм сжимающие напряжения могут переходить в растягивающие остаточные напряжения. Им же был изучен вопрос о зависимости вида контактно-усталостного повреждения или дефекта рельса от глубины его залегания по отношению к поверхности катания рельса.

Влияние структуры металлической матрицы на образование контактно-усталостных дефектов в рельсах исследовано в [101, 103, 105–108]. Такие дефекты в зависимости от характера и места образования классифицированы согласно [103] Е.А. Шуром. В работах [106, 108–113] выполнен подробный анализ причин образования контактно-усталостных повреждений рельсов. В.Ф. Яковлев разработал методы экспериментального исследования контактных напряжений и деформаций в рельсах [114, 115]. По результатам уточненных им методов расчета, значения контактно-усталостных напряжений от обычных средних эксплуатационных нагрузок на поверхности рабочей выкружки головки рельса установлены в пределах 1200–1500 МПа. В.Ф. Яковлев и П.А. Кудрявцев в работе [116] по-

казали, что контактная выносливость зависит от прочностных характеристик материала и вида нагружения. При совместном действии вертикальных и боковых сил контактная выносливость снижается от 1,5 до 7 раз.

Требования к химическому составу и механическим свойствам рельсовой стали отработаны многолетней практикой эксплуатации железных дорог и совершенствованием технологии производства рельсового проката на металлургических комбинатах [117–121].

Результаты испытаний на экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» рельсов различных поставщиков [122, 123] показывают, что фактический уровень механических свойств новых рельсов практически одинаков, что обусловлено химическим составом и способом термообработки. Вопросам совершенствования термической обработки рельсов посвящено значительное количество исследований [124–129]. Вид микроструктуры металла термоупрочненных рельсов и распределение твердости по сечению головки зависит от скорости охлаждения рельсов с нагрева под закалку, определяемой способом охлаждения и видом охлаждающей среды (вода, масло, водно-полимерная суспензия, водо-воздушная смесь). Кинетика распада аустенита в различных сечениях рельса обобщена в виде термокинетических диаграмм.

Д.П. Марков в работе [130] анализирует природу напряжений, ответственных за появление контактно-усталостного разрушения и гипотезы такого разрушения: критерий максимальных сжимающих контактных напряжений; критерий исчерпания пластичности (предельной деформации); критерий максимальных касательных контактных напряжений, действующих на глубине и зависящих от величины сил трения [130].

Одним из объяснений образования контактно-усталостных трещин может быть развитие значительных пластических деформаций, особенно если превзойден так называемый предел приспособляемости материала, введенный К.Л. Джонсоном. Согласно его исследованиям [42], после некоторого числа повторных контактных нагрузок при перекачивании цилиндра по упруго-пластичному основа-

нию рост пластических деформаций практически прекращается и наступает как бы новое упругое состояние.

В работах В.Е. Громова [132–134] методами оптической, сканирующей, просвечивающей электронной дифракционной микроскопии и измерения микро-твердости и трибологических параметров установлены закономерности изменения структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры поверхностных слоев рельсов до 10 мм по центральной оси и выкружке после длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж – 500 и 1000 млн т брутто).

По характеру излома и уровню дефектности (рисунок 1.10) выделены и проанализированы три слоя: поверхностный, переходный и основной объем металла. После 500 млн т брутто пропущенного тоннажа пластины цементита полностью разрушаются и формируются частицы цементита округлой формы размерами 10–50 нм. После 1000 млн т брутто отмечено протекание начальной стадии динамической рекристаллизации.

В результате пластической деформации поверхностного слоя металла головки рельса от колес подвижного состава происходит неравномерное увеличение твердости (наклеп), достигающий у объемно-закаленных рельсов значений $410\div 420\text{ HB}$ [134].

Микроструктура металла рельсов в наклепанной зоне головки исследовалась многочисленными авторами. Из последних публикаций следует выделить работу А.А. Юрьева [135], в которой проведены исследования эволюции структуры и свойств дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации.

Влиянию силовых факторов на контактно-усталостные повреждения посвящено значительное количество работ. Автором исследовано влияния осевых нагрузок на КУ-повреждения рельсов и пути выполнено в работа [136,137], влияние ударных сил на КУ-повреждения, возникающих от понижений в зоне сварных стыков [138–140], дефектов на поверхности катания колес подвижного состава [141–146]. В результате проведенных исследований установлено:

- от повреждающего действия ударных и квазистатических сил,

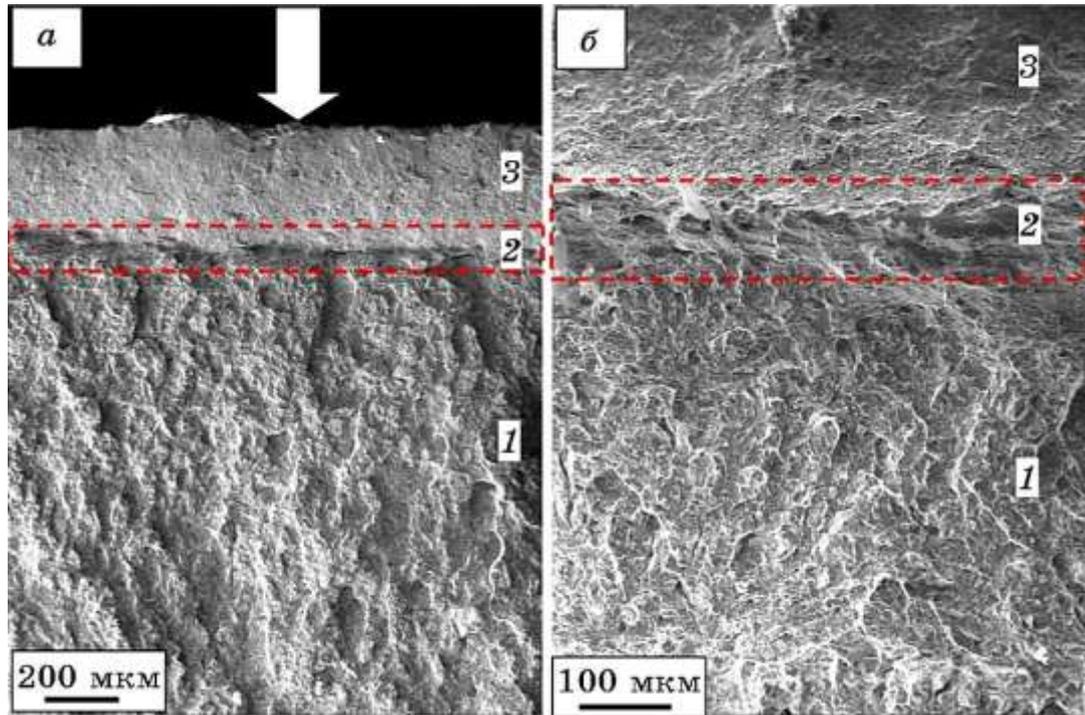


Рисунок 1.10 – Структура поверхности образца рельсовой стали после пропущенного тоннажа 500 млн т брутто: 1 – поверхностный слой (поверхность катания), 2 – переходной слой, 3 – основной объем металла

пониженных механических параметров рельсовой стали в зоне термического влияния сварного стыка, снижение долговечности по КУ-дефектам может составлять более чем в два раза по сравнению с обычными рельсам;

– при ударном взаимодействии колес с дефектами и рельсов возникают импульсные воздействия большой мощности, которые развиваются в затухающий колебательный процесс, включающий 2...3 периода колебаний как в вертикальной, так и в поперечной плоскостях. Влияние на контактно-усталостную долговечность ударные силы оказывают в пределах 0,8...1 % от уровня повреждений от квазистатических нагрузок, что определяется малой вероятностью воздействия их на одну и ту же зону поверхности катания.

Для снижения контактно-усталостных повреждений рельсов исследования зарубежных и отечественных ученых направлены на:

- разработку рельсовых сталей нового поколения для тяжелых режимов работы, в том числе сталей бейнитного класса;
- совершенствования технологии шлифования рельсов;
- разработка моделей прогнозирования возникновения и развития трещин от воздействия колес подвижного состава;
- снижению динамических усилий в системе «колесо-рельс» .

Выполненный анализ экспериментальных и технологических работ по исследованию контактно-усталостной прочности рельсов показал следующее:

- для повышения контактно-усталостной прочности рельсов выполнено значительное количество исследований по выбору оптимального химического состава рельсовой стали, отработке способов и режимов термообработки, исследовано влияние неметаллических включений, матрицы рельсовой стали, остаточных напряжений и поверхностного наклепа на зарождение контактно-усталостных дефектов;
- показано, что с увеличением наработки по пропущенному тоннажу происходит изменение механических свойств: на начальной стадии в процессе наклепа и приспособляемости материала предел контактной усталости повышается до достижения твердости HV 400...420. Дальнейшая наработка приводит к деградации слоя рельсовой стали на поверхности катания, выражающаяся в его охрупчивании с повышенной плотностью дефектов.

1.4 Постановка цели и задач исследования

Выполненный анализ эксплуатационных данных по износу рельсов в критических участках пути малого радиуса показал, что на перевальных участках и участках с высокой грузонапряженностью интенсивность бокового износа превышает нормативные значения в 1,5–2 раза. Установлено, что интенсивность износа возросла с ростом грузонапряженности, что может быть объяснено внедрением нового подвижного состава (локомотивов и вагонов) с повышенными осевыми нагруз-

ками и оригинальными конструкциями экипажных частей. Показано, что интенсивность износа существенно зависит от категории качества рельсов, а также от радиуса кривых, возвышения наружного рельса, фактической скорости движения и, как следствие, величины непогашенного ускорения, продольного профиля пути, конструкции применяемых промежуточных рельсовых скреплений, сезонности и др. факторов.

Количество дефектов поверхности катания рельсов контактно-усталостного происхождения составляет более половины от общего количества всех дефектных рельсов (ДР). Внедрение нового подвижного состава с повышенными осевыми нагрузками увеличит контактные давления на поверхности катания рельсов. Для оценки влияния повышенных осевых нагрузок на контактно-усталостную долговечность рельсов необходимо разработать научно-обоснованную методику прогнозирования их ресурса. Одним из способов повышения ресурса рельсов является обработка поверхности катания рельсов методами шлифования, фрезерования или строгания. Для условий интенсификации грузового движения, при котором из-за повышенных осевых нагрузок и более глубоком зарождении контактно-усталостных трещин, наиболее эффективным является фрезерование рельсов.

В результате выполненного анализа опубликованных работ по теоретическим и экспериментальным исследованиям по проблеме повышения ресурса рельсов, их износостойкости в кривых участках пути, контактно-усталостной долговечности для условий интенсификации грузового движения сформулированы следующие направления исследования:

- 1 Разработать структурную схему и аналитические выражения для расчета бокового и вертикального износа рельсов различных категорий качества для разных условий эксплуатации.

- 2 Установить нормативы интенсивности износа рельсов разных категорий качества для базовых условий эксплуатации.

- 3 Определить количественные значения функциональных коэффициентов, определяющие интенсивность бокового и вертикального износа рельсов разных категорий качества, от эксплуатационных факторов (радиуса кривых участков пу-

ти, уровней непогашенных ускорений, периодичности лубрикации рельсов, продольного профиля пути и массы поездов, конструкции экипажных частей подвижного состава и величин осевых нагрузок, типа применяемых промежуточных рельсовых скреплений).

4 Разработать методику прогнозирования износа рельсов различных категорий качества для разных условий эксплуатации и программное обеспечение для автоматизированного расчета износа рельсов.

5 Разработать алгоритм прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов, определить параметры деформационных кривых пластической и упругой усталости рельсовой стали, влияние на контактно-усталостную повреждаемость извилистого движения колесных пар и деградацию механических свойств поверхности катания от пропущенного тоннажа.

6 Разработать методику формирования интегрального распределения вертикальных сил от суточного пакета поездов для конкретного перегона с учетом наиболее значимых факторов состояния пути, в том числе выплесков во влажном и сухом состояниях.

7 Разработать методику прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов до образования трещин с учетом деградации механических свойств от пропущенного тоннажа.

8 Установить закономерности технологии фрезерования рельсов в пути при репрофилировании изношенной головки рельса и удаления контактно-усталостных повреждений, распространяющихся на глубину до 2,5 мм.

На основании вышеперечисленных задач сформулирована цель работы.

Цель работы – разработка научно-обоснованных методов прогнозирования износа рельсов разных категорий качества и контактно-усталостной повреждаемости их поверхности катания для условий интенсификации грузового движения.

Структурная схема проведения диссертационных исследований представлена на рисунке 1.11.

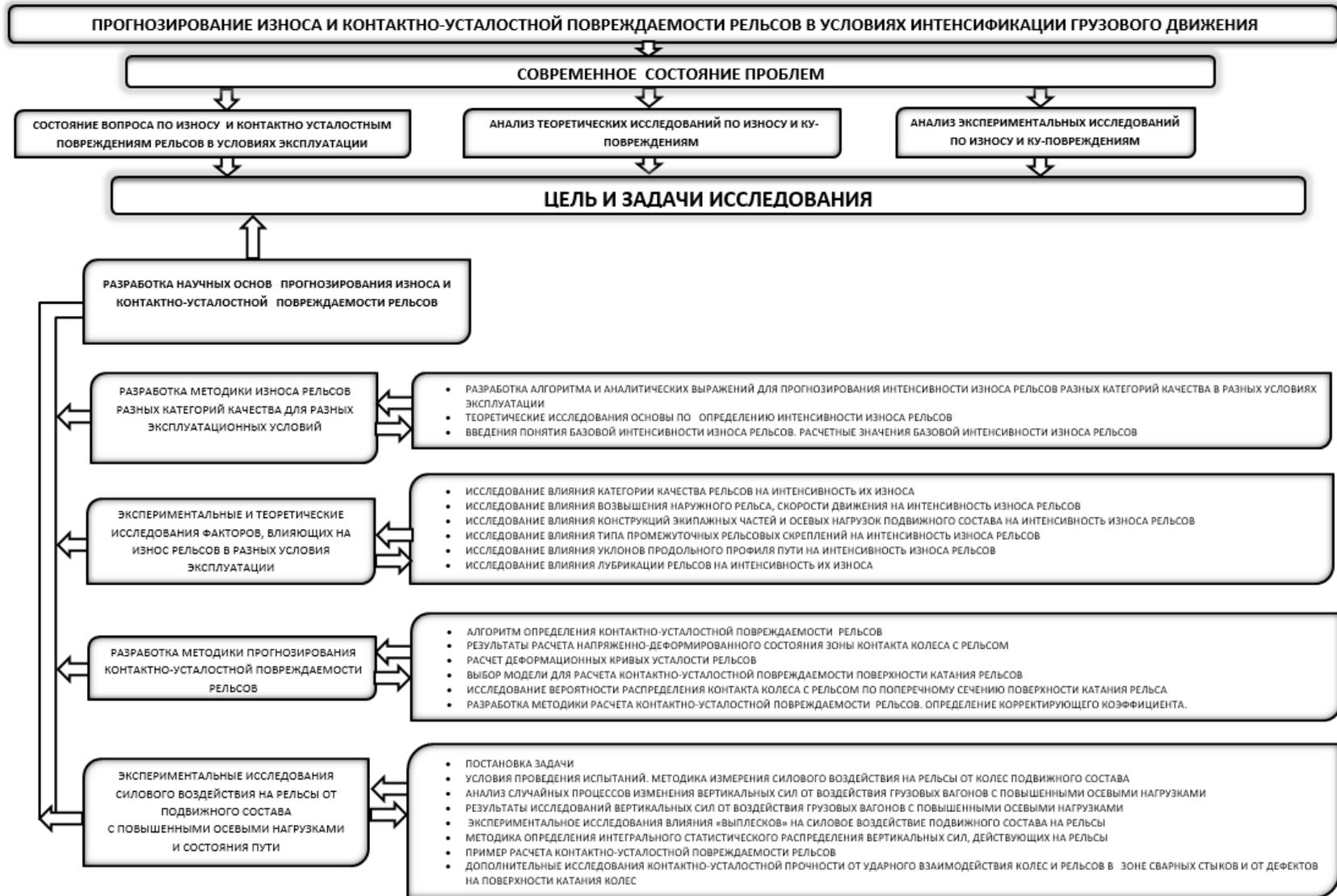


Рисунок 1.11 – Структурная схема проведения диссертационных исследований

ГЛАВА 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ БОКОВОГО И ВЕРТИКАЛЬНОГО ИЗНОСА РЕЛЬСОВ В КРИВЫХ УЧАСТКАХ ПУТИ

2.1 Структурная схема прогнозирования износа рельсов в кривых участках пути при разных условиях эксплуатации

В основу методики положена структурная схема расчета бокового и вертикального износа рельсов в кривых участках пути. Структурная схема представлена на рисунке 2.1.

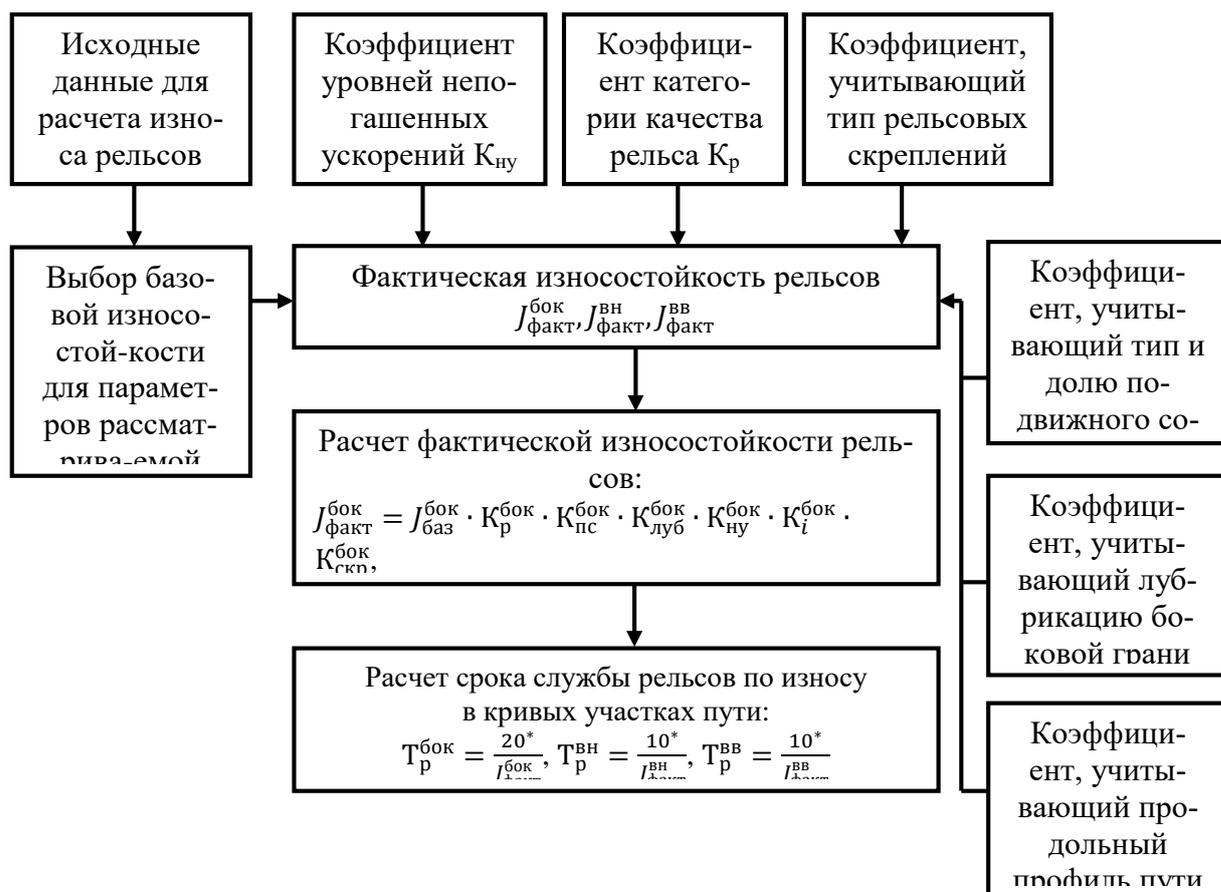


Рисунок 2.1 – Структурная схема прогнозирования износа рельсов разных категорий качества в разных условиях эксплуатации

В верхнем левом углу структурной схемы представлен перечень исходных

данных для расчета. Формирование исходных данных является важной составляющей методики, от полноты задания исходных данных зависит достоверность проводимых расчетов. Подробно перечень исходных данных представлен в виде структурной схемы на рисунке 2.2.

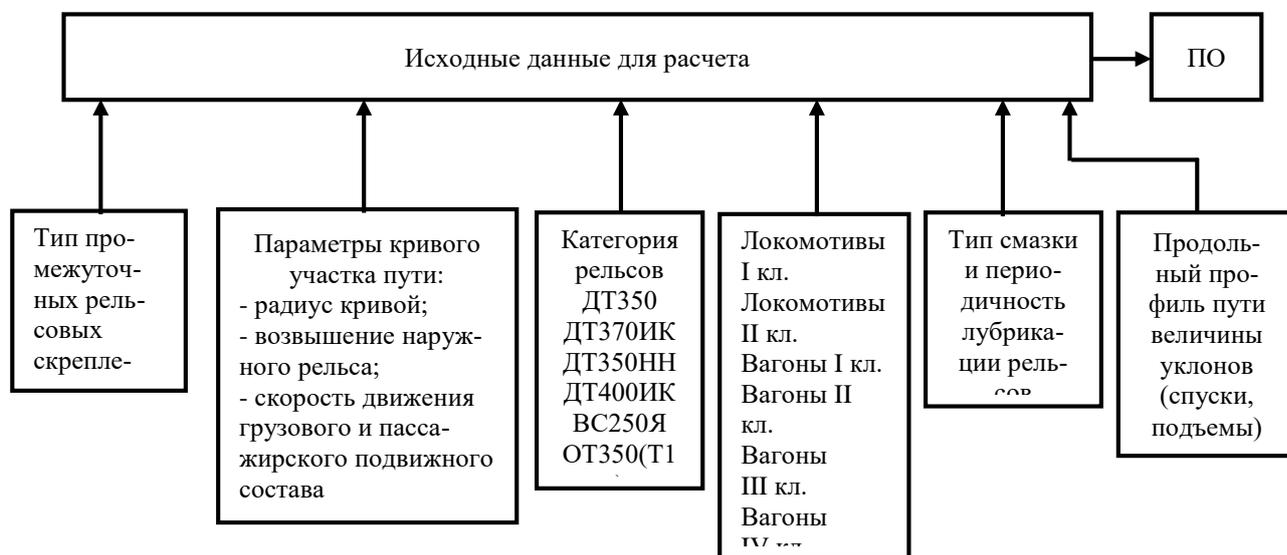


Рисунок 2.2 – Структурная схема исходных данных для расчета прогнозирования износа рельсов в кривых участках пути

Анализ работ по износу рельсов показал, что интенсивность износа рельсов зависит от сил и коэффициентов трения в зоне контакта гребня колеса и рельса, их твердостей, размера и формы пятен контакта, а также разных факторов. По данным исследований отечественных и зарубежных специалистов [156–158] на интенсивность износа рельсов оказывает влияние более двадцати факторов. На основании анализа ранее выполненных исследований износа рельсов от разных факторов проведено ранжирование, результаты которого представлены в виде схемы на рисунке 2.3.

*I группа**II группа**III группа*

Рисунок 2.3 – Структура факторов, влияющих на износ рельсов

К первой группе отнесены факторы, которые оказывают наибольшее и постоянное влияние на износ – радиус кривого участка пути, возвышение наружного рельса и фактические скорости движения, категория качества рельсов, уклон продольного профиля пути и массы поездов, типа смазки и периодичности лубрикации рельсов, конструкция экипажных частей подвижного состава и величины осевых нагрузок, подуклонка рельсов и др.

Ко второй группе отнесены факторы, которые определяются системой технического обслуживания подвижного состава и пути – перекося колесных пар в экипаже, разность диаметров колес КП, повышенный момент поворота тележек при вписывании в кривые участки пути, амплитуда неровностей в плане в кривых участках пути, профили колес и рельсов.

К третьей группе отнесены факторы, которые оказывают незначительное влияние на износ рельсов – шероховатость поверхности катания рельсов после

шлифования, ширина колеи в пределах установленных нормативами.

В условиях эксплуатации часто на износ рельсов одновременно действует несколько факторов. Это затрудняет учет вклада каждого фактора в процесс изнашивания. Для научно обоснованного учета влияния каждого фактора выбран метод моделирования процесса изнашивания с экспериментальным подтверждением полученных результатов. Процесс моделирования позволяет рассматривать влияние конкретного фактора при его вариации и постоянных значениях остальных. Так как в процессе эксплуатации на рельсы действует разнообразный подвижной состав при многообразных эксплуатационных условиях для прогнозирования бокового и вертикального износа рельсов введено понятие – «базовая интенсивность износа» рельсов. «Базовые интенсивности» бокового и вертикального износа рельсов справедливы лишь для ограниченных «базовых» условий.

Одной из основных составляющих являются параметры устройства кривого участка пути: радиус кривой, возвышение наружного рельса, длины круговой и переходных кривых, установленные и фактические скорости для грузового и пассажирского подвижного состава, которые определяют величины непогашенного ускорения. Все параметры устройства кривого участка пути оказывают влияние на интенсивность бокового и вертикального износа рельсов. В эксплуатации имеет место широкий набор различных факторов, которые вносят в результаты расчета заметные коррективы. К факторам, оказывающим значительное влияние на износ рельсов, относятся – лубрикация рельсов, конструкции экипажных частей и осевые нагрузки подвижного состава, продольный профиль пути и масса поездов, величина непогашенного ускорения и др.

На основании структурной схемы (рис.2.1) разработаны аналитические выражения для определения бокового и вертикального износа наружного рельса и вертикального износа внутреннего рельса, которые представлены в разделе 2.2.

2.2 Аналитические выражения для прогнозирования фактического износа рельсов в разных условиях эксплуатации

Боковой износ наружного рельса в кривом участке пути

На основании разработанной структурной схемы и с учетом функциональных факторов выражение для определения фактического бокового износа $J_{\text{факт}}^{\text{бок}}$ наружного рельса для кривого участка пути может быть записано в виде:

$$J_{\text{факт}}^{\text{бок}} = J_{\text{баз}}^{\text{бок}} \cdot K_{\text{р}}^{\text{бок}} \cdot K_{\text{пс}}^{\text{бок}} \cdot K_{\text{луб}}^{\text{бок}} \cdot K_{\text{ну}}^{\text{бок}} \cdot K_i^{\text{бок}} \cdot K_{\text{скр}}^{\text{бок}}, \quad (2.1)$$

где $J_{\text{факт}}^{\text{бок}}$ – базовая величина бокового износа рельсов ДТ350 от воздействия грузового вагона на тележках 18-100 с осевой нагрузкой 230 кН в кривом участке пути фактического радиуса при равновесной скорости движения базового грузового вагона;

$K_{\text{р}}^{\text{бок}}$ – функциональный коэффициент, учитывающий влияние категории качества рельсов на боковой износ наружного рельса;

$K_{\text{пс}}^{\text{бок}}$ – функциональный коэффициент, определяющий влияние конструкции экипажных частей подвижного состава и величин осевых нагрузок на интенсивность бокового износа рельсов;

$K_{\text{луб}}^{\text{бок}}$ – коэффициент, учитывающий влияние лубрикации на изменение интенсивности бокового износа от базового варианта без лубрикации;

$K_{\text{ну}}^{\text{бок}}$ – функциональный коэффициент, учитывающий влияние уровней непогашенных ускорений на боковой износ наружного рельса;

$K_i^{\text{бок}}$ – функциональный коэффициент, учитывающий влияние продольного профиля пути на боковой износ наружного рельса;

$K_{\text{скр}}^{\text{бок}}$ – функциональный коэффициент, учитывающий влияние типа промежуточных рельсовых скреплений на боковой износ наружного рельса.

Вертикальный износ наружного рельса в кривом участке пути

Выражение для определения фактического вертикального износа $J_{\text{факт}}^{\text{ВН}}$ наружного рельса для кривого участка пути примет вид:

$$J_{\text{факт}}^{\text{ВН}} = J_{\text{баз}}^{\text{ВН}} \cdot K_{\text{р}}^{\text{ВН}} \cdot K_{\text{пс}}^{\text{ВН}} \cdot K_{\text{ну}}^{\text{ВН}} \cdot K_i^{\text{ВН}} \cdot K_{\text{скр}}^{\text{ВН}}, \quad (2.2)$$

где $J_{\text{факт}}^{\text{ВН}}$ – базовая величина вертикального износа наружного рельса ДТ350 от воздействия грузового вагона на тележках 18-100 с осевой нагрузкой 230кН в кривой фактического радиуса R при равновесной скорости движения базового грузового вагона;

$K_{\text{р}}^{\text{ВН}}$ – функциональный коэффициент, учитывающий влияние категории качества рельсов на вертикальный износ наружного рельса;

$K_{\text{пс}}^{\text{ВН}}$ – функциональный коэффициент, определяющий влияние конструкции экипажных частей подвижного состава и осевой нагрузки на интенсивность вертикального износа наружного рельса;

$K_{\text{ну}}^{\text{ВН}}$ – функциональный коэффициент, учитывающий влияние уровней непогашенных ускорений на вертикальный износ наружного рельса;

$K_i^{\text{ВН}}$ – функциональный коэффициент, учитывающий влияние продольного профиля пути на вертикальный износ наружного рельса;

$K_{\text{скр}}^{\text{ВН}}$ – функциональный коэффициент, учитывающий влияние типа промежуточных рельсовых скреплений на боковой износ наружного рельса.

Вертикальный износ внутреннего рельса в кривом участке пути

Выражение для определения фактического вертикального износа $J_{\text{факт}}^{\text{ВВ}}$ внутреннего рельса для кривого участка пути может быть записано в виде:

$$J_{\text{факт}}^{\text{ВВ}} = J_{\text{баз}}^{\text{ВВ}} \cdot K_{\text{р}}^{\text{ВВ}} \cdot K_{\text{пс}}^{\text{ВВ}} \cdot K_{\text{ну}}^{\text{ВВ}} \cdot K_i^{\text{ВВ}} \cdot K_{\text{скр}}^{\text{ВВ}}, \quad (2.3)$$

где $J_{\text{баз}}^{\text{ВВ}}$ – базовая величина вертикального износа внутреннего рельса ДТ350 от воздействия грузового вагона на тележках 18-100 с осевой нагрузкой 230 кН в кривой фактического радиуса R при равновесной скорости движения базового грузового вагона;

K_p^{BB} – функциональный коэффициент, учитывающий влияние категории качества рельсов на вертикальный износ внутреннего рельса;

$K_{ПС}^{BB}$ – функциональный коэффициент, определяющий влияние конструкции экипажных частей подвижного состава и осевой нагрузки на интенсивность вертикального износа внутреннего рельса;

$K_{НУ}^{BB}$ – функциональный коэффициент, учитывающий влияние уровней непогашенных ускорений на вертикальный износ внутреннего рельса;

K_i^{BB} – функциональный коэффициент, учитывающий влияние продольного профиля пути на интенсивность износа внутреннего рельса;

$K_{скр}^{BB}$ – функциональный коэффициент, учитывающий влияние типа промежуточных рельсовых скреплений на вертикальный износ внутреннего рельса.

2.3 Теоретические исследования интенсивности износа рельсов

Для решения задачи создания методики прогнозирования бокового и вертикального износов важным является выбор модели изнашивания и получение объективных и достоверных исходных данных по боковому и вертикальному износу рельсов в контрольном кривом участке пути [15]. Определение параметров модели изнашивания включает в себя проведение наблюдений за износом рельсов общего назначения ДТ350, которые массово внедряются на российских железных дорогах, в кривом участке пути. Далее создавалась компьютерная модель реальной опытной кривой при движении подвижного состава, учитывающая геометрические параметры кривой и структуру фактического поездопотока проходящего через опытную кривую в течение суток. С помощью многовариантных расчетов процесса изнашивания рельсов методом подбора выбираются коэффициенты износа таким образом, чтобы экспериментальные и расчетные данные по боковому и вертикальному износам рельсов совпадали с

высокой степенью сходимости.

Для моделирования процесса изнашивания рельсов в качестве инструмента выбран программный комплекс «Универсальный механизм» (Universal Mechanism 9.0): программа описания моделей UM Input (uminput.exe) и программа моделирования движения UM Simulation (umsimul.exe) с подключенными модулями UM Subsystems и UM Loco, а также входящий в него программный инструмент Rail Profile Wear Evolution [160-162].

Для моделирования процессов на поверхностях рельса был выполнен анализ известных моделей износа [163–167] и выбрана модель изнашивания Шпехта [163]. Эта модель предполагает, что существуют режимы умеренного и интенсивного изнашивания. Применительно к контакту «колесо – рельс» принимается, что на круге катания (определяется как первая точка контакта) реализуется умеренный режим износа, а в гребневом контакте (определяется как вторая точка контакта) – интенсивный.

При моделировании износа по модели Шпехта необходимо задать основные параметры изнашивания: коэффициент износа, коэффициент скачка и критическую плотность мощности сил трения.

Коэффициент износа влияет на интенсивность умеренного изнашивания на поверхности катания рельса – вертикальный износ. Коэффициент скачка – это повышающий коэффициент, характеризующий изнашивание в гребневом контакте, которое в конечном счете влияет на боковой износ. Эти коэффициенты подбираются с использованием экспериментальных данных по износу рельсов разных категорий качества, полученных в конкретных условиях эксплуатации.

Критическая плотность мощности сил трения – это принимаемая величина плотности мощности при превышении которой износ переходит из умеренного состояния в интенсивный.

Плотность мощности сил трения зависит от радиуса кривого участка пути и скорости движения экипажа. На рисунке 2.4 представлены результаты численного моделирования движения грузового вагона в кривом участке пути с различной скоростью движения.

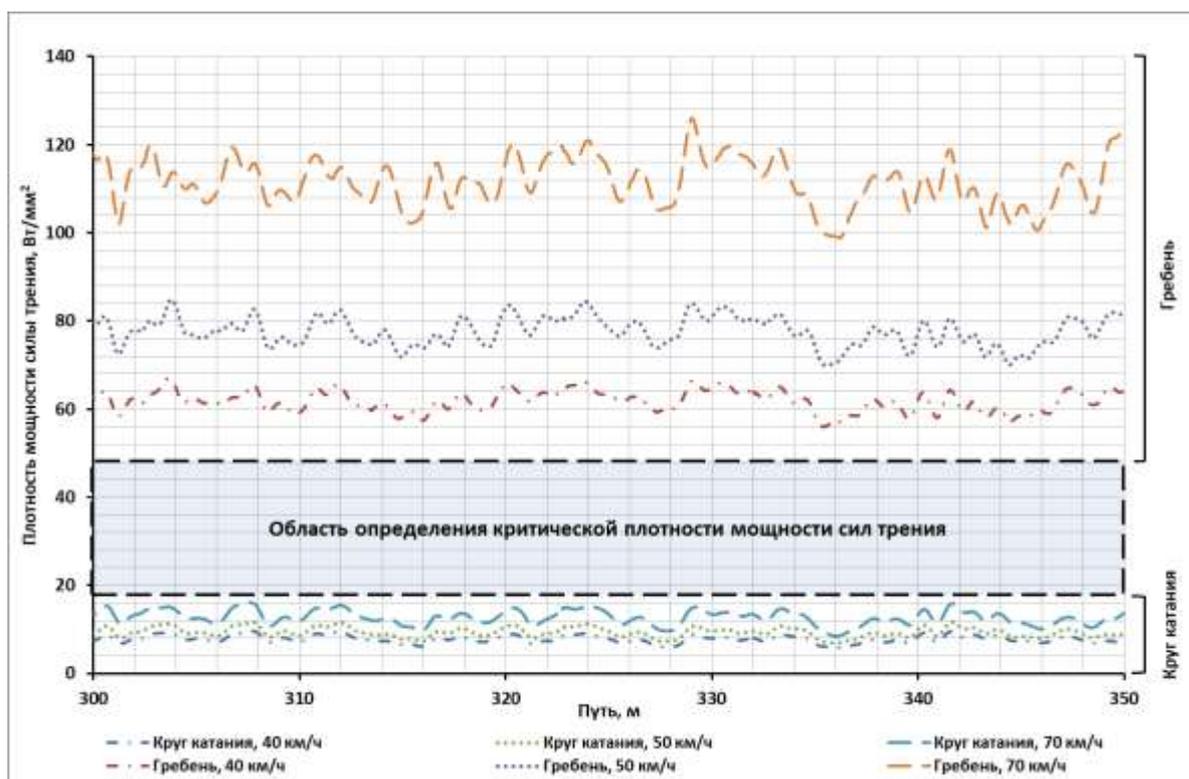


Рисунок 2.4 – Расчетные осциллограммы плотности мощности сил трения на гребне и круге катания

Из графиков видно, что в диапазоне 18–48 Вт/мм² между значениями плотности мощности сил трения на гребне колеса и поверхности катания имеется интервал, который является областью определения критической плотности мощности сил трения.

В соответствии с [163–167] между объемным износом U_z и работой сил трения скольжения A в контакте существует линейное соотношение:

$$U_z = k_v A, \text{ при } P < P_{кр}, \quad (2.4)$$

$$U_z = k_v k_\gamma A, \text{ при } P \geq P_{кр}, \quad (2.5)$$

где k_v – коэффициент износа;

P – плотность мощности;

$P_{кр}$ – критическая плотность мощности;

k_γ – коэффициент скачка.

В программном комплексе «Универсальный механизм» для решения касательной контактной задачи используется алгоритм FastSim [45–47]. Пятно

контакта дискретизируется на полосы равной ширины, параллельные оси x , которые в свою очередь делятся на равное число элементов (рисунок 2.5).

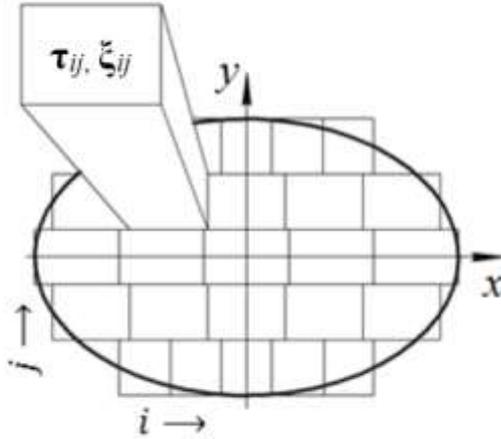


Рисунок 2.5 – Дискретизация пятна контакта в алгоритме:

τ_{ij} – касательные усилия в элементе; ξ_{ij} – крип в центре элемента [47]

Объемный износ U_{zij} вычисляется для каждого элемента:

$$U_{zij} = k_v \tau_{ij} v \xi_{ij} \Delta C_{ij} \Delta t, \quad (2.6)$$

где τ_{ij} – касательные напряжения в центре элемента;

v – скорость движения колесной пары;

ξ_{ij} – крип в центре элемента;

ΔC_{ij} – площадь элемента;

Δt – шаг интегрирования.

$$U_{zij} = k_v \frac{p_{nij} \Delta C_{ij}}{H} |\xi_{ij}| \Delta x_j, \quad (2.7)$$

где p_{nij} – нормальные давления в центре элемента;

Δx_j – размер элемента вдоль оси x ;

H – твердость более мягкой из двух поверхностей.

Общий износ, накопленный в полосе, получается суммированием по всем элементам полосы. Интегрирование системы начинается с набегающего края, и для каждого элемента проверяется выполнение закона Кулона.

Приведенные выше соотношения позволяют вычислить съем материала в

точках профиля. Перед началом моделирования профиль дискретизируется на n сегментов равной длины по дуговой координате. В процессе моделирования динамики рельсового экипажа на этой дискретизации строится гистограмма распределения объемного износа по профилю рельса (рисунок 2.6), а затем полученная гистограмма аппроксимируется В-сплайном.

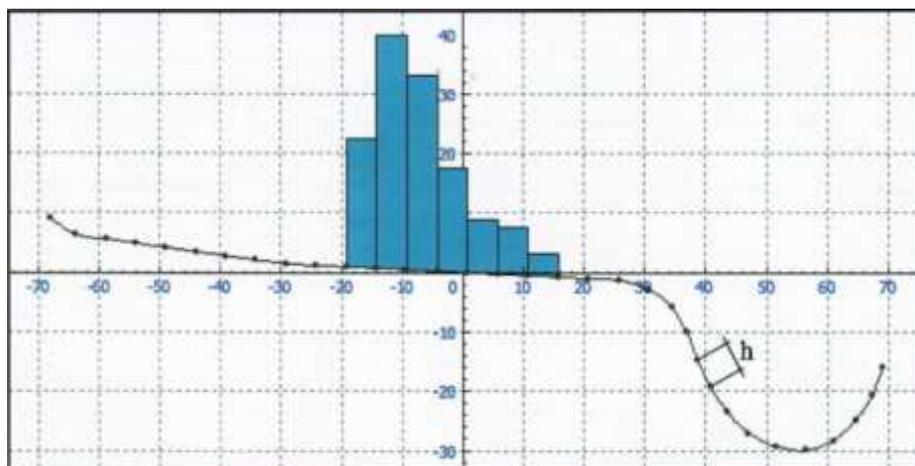


Рисунок 2.6 – Гистограмма распределения объемного износа поперек профиля рельса [162]

Съем материала для профиля рельса δ_r :

$$\delta_r(s) = \frac{U_z(s)}{Lh}, \quad (2.8)$$

где s – дуговая координата;

U_z – эпюра объемного износа;

L – длина участка изнашивания;

h – шаг дискретизации профиля на сегменты.

Для идентификации параметров изнашивания по модели Шпехта использовались экспериментальные данные, полученные в ходе инструментальных измерений бокового и вертикального износов рельсов общего назначения ДТ350 в опытных кривых разных радиусов, уложенных на Большом окружном кольце Московской дирекции инфраструктуры.

Для проведения моделирования износа рельсов использовалась параметри-

зованная модель грузового вагонов, построенная как система абсолютно твердых тел, связанных посредством шарниров и силовых элементов (рисунок 2.7).

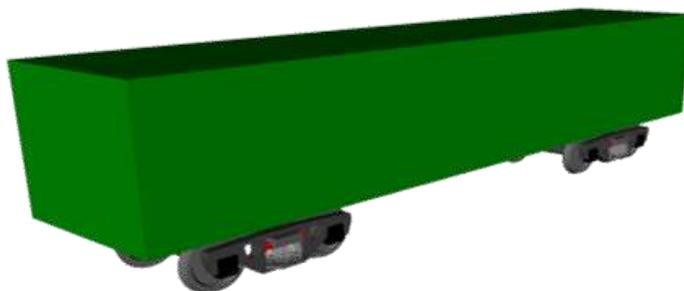


Рисунок 2.7 – Компьютерная модель грузового вагона [161]

Для проведения теоретических исследований бокового и вертикального износов рельсов в программном комплексе создавалась компьютерная модель опытной кривой [161]. При этом в модели выполнялась настройка всех необходимых параметров. Для моделирования движения экипажа и исследования износа задавались исходные данные макрогеометрии с параметрами кривого участка в плане (рисунок 2.8).

Для профилей колес был принят усредненный профиль (рисунок 2.9), полученный по результатам экспериментального исследования среднесетевого профиля поверхности катания колес грузовых вагонов [168].

Для расчета профиля рельса задавалось нужное число итераций – однократный расчет совокупности численных экспериментов. При этом одной итерации соответствует назначенное количество пропущенного тоннажа (рисунок 2.10).

После каждой итерации в связи с изменением исходного профиля рельса происходят изменения условий взаимодействия колес с рельсом. Величина тоннажа использована для масштабирования износа в конце каждой итерации. Целью масштабирования являлось получение значимого износа при небольшом суммарном пропущенном тоннаже. При изменении профиля рельса автоматически производилась перенастройка условий взаимодействия колес с рельсом [161].

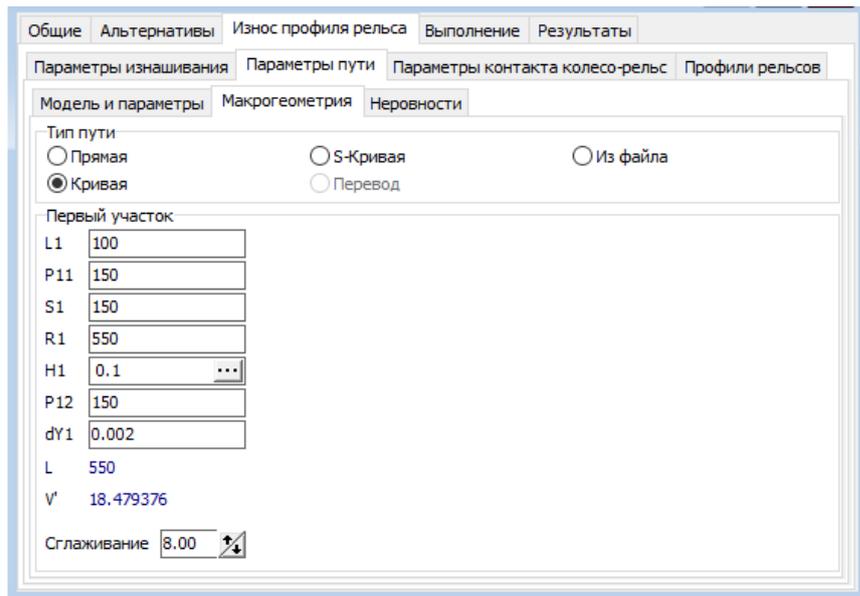


Рисунок 2.8 – Параметры макрогеометрии кривого участка пути с рельсами исследуемой категорией качества [161]

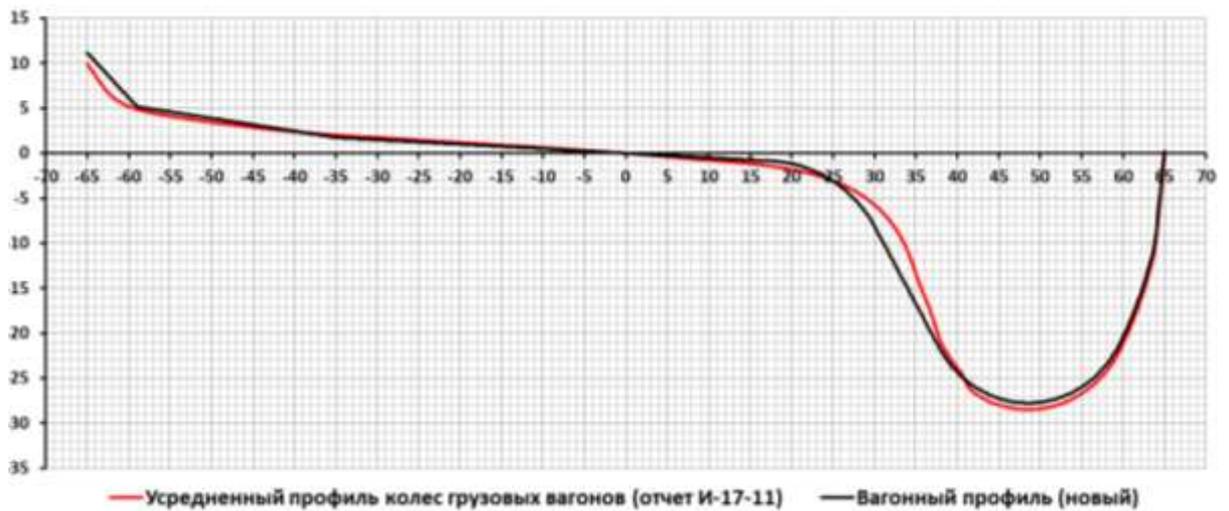


Рисунок 2.9 – Среднесетевой (усредненный) профиль и новый профиль колеса, используемые в процессе моделирования [168]

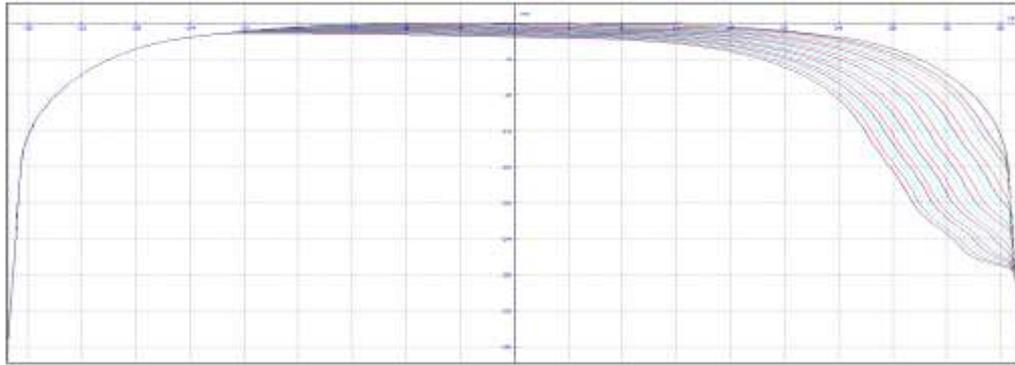


Рисунок 2.10 – Изменение профиля рельса по мере изнашивания от пропущенного тоннажа [162]

Для определения параметров модели Шпехта рассмотрим экспериментально полученные зависимости интенсивности износа рельсов ДТ350, полученные путем проведения измерений бокового и вертикального износа рельсов в кривых участках пути Большого окружного кольца Московской железной дороги.

В таблице 2.1 представлены обработанные результаты изменения износа головки рельса ДТ350 в кривой $R493$ м от величины пропущенного тоннажа.

Таблица 2.1 – Результаты измерения износа головки рельса в кривой $R493$ м

Параметры	Дата замера						
	23.03. 2020	27.05. 2020	02.09. 2020	05.11. 2020	15.0.1. 2021	02.04. 2021	22.08. 2021
	Величина пропущенного тоннажа T , по наружной/внутренней нити, млн т брутто						
	20,3	38,8	62,8	81,3	104,4	146,8	185,7
Износ головки, мм:							
- наружного рельса	1,21–1,86	2,09–3,34	3,1–4,92	4,87–6,59	6,76–8,01	7,84–9,66	9,6–11,9
• боковой $\delta_{нар.}^{бок.}$	1,68	2,93	4,31	5,12	7,17	8,95	10,3
• вертикальный $\delta_{нар.}^{верт.}$	0,41	0,44	0,47	0,55	0,61	0,79	1,01
• приведённый $\delta_{нар.}^{прив.}$							
- внутреннего рельса							
• вертикальный $\delta_{внутр.}^{верт.}$	0,56	0,58	0,64	0,71	0,83	0,97	1,13

На рисунке 2.11 представлены зависимости изменения бокового износа головки наружного рельса и интенсивность их изменения в кривой R 493 м от величины пропущенного тоннажа.

На рисунке 2.12 представлены зависимости изменения вертикального износа поверхности катания на головке наружного и внутреннего рельсов в в кривой R 493 м и их интенсивность износа от пропущенного тоннажа.

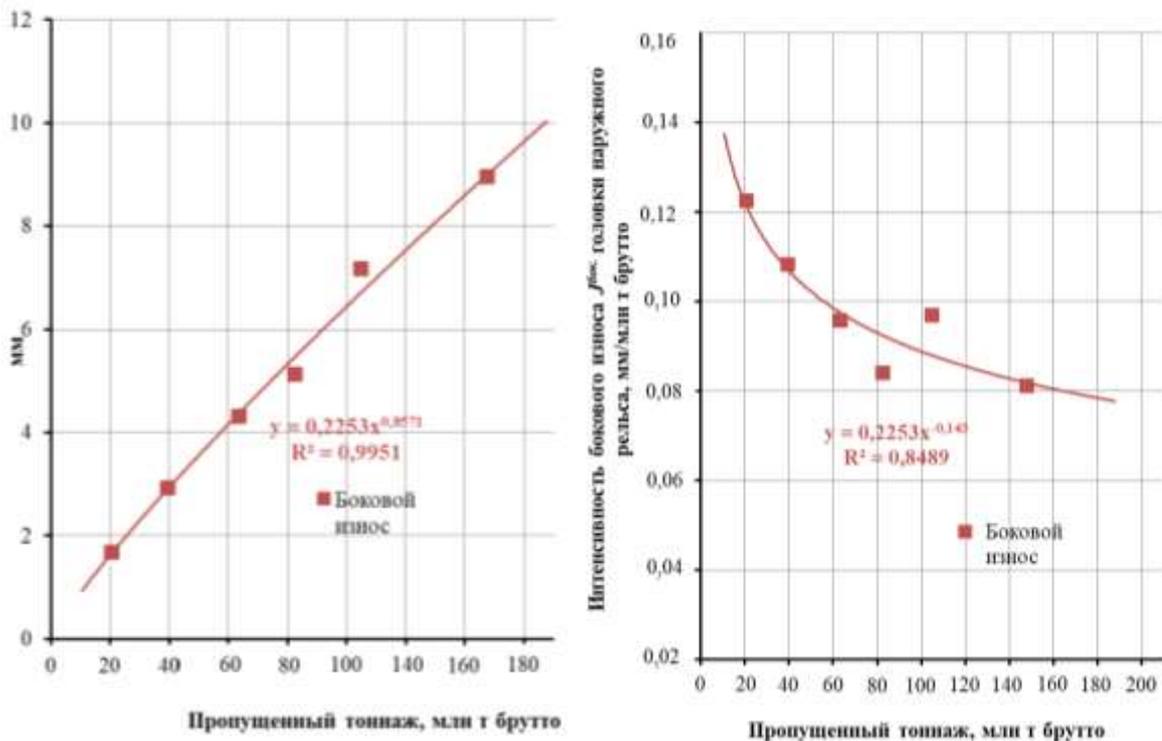


Рисунок 2.11– Зависимость изменения бокового износа головки наружного рельса в кривой R 493 м и интенсивность этих изменений по мере нарастания пропущенного тоннажа

При параметрах моделирования описанных выше было произведено численное моделирование движение грузового вагона с осевой нагрузкой 230 кН в круговой части кривой R 493 м со скоростью движения экипажа 50 км/ч. Для определения коэффициента износа рельсов ДТ350, от которого зависит боковой и вертикальный износ головки рельса, проведены многовариантные расчеты при постоянных значениях коэффициента скачка $k_\gamma = 12$ и критической плотности

мощности $P_{кр} = 30 \text{ Вт/мм}^2$. Результаты расчета представлены в таблице 2.2.

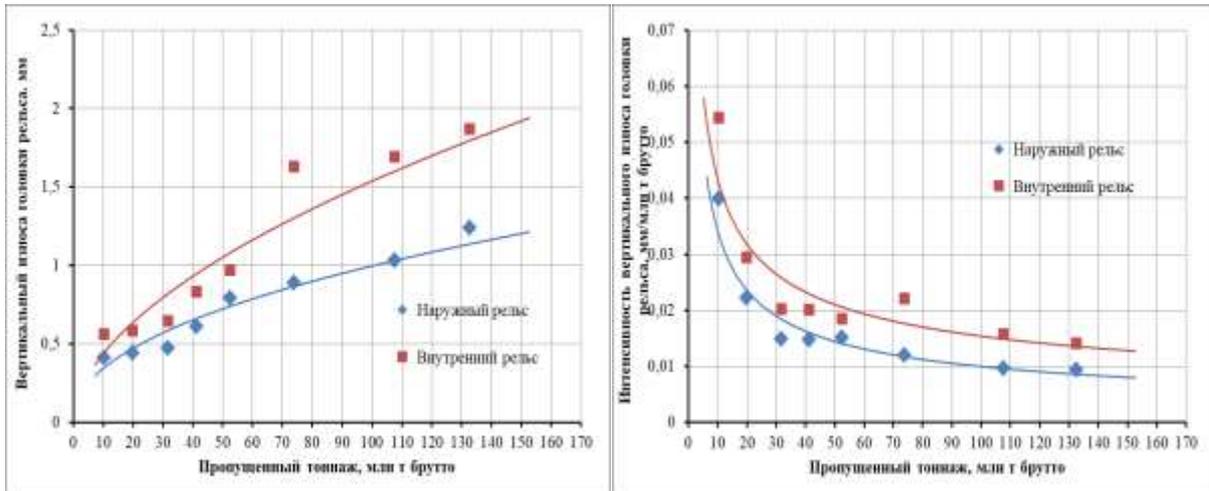


Рисунок 2.12 – Зависимости изменения вертикального износа поверхности катания на головке наружного и внутреннего рельсов в кривой $R 493 \text{ м}$ и их интенсивность износа от пропущенного тоннажа

Таблица 2.2 – Варианты расчёта и соответствующие параметры изнашивания для расчёта коэффициента износа рельсов ДТ350

Вариант расчёта, №	1	2	3	4	5	6
Коэффициент износа k_v	0.79E-13	2,23E-13	3,62E-13	5,04E-13	6.45,2E-13	0.79E-12
Критическая плотность мощности $P_{кр}$, Вт/мм ²	30					
Коэффициент скачка γ	12					

На рисунке 2.13 приведены результаты моделирования вертикального износа внутреннего рельса ДТ350 на внутренней нити кривой $R 493 \text{ м}$ для разных значений коэффициентов износа. Из графиков видны зависимости достижения вертикального износа внутреннего рельса 1,1 мм в кривом участке $R 493 \text{ м}$ от пропущенного тоннажа при различном значении коэффициента износа.

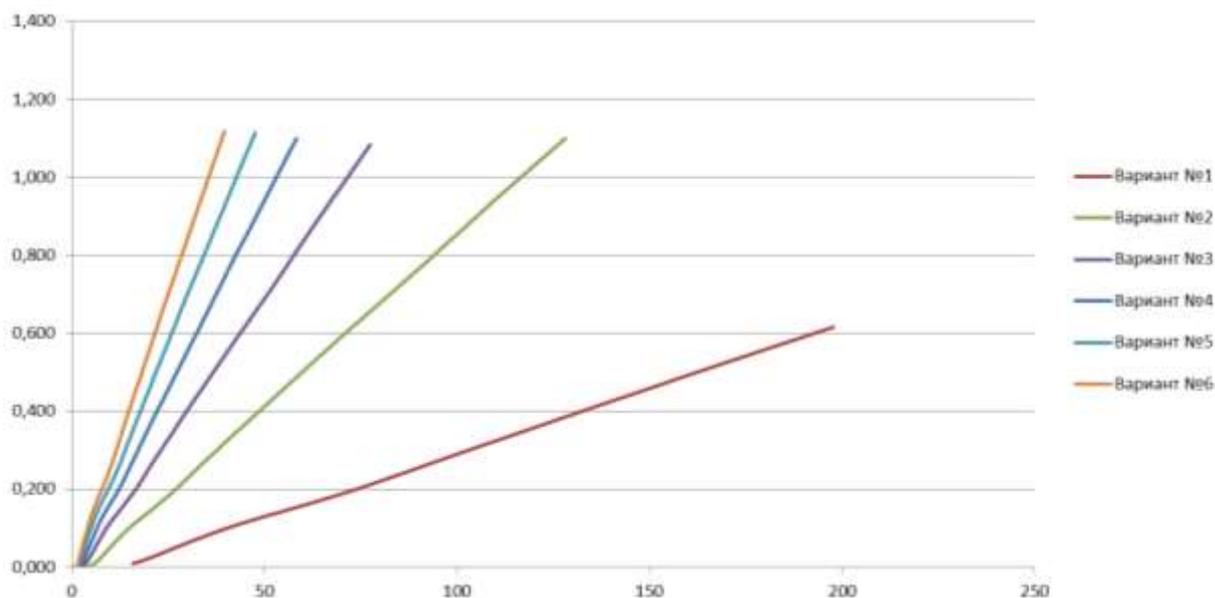


Рисунок 2.13 – Зависимость вертикального износа от пропущенного тоннажа при различных значениях коэффициентах износа

Из графиков видна существенная зависимость вертикального износа рельсов от коэффициента k_v , который характеризует их износостойкость.

На рисунке 2.14 показаны значения коэффициента износа и соответствующие ему значения пропущенного тоннажа, при которых вертикальный износ рельса достиг $I_B = 1,1$ мм. Выполнены расчеты линии тренда, описывающей зависимость пропущенного тоннажа до достижения вертикального износа рельса $I_B = 1,1$ мм от величины коэффициента износа k_v и соответствующая ей степенная функция с коэффициентом достоверности аппроксимации 0,999. С помощью степенной функции легко определить, что для достижения величины вертикального износа рельса 1,1 мм при пропущенном тоннаже 96 млн т брутто коэффициент износа должен быть равен $k_v = 2,57E-13$.

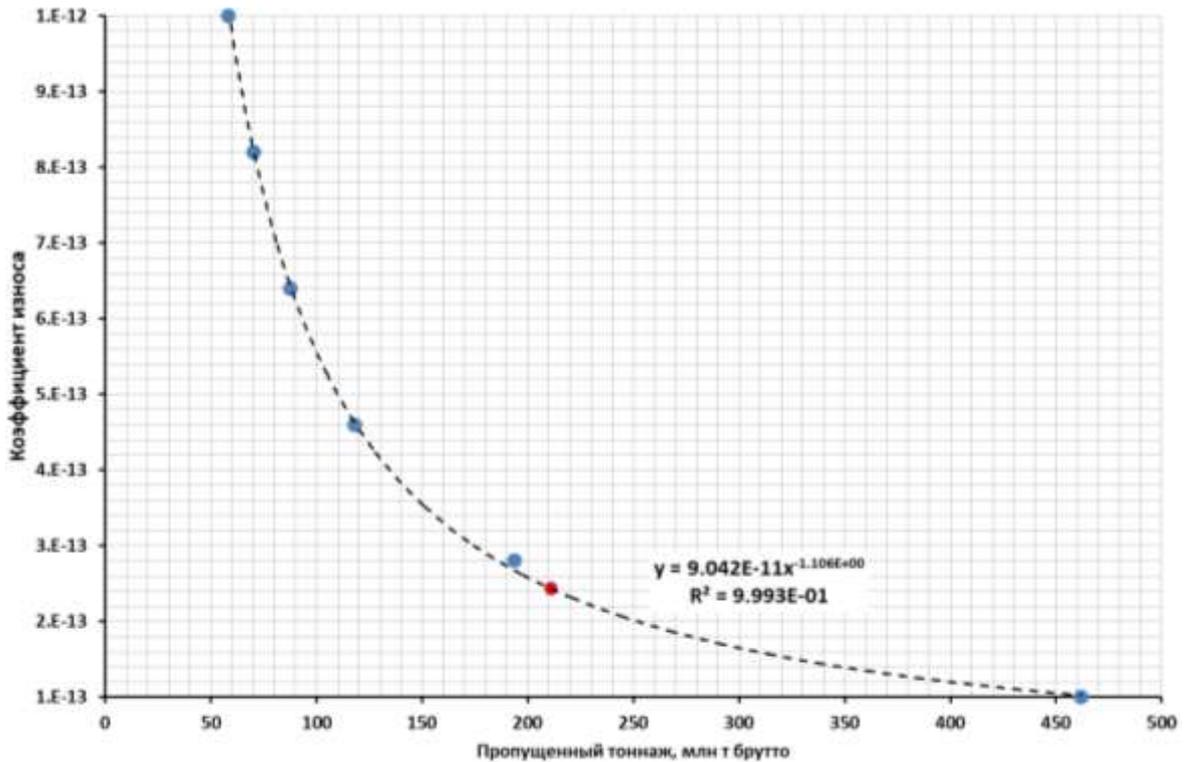


Рисунок 2.14 – Зависимость величин пропущенного тоннажа для достижения вертикального износа ($I_B = 1,1$ мм) от значения коэффициента износа

Для определения коэффициента скачка, от которого зависит боковой износ головки рельса, проведены многовариантные расчеты при постоянных коэффициенте износа $k_v = 2,57E-13$ и критической плотности мощности $P_{кр} = 30$ Вт/мм². Коэффициент скачка изменяется γ от 4 до 10.

В таблице 2.3 приведены варианты расчета и соответствующие ему параметры износа.

Таблица 2.3 – Варианты расчёта и соответствующие параметры изнашивания для расчета коэффициента скачка

Вариант расчёта, №	7	8	9	10
Коэффициент износа k_v	2,57E-13			
Критическая плотность мощности $P_{кр}$, Вт/мм ²	30			
Коэффициент скачка γ	4	6	8	10

Для верификации модели изнашивания экспериментальным и расчетным методом была определена величина пропущенного тоннажа до достижения рельсом предельного состояния по боковому износу.

На рисунке 2.15 приведены результаты моделирования, из которых видно как меняется зависимость бокового износа от пропущенного тоннажа при различном значении коэффициента скачка.

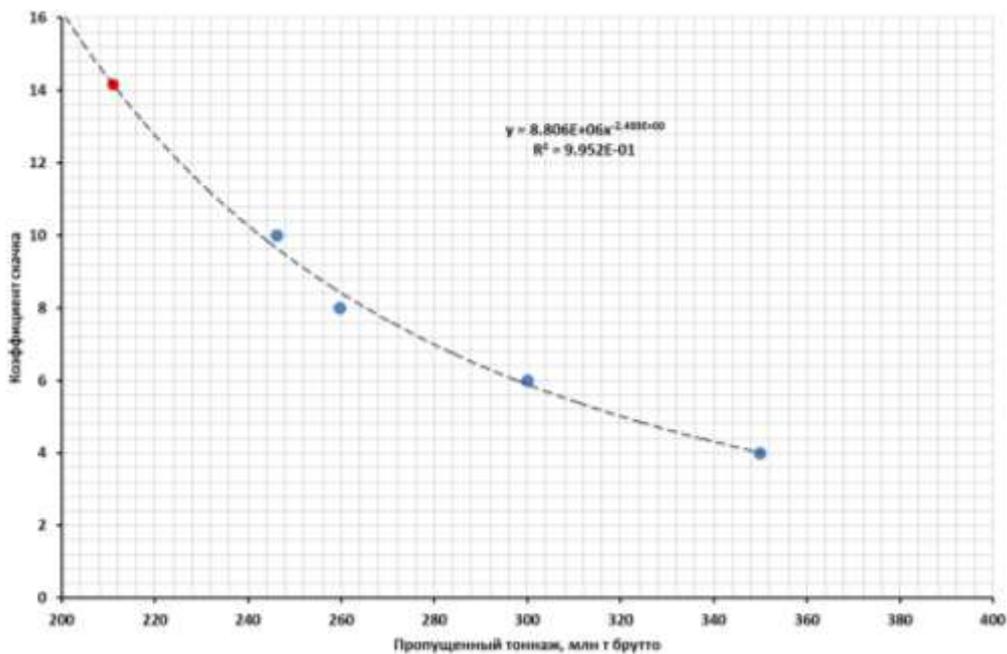


Рисунок 2.15 – Зависимость величин пропущенного тоннажа для достижения бокового износа $I_B = 16$ мм от значения коэффициента скачка

Таким образом, для проведения виртуальных экспериментов по изнашиванию рельсов разных категорий качества в разных условиях эксплуатации в качестве инструмента выбран программный комплекс «Универсальный механизм» с подключенными модулями UM Subsystems и UM Loco, а также входящий в него программный инструмент Rail Profile Wear Evolution.

Применительно к контакту «колесо – рельс» выбрана модель изнашивания Шпехта, в которой имеют место режимы умеренного и интенсивного износа с разными коэффициентами. Применительно к контакту «колесо – рельс» принимается, что на круге катания реализуется умеренный износ, а в гребневом

контакте интенсивный. При этом принимается линейное соотношение между объемом удаляемого материала и работой сил трения скольжения в контакте. Проведены экспериментальные измерения и получены величины бокового и вертикального износа рельсов ДТ350 в опытной кривой участка пути радиусами $R = 493$ м. Созданы математические модели, соответствующие натурным параметрам опытной кривой. Выполнены многовариантные расчеты процесса изнашивания в опытной кривой с учетом фактических типов и долей подвижного состава, курсирующего по рассматриваемой кривой. Методом подбора определены коэффициенты износа k_v и коэффициенты скачка k_γ для рельсов ДТ350 по модели изнашивания Шпехта. Полученные экспериментально-расчетным путем коэффициенты износа k_v и скачка k_γ для рельсов ДТ350 будут использоваться для расчета базовых интенсивностей бокового и вертикального износа рельсов.

2.4 Понятие базовой интенсивности износа

Базовые интенсивности бокового и вертикального износа рельсов

Для прогнозирования бокового и вертикального износа рельсов введено понятие – базовая интенсивность износа рельсов. «Базовая интенсивность износа» рельсов – это интенсивность бокового и вертикального износа наружного и вертикального износа внутреннего рельсов конкретной категории качества от воздействия конкретного типа подвижного состава при движении последнего с равновесной скоростью для кривого участка пути конкретного радиуса.

В качестве базовых выбраны:

- рельсы категории ДТ350 производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» как наиболее массово внедряемые на российских железных дорогах;
- грузовой полувагон на тележках 18-100;
- кривые участки пути радиусом $R = 300, R = 400, R = 500, R = 600$;

- продольный профиль пути с уклоном не более 5%;
- коэффициент трения между колесом и рельсом – 0,25;

В качестве базового рельса выбираем рельс ДТ350 производства «ЕВРАЗ ЗСМК» как наиболее внедряемый на железных дорогах ОАО «РЖД». Для рельсов категорий ДТ350 закрепленных к железобетонным шпалам с помощью скреплений ЖБР-65 определены базовые интенсивности износа от воздействия колес грузового полувагона с осевыми нагрузками 230 кН на тележках 18-100.

Для проведения расчетов по изнашиванию рельса экспериментально-расчетным методом [157] определены коэффициенты износа k_v , коэффициент скачка k_γ , критическая плотность мощности для рельсов категории ДТ350 (см. разд. 2.3). На основании полученных характеристик по модели Шпехта [161] путем моделирования процесса изнашивания определены «базовые интенсивности» износа рельсов ДТ350 для кривых радиусом R 300, R 400, R 500, R 600 м для равновесной скорости движения базовых вагонов.

На рисунке 2.16 представлены номограммы базовой интенсивности износа боковой грани наружного рельса ДТ350 при равновесной скорости движения базовых грузовых вагонов.

Из графиков для кривых участков пути с радиусами от 300 до 650 м определяется «базовая интенсивность» бокового износа рельсов в зависимости от величины возвышения наружного рельса при равновесной скорости движения подвижного состава.

Величины базовой интенсивности бокового износа наружного рельса категории ДТ350 от воздействия грузовых полувагонов на тележках 18-100 с осевой нагрузкой 230 кН представлены в таблице 2.4.

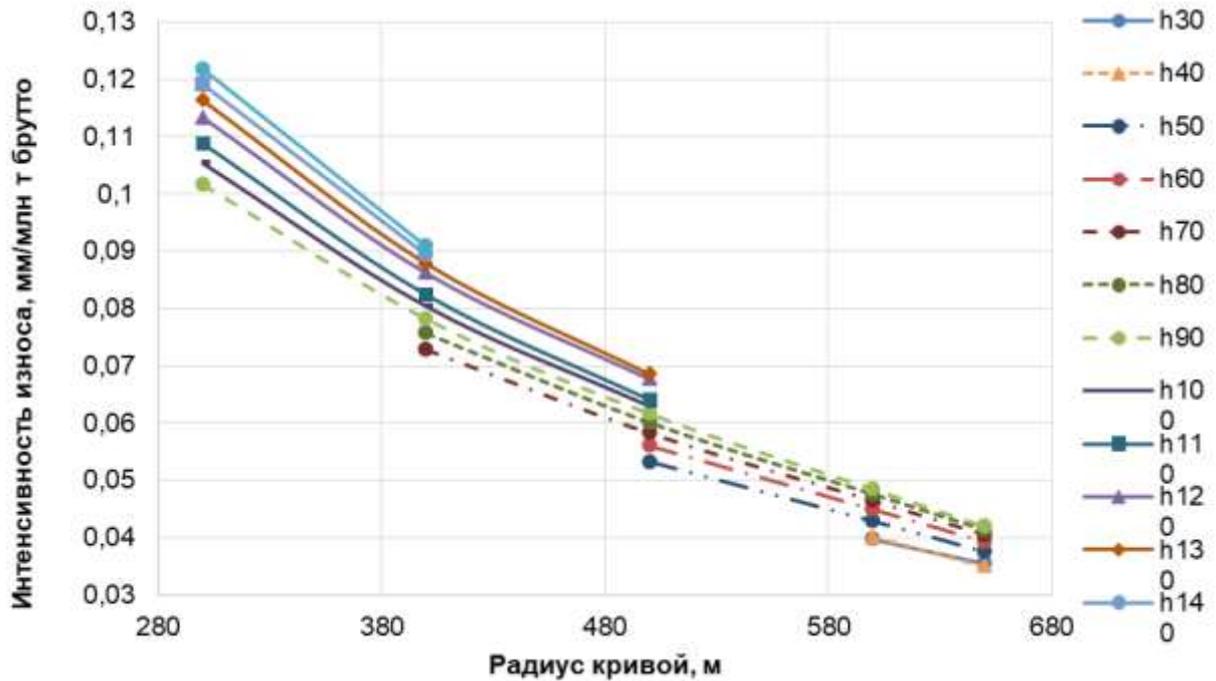


Рисунок 2.16 – Зависимости «базовой интенсивности» бокового износа рельсов ДТ350 от воздействия грузовых полувагонов на тележках 18-100 с осевой нагрузкой 230 кН

Таблица 2.4 – Величины базовой интенсивности бокового износа наружного рельса категории ДТ350 от радиуса кривой и величины возвышения наружного рельса

Возвышение рельса, мм	Радиус кривого участка пути, м				
	300	400	500	600	650
30	–	–	–	0,039673	0,035437
40	–	–	–	0,040074	0,034991
50	–	–	0,053253	0,042867	0,037517
60	–	–	0,055997	0,044904	0,039265
70	–	0,072808	0,058221	0,046424	0,040486
80	–	0,075639	0,060059	0,047566	0,041325
90	0,101638	0,078138	0,061604	0,048427	–
100	0,105345	0,080371	0,062918	–	–
110	0,108774	0,082386	0,064043	–	–
120	0,113319	0,086139	–	–	–
130	0,116314	0,08782	–	–	–
140	0,119134	–	–	–	–
150	0,121802	–	–	–	–

На рисунке 2.17 представлены зависимости базовой интенсивности вертикального износа наружного рельса для разных величин возвышения наружного

рельса при равновесной скорости движения.

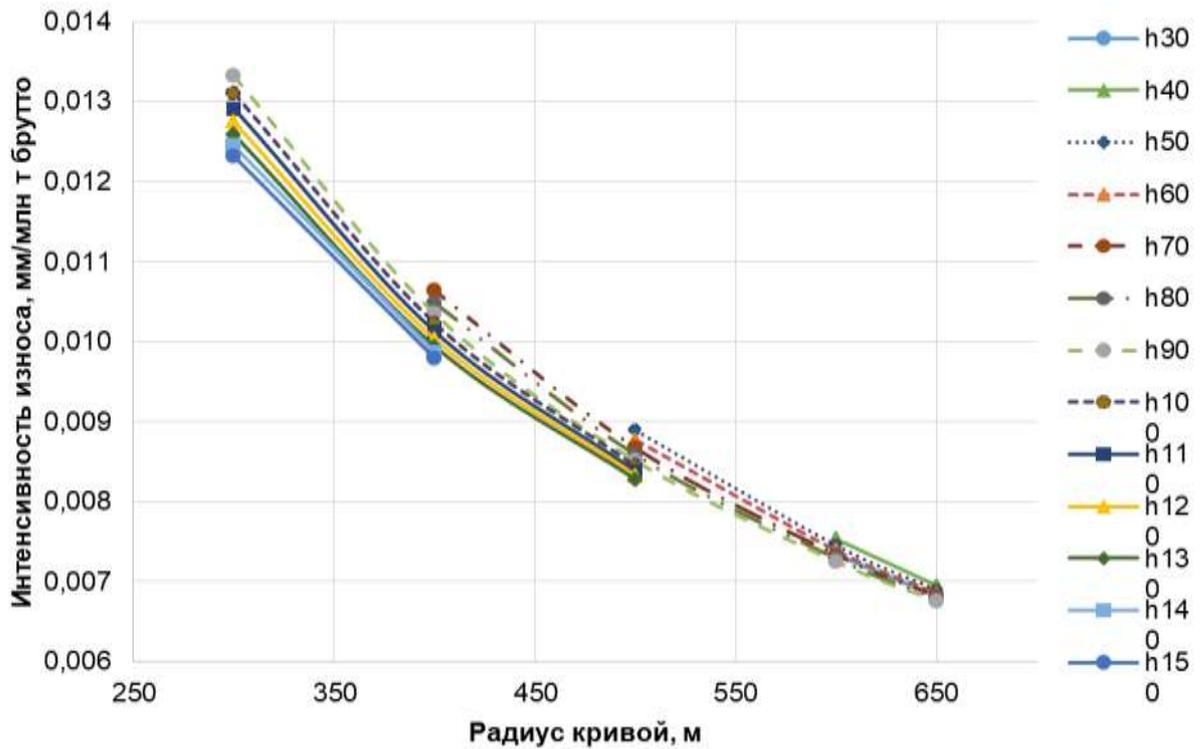


Рисунок 2.17 –Зависимости базовой интенсивности вертикального износа головки наружного рельса категории ДТ350 от воздействия грузовых полувагонов на тележках 18-100 с осевой нагрузкой 230 кН

Величины базовой интенсивности вертикального износа наружного рельса категории ДТ350 от воздействия грузовых полувагонов на тележках 18-100 с осевой нагрузкой 230 кН представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Величины базовой интенсивности бокового износа наружного рельса категории ДТ350 от радиуса кривой и величины возвышения наружного рельса

Возвышение рельса, мм	Радиус кривого участка пути, м				
	300	400	500	600	650
30	–	–	–	0,0076	0,0070
40	–	–	–	0,0075	0,0069
50	–	–	0,0089	0,0075	0,0069
60	–	–	0,0088	0,0074	0,0069
70	–	0,0106	0,0087	0,0073	0,0068
80	–	0,0105	0,0086	0,0073	0,0068
90	0,0133	0,0103	0,0085	0,0072	0,0068
100	0,0131	0,0102	0,0084	0,0072	–
110	0,0129	0,0101	0,0084	–	–
120	0,0127	0,0100	–	–	–
130	0,0126	0,0099	–	–	–
140	0,0124	–	–	–	–
150	0,0123	–	–	–	–

Из таблицы 2.5 для кривых участков пути с радиусами от 300 до 650м определяется базовая интенсивность вертикального износа наружного рельса в зависимости от величины его возвышения при равновесной скорости движения базового подвижного состава.

На рисунке 2.18 представлены зависимости базовой интенсивности вертикального износа внутреннего рельса для разных величин возвышения наружного рельса при равновесной скорости движения.

Величины базовой интенсивности вертикального износа внутреннего рельса категории качества ДТ350 от воздействия грузовых полувагонов на тележках 18-100 с осевой нагрузкой 230 кН при равновесной скорости движения представлены в таблице 2.6.

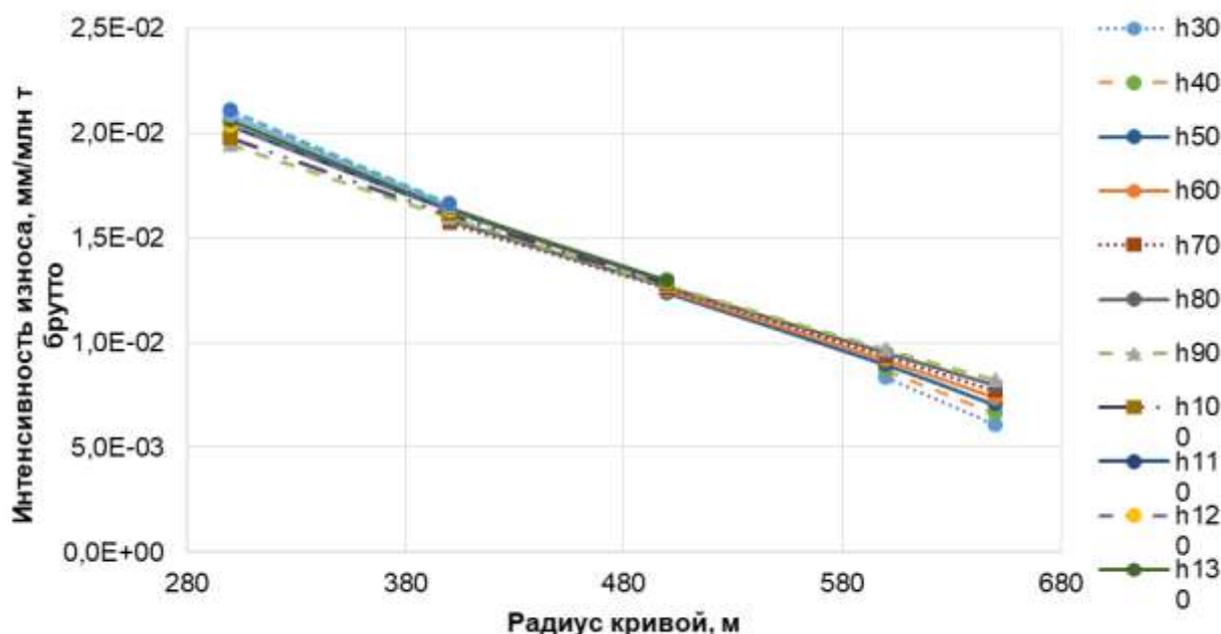


Рисунок 2.18 – Зависимости базовой интенсивности вертикального износа поверхности катания внутреннего рельса категории качества ДТ350 от воздействия грузовых полувагонов на тележках 18-100 с осевой нагрузкой 230 кН

Таблица 2.6 – Величины базовой интенсивности вертикального износа внутреннего рельса категории качества ДТ350 от радиуса кривой и величины возвышения наружного рельса кривой

Возвышение рельса, мм	Радиус кривого участка пути, м				
	300	400	500	600	650
30	–	–	–	0,0083	0,0061
40	–	–	–	0,0087	0,0066
50	–	–	0,0124	0,0089	0,0070
60	–	–	0,0125	0,0092	0,0074
70	–	0,0157	0,0126	0,0093	0,0077
80	–	0,0159	0,0127	0,0095	0,008
90	0,0195	0,0160	0,0127	0,0097	–
100	0,0198	0,0161	0,0128	–	–
110	0,0204	0,0163	0,0129	–	–
120	0,0204	0,0163	–	–	–
130	0,0206	0,0164	–	–	–
140	0,0209	–	–	–	–
150	0,0211	–	–	–	–

Из таблицы 2.6 для кривых участков пути с радиусами от 300 до 650м опре-

деляется базовая интенсивность вертикального износа поверхности катания внутреннего рельса категории ДТ350 от радиуса кривой и величины возвышения наружного рельса при равновесной скорости движения подвижного состава.

Для случая, когда радиус кривой занимает промежуточное значение, величина базовой интенсивности бокового и вертикального износа для фактического радиуса кривого участка пути определяется как:

$$J_{\text{пр}} = \frac{R_{\text{факт}} - R_{\text{min}}}{R_{\text{max}} - R_{\text{min}}} \cdot J_{R_{\text{min}}}^{\text{баз}}, \quad (2.9)$$

где $R_{\text{факт}}$ – фактический радиус кривого участка пути;

$R_{\text{min}}, R_{\text{max}}$ – минимальный и максимальный радиус кривых между которых находится значение радиуса рассматриваемой кривой;

$J_{R_{\text{min}}}^{\text{баз}}$ – базовая интенсивность износа для категории качества рельсов ДТ350 для кривой меньшего радиуса R_{min} при движении базового экипажа (полувагонов на тележках 18-100 с осевыми нагрузками 230 кН).

Представленные зависимости интенсивности бокового и вертикального износа рельсов справедливы лишь для ограниченных «базовых» условий. В эксплуатации имеет место широкий набор различных факторов, которые вносят в результаты расчета заметные коррективы.

Выводы по главе 2

1 На основании анализа ранее проведенных исследований разработаны структурная схема и аналитические выражения для прогнозирования бокового и вертикального износа рельсов для разных условий эксплуатации. Введено понятие «базовая интенсивность износа» рельсов. Базовая – это интенсивность бокового и вертикального износа соответствует интенсивности износа конкретных категорий рельсов от воздействия конкретного типа подвижного состава при движении последнего с равновесной скоростью для кривого участка пути конкретно-

го радиуса.

2 Для проведения виртуальных экспериментов по изнашиванию рельсов разных категорий качества в разных условиях эксплуатации в качестве инструмента выбран программный комплекс «Универсальный механизм» с подключенными модулями UM Subsystems и UM Loco, а также входящий в него программный инструмент Rail Profile Wear Evolution. Применительно к контакту «колесо – рельс» выбрана модель изнашивания Шпехта, в которой имеют место режимы умеренного и интенсивного износа с разными коэффициентами. Применительно к контакту «колесо – рельс» принято, что на круге катания реализуется умеренный износ, а в гребневом контакте – интенсивный. При этом принято линейное соотношение между объемом удаляемого материала и работой сил трения скольжения в контакте.

3 Определены параметры бокового и вертикального износа рельсов ДТ350 в опытном кривом участке пути радиусами R 493 м в зависимости от пропущенного тоннажа. Созданы компьютерные модели, соответствующие натурным параметрам опытной кривой. Выполнены многовариантные расчеты процесса изнашивания в опытных кривых с учетом фактических типов и долей подвижного состава, курсирующего по опытным кривым. Методом подбора определены коэффициенты износа k_v и коэффициенты скачка k_γ рельсов ДТ350 для модели изнашивания Шпехта. Полученные экспериментально-расчетным путем коэффициенты износа k_v и скачка k_γ для рельсов ДТ350 использованы для расчета базовых интенсивностей бокового и вертикального износа рельсов.

4 Путем проведения моделирования определены «базовые интенсивности» бокового и вертикального износа рельсов для кривых участков пути разных радиусов и возвышений наружного рельса.

ГЛАВА 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИЗНОС РЕЛЬСОВ В УСЛОВИЯХ
ЭКСПЛУАТАЦИИ3.1 Влияние категории качества рельсов на интенсивность их износа.
Нормативы интенсивности износа рельсов разных категорий качества

Исследования износостойкости рельсов разных категорий качества проводились специалистами ПКБ И, АО «ВНИИЖТ», службами пути железных дорог.

Выполнен анализ данных по исследованию износа рельсов современных категорий качества, полученных в разных условиях эксплуатации. В работе [15] приведены усредненные значения интенсивности разных категорий рельсов, зарегистрированные на Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской ДИ на примере двух кривых радиусом 293 и 298 метров в условиях подъема до 17,3 ‰, проанализирована продолжительность срока эксплуатации рельсовых плетей в указанных кривых по боковому износу.

В условиях грузонапряженности 123,5 и 134,1 млн т брутто в год интенсивность бокового износа рельсов ВС250Я производства фирмы NIPPON STEEL (Япония) составила 0,091 мм/млн т брутто. При повышении грузонапряженности до 135,8 млн т брутто в год интенсивность бокового износа на рельсах ДТ370ИК производства Новокузнецкого металлургического комбината составила 0,121 мм/млн т брутто. При грузонапряженности 134,1 и 135,8 млн т брутто в год интенсивность бокового износа объемно-закаленных рельсах Т1 составила 0,123 мм/млн т брутто. При грузонапряженности 156,4 млн т брутто в год на рельсах ДТ350 интенсивность бокового износа составила 0,126 мм/млн т брутто, на рельсах ДТ350НН – 0,129 мм/млн т брутто. В 2017 году при дальнейшем росте грузонапряженности с 156,4 до 171,3 млн т брутто в год наблюдался рост интенсивно-

сти бокового износа. Так на рельсах ДТ350 интенсивность бокового износа возросла с 0,126 мм/млн т брутто в 2016 году до 0,149 мм/млн т брутто в 2017 г. В 2018 г. произошел дальнейший рост грузонапряженности до 180 млн т брутто в год, что привело к увеличению интенсивности бокового износа до 0,160 мм/млн т брутто, что определило требование повторной замены рельсовых плетей в кривых участках пути в течение полугода. Выполненный сравнительный анализ показал, что интенсивность износа увеличивалась с ростом грузонапряженности.

Специалистами ПКБ И проведены наблюдения за интенсивностью бокового износа рельсов разных категорий качества – ДТ350, ДТ350У, ДТ370ИК, ВС250Я на перегонах Тягун – Аламбай, Издревая – Жеребцово Западно-Сибирской дирекции инфраструктуры в схожих условиях эксплуатации [14].

Анализ представленных экспериментальных данных показал, что анализируются интенсивности, характерные для периода после эксплуатационной приработки рельсов. Установлено, что имеются значительные отличия в величинах интенсивности изнашивания рельсов разных категорий качества в схожих условиях эксплуатации. Так, интенсивность бокового износа рельсов общего назначения после периода приработки 100 млн т брутто пропущенного тоннажа 0,85–0,91 мм/млн т брутто, при этом интенсивность бокового износа рельсов ДТ370ИК составила 0,78–0,8 мм/млн т брутто, что ниже на 8–12 %, рельсов ДТ 350У – 0,52–0,6 мм/млн т брутто, что ниже по сравнению с ДТ350 на 34–39 %. Наименьшая интенсивность наблюдалась на рельсах японского производства ВС250Я и составила 0,49–0,5 мм/млн т брутто, что ниже по сравнению с ДТ350 на 42–45 %.

В работах [15, 170] приведены результаты наблюдений за рельсами ДТ350 и ДТ350У на перегоне Бирюсинск – Тайшет Восточно-Сибирской ДИ, которые сварены методом чередования в круговой части кривой радиусом 414 м. Следует отметить, что интенсивность бокового износа на всех поочередно расположенных рельсах категорий ДТ350 и ДТ350У имела тенденцию к повышению от начала кривой по ходу движения подвижного состава: ДТ350 – 0,057 мм/млн т брутто, ДТ350У – 0,054 мм/млн т брутто, ДТ350 – 0,067 мм/млн т брутто, ДТ350У – 0,063

мм/млн т брутто, ДТ350 – 0,084 мм/млн т брутто, Определены средние значения интенсивности по первым четырем рельсам: ДТ350 – 0,062 мм/млн т брутто, ДТ350У – 0,0585 мм/млн т брутто, что показало преимущество рельсов ДТ350У на 5,6 %. Следует отметить, что при сравнении бокового износа рельсов в схожих условиях эксплуатации различие в интенсивности изнашивания рельсов ДТ350 и ДТ350У составило 34–39 %, что существенно отличается от результатов полученных методом чередования.

Сравнительный анализ износа рельсов в схожих условиях эксплуатации в кривых участках пути, где рельсы сварены методом чередования, проведен в условиях Слюдянской дистанции пути. Сравнительный анализ износа рельсов ДТ400ИК и ДТ350 сваренных методом чередования не позволил выявить устойчивые достоинства рельсов ДТ400ИК. При всех значениях пропущенного тоннажа наблюдалась тенденция к увеличению износа от начала круговой кривой по направлению движения поездов. Износ происходил неравномерно: в зонах сварных стыков – местах сопряжения рельсов ДТ400ИК и ДТ350 имел место минимальные значения износа. Износ возрастал до середины следующего вваренного рельса, после чего снижался. В наибольшей степени эта тенденция проявлялась на рельсах ДТ350. При пропущенном тоннаже 127 млн т брутто в конце круговой кривой боковой износ рельсов достиг предельного значения – 16 мм, как на рельсах ДТ350, так и на рельсах ДТ 400ИК. Если сравнивать два смежных участка ДТ400ИК и ДТ350 по ходу движения, то преимущество рельсов категории качества ДТ400ИК достигает 7...18 %. При сравнении двух участков с рельсами ДТ350, расположенных в начале кривой, и ДТ400ИК, расположенных в конце, преимущество ДТ400ИК отсутствует. Исходя из вышеизложенного, требуется доработка методики сравнения интенсивности износа рельсов разных категорий качества сваренных методом чередования.

Для исследования износа рельсов в условиях горно-перевального участка Восточно – Сибирской ДИ проведен анализ достижения рельсами предельного состояния по коду дефекта 44 в 29 кривых, расположенных на втором главном пути с 5225 по 5247 км перегона Большой Луг – Подкаменная за период с 2010

года по настоящее время.

Выполненный анализ интенсивности изнашивания рельсов Т1, ВС250Я, ДТ370ИК и ДТ350 в схожих условиях эксплуатации показал:

- в период 2011..2012 г.г. при грузонапряженности до 120 млн т брутто в год средние интенсивности износа для объемно-закаленных рельсов Т1 составила 0,1287...0,1292 мм/млн т брутто;

- на всех отечественных рельсах наблюдался значительный разброс интенсивностей износа в схожих условиях эксплуатации;

- наиболее стабильные результаты получены на рельсах ВС250Я – отклонения интенсивностей не превышало 0,011 мм/млн т брутто, в то время как на рельсах ДТ370ИК достигали 0,0371 мм/млн т брутто, на ДТ350 – 0,0258 мм/млн т брутто;

- не удалось установить связь интенсивности износа с климатическими факторами – укладка рельсов в зимний или летний периоды слабо коррелировалась с интенсивностью износа. При этом предполагалось, что при укладке рельсов в зимний период (наиболее интенсивного изнашивания) имеет место естественное смазывание за счет попадания снега в зону контакта колеса с рельсом.

На основании выполненного анализа сделано предположение, что причиной разброса в интенсивностях износа рельсов одинаковых категорий качества в схожих условиях эксплуатации могут являться:

- различия химического состава разных плавов в пределах допусков нормируемых ГОСТ 51685-2013 [10];

- различия в градиентах температур, возникающих в процессе термообработки рельсов;

- вариации скоростей и температур при прокатке рельсов, влияющих на фрагментирование структуры рельсовой стали.

Для экспериментального определения интенсивности изнашивания разных категорий рельсов в период 2020–2021 гг. в схожих условиях эксплуатации были проанализированы 65 кривых на II главном пути и 64 кривых на I главном пути на горно-перевальном участке Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской

ДИ.

Опытные участки были заложены на главных путях направления Иркутск – Чита Восточно-Сибирской ДИ, на перегонах: Подкаменная – Глубокая, Глубокая – Андриановская, Андриановская – Ангосолка, Ангосолка – Слюдянка-2. Акты закладки опытных участков представлены в Приложении 1.

Анализ опытных данных износа боковой поверхности рельсов ДТ350, ДТ370ИК, ДТ400ИК в кривых участках пути радиусами R 300 м (от 298–308 м) на подъемах с приведенными уклонами 6,7–8,7 ‰ показал:

- интенсивность износа рельсов является функцией, зависящей от пропущенного тоннажа и категории качества рельсов. Наибольшее значение интенсивности бокового износа наблюдается в начальный период эксплуатации рельсов и постепенно снижается по зависимости, описываемой степенной функцией, которая асимптотически приближается к предельному минимальному значению интенсивности. Это характерно для каждой категории рельсов;

- интенсивность износа рельсов зависит от категории качества рельсов. Сравнительный анализ показал, что интенсивность износа рельсов специального назначения ДТ370ИК ниже ДТ350 на 5...7 ‰. Наименьшее значение интенсивности износа зафиксировано на рельсах ДТ400ИК, которое ниже интенсивности рельсов ДТ350 на 12–14 ‰.

Анализ опытных данных износа боковой поверхности головки рельсов ДТ350, ДТ370ИК, ДТ400ИК в кривых участках пути радиусами R 300 м (от 298–308 м) на подъемах с приведенными уклонами 15,5–17,7‰ от пропущенного тоннажа показал:

- зависимости изменения интенсивности износа рельсов в кривых участках пути на уклонах продольного профиля пути сохраняют тенденции характерные для участков расположенных на площадках и описываются степенными функциями, которые асимптотически приближаются к предельному минимальному значению интенсивности. При этом наблюдается более интенсивное снижение износа, что указывает на более быструю приработку рельсов на подъемах с большими

уклонами. Это характерно для каждой категории рельсов;

- интенсивность износа рельсов зависит от категории качества рельсов.

Так сравнительный анализ интенсивностей износа рельсов показал, что наименьшее значение интенсивности износа зафиксировано на рельсах ДТ 400ИК, которое ниже интенсивности рельсов ДТ350 на 15...17 % и ДТ370ИК на 10... 12 %.

Из выполненного анализа интенсивности бокового и вертикального износа рельсов сформулированы несколько понятий интенсивностей износа рельсов:

Текущая интенсивность представляет функциональную зависимость износа от пропущенного тоннажа и является важной характеристикой при прогнозировании износа рельсов.

Предельная минимальная интенсивность – минимальная интенсивность к которой стремится степенная функция износа после периода приработки рельсов в пути.

Усредненная интенсивность – интенсивность изнашивания рельсов, которая определяется как отношение предельного износа к пропущенному тоннажу. Данная интенсивность износа имеет значительный разброс, так как жизненный цикл рельсов в определенных условиях эксплуатации заканчивается по достижению предельного состояния в период приработки рельсов при высоких показателях интенсивности износа.

На основании проведенного анализа износа рельсов по данным, полученными специалистами ПКБ И, АО «ВНИИЖТ», АО «ВНИКТИ», специалистами Дирекций инфраструктуры железных дорог получены коэффициенты, увязывающие износостойкость рельсов разных категорий качества. Значения коэффициентов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Коэффициенты увязывающие износостойкость рельсов разных категорий качества

Рельсы разных категорий качества							
ДТ350	ДТ350 (ЧМК)	ДТ350 У	ДТ350 НН	ДТ400 ИК	Т1	ВС250* Я	ДТ370 ИК
1	1,06	0,94	1,023	0,84	0,97	0,72	0,94

Значения предельной интенсивности бокового износа рельсов для рельсов разных категорий качества для базовых условий эксплуатации представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Интенсивность бокового износа рельсов разных категорий качества в кривых разных радиусов при базовых условиях эксплуатации

Возвышен ие наружно- го рельса, мм	Категория качества рельсов						
	ДТ350	ДТ350 (ЧМК)	ДТ350НН	ДТ400ИК	Т1	ВС250Я	ДТ370И К
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Кривой участок пути R = 300 м</i>							
90	0,101638	0,1077	0,1040	0,0854	0,0986	0,0732	0,0955
100	0,105345	0,1117	0,1078	0,0885	0,1022	0,0758	0,0990
110	0,108774	0,1153	0,1113	0,0914	0,1055	0,0783	0,1022
120	0,113319	0,1201	0,1159	0,0952	0,1099	0,0816	0,1065
130	0,116314	0,1233	0,1190	0,0977	0,1128	0,0837	0,1093
140	0,119134	0,1263	0,1219	0,1001	0,1156	0,0858	0,1120
150	0,121802	0,1291	0,1246	0,1023	0,1181	0,0877	0,1145
<i>Кривой участок пути R = 400 м</i>							
70	0,072808	0,0772	0,0745	0,0612	0,0706	0,0524	0,0684
80	0,075600	0,0802	0,0774	0,0635	0,0734	0,0545	0,0711
90	0,078138	0,0828	0,0799	0,0656	0,0758	0,0563	0,0734
1	2	3	4	5	6	7	8
100	0,080371	0,0852	0,0822	0,0675	0,0780	0,0579	0,0755
110	0,082386	0,0873	0,0843	0,0692	0,0799	0,0593	0,0774
1	2	3	4	5	6	7	8
120	0,086139	0,0913	0,0881	0,0724	0,0836	0,0620	0,0810
130	0,087820	0,0931	0,0898	0,0738	0,0852	0,0632	0,0826
<i>Кривой участок пути R = 500 м</i>							
50	0,053253	0,0564	0,0545	0,0447	0,0517	0,0383	0,0501
60	0,055997	0,0594	0,0573	0,0470	0,0543	0,0403	0,0526
70	0,058221	0,0617	0,0596	0,0489	0,0565	0,0419	0,0547
80	0,060059	0,0637	0,0614	0,0504	0,0583	0,0432	0,0565
90	0,061604	0,0653	0,0630	0,0517	0,0598	0,0444	0,0579
100	0,062918	0,0667	0,0644	0,0529	0,0610	0,0453	0,0591
110	0,064043	0,0679	0,0655	0,0538	0,0621	0,0461	0,0602

Значения предельной интенсивности вертикального износа наружных рельсов для рельсов разных категорий качества для базовых условий эксплуатации представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. Интенсивность вертикального износа наружных рельсов разных категорий качества в кривых разных радиусов при базовых условиях эксплуатации

Возвышение наружного рельса, мм	Категория качества рельсов						
	ДТ350	ДТ350 (ЧМК)	ДТ350НН	ДТ400ИК	Т1	ВС250Я	ДТ370ИК
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Кривой участок пути R = 300 м</i>							
90	0,0133	0,0141	0,0136	0,0112	0,0129	0,0096	0,0125
100	0,0131	0,0139	0,0134	0,0110	0,0127	0,0094	0,0123
110	0,0129	0,0137	0,0132	0,0108	0,0125	0,0093	0,0121
120	0,0127	0,0135	0,0130	0,0107	0,0123	0,0091	0,0119
130	0,0126	0,0134	0,0129	0,0106	0,0122	0,0091	0,0118
140	0,0124	0,0131	0,0127	0,0104	0,0120	0,0089	0,0117
150	0,0123	0,0130	0,0126	0,0103	0,0119	0,0089	0,0116
<i>Кривой участок пути R = 400 м</i>							
70	0,0106	0,0112	0,0108	0,0089	0,0103	0,0076	0,0100
80	0,0105	0,0111	0,0107	0,0088	0,0102	0,0076	0,0099
90	0,0103	0,0109	0,0105	0,0087	0,0100	0,0074	0,0097
100	0,0102	0,0108	0,0104	0,0086	0,0099	0,0073	0,0096
110	0,0101	0,0107	0,0103	0,0085	0,0098	0,0073	0,0095
120	0,0100	0,0106	0,0102	0,0084	0,0097	0,0072	0,0094
130	0,0099	0,0105	0,0101	0,0083	0,0096	0,0071	0,0093
<i>Кривой участок пути R = 500 м</i>							
50	0,0089	0,0094	0,0091	0,0075	0,0086	0,0064	0,0084
60	0,0088	0,0093	0,0090	0,0074	0,0085	0,0063	0,0083
70	0,0087	0,0092	0,0089	0,0073	0,0084	0,0063	0,0082
80	0,0086	0,0091	0,0088	0,0072	0,0083	0,0062	0,0081
90	0,0085	0,0090	0,0087	0,0071	0,0082	0,0061	0,0080
100	0,0084	0,0089	0,0086	0,0071	0,0081	0,0060	0,0079
110	0,0084	0,0089	0,0086	0,0071	0,0081	0,0060	0,0079
<i>Кривой участок пути R = 600 м</i>							
30	0,0076	0,0081	0,0078	0,0064	0,0074	0,0055	0,0071
1	2	3	4	5	6	7	8
40	0,0075	0,0080	0,0077	0,0063	0,0073	0,0054	0,0071
50	0,0075	0,0080	0,0077	0,0063	0,0073	0,0054	0,0071
60	0,0074	0,0078	0,0076	0,0062	0,0072	0,0053	0,0070
1	2	3	4	5	6	7	8
70	0,0073	0,0077	0,0075	0,0061	0,0071	0,0053	0,0069
80	0,0073	0,0077	0,0075	0,0061	0,0071	0,0053	0,0069
90	0,0072	0,0076	0,0074	0,0060	0,0070	0,0052	0,0068
100	0,0072	0,0076	0,0074	0,0060	0,0070	0,0052	0,0068
<i>Кривой участок пути R = 650 м</i>							
30	0,0070	0,0074	0,0072	0,0059	0,0068	0,0050	0,0066
40	0,0069	0,0073	0,0071	0,0058	0,0067	0,0050	0,0065
50	0,0069	0,0073	0,0071	0,0058	0,0067	0,0050	0,0065
60	0,0069	0,0073	0,0071	0,0058	0,0067	0,0050	0,0065
70	0,0068	0,0072	0,0070	0,0057	0,0066	0,0049	0,0064
80	0,0068	0,0072	0,0070	0,0057	0,0066	0,0049	0,0064
90	0,0068	0,0072	0,0070	0,0057	0,0066	0,0049	0,0064

Значения предельной интенсивности вертикального износа внутренних рельсов разных категорий качества для базовых условий эксплуатации представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Интенсивность вертикального износа внутренних рельсов разных категорий качества в кривых разных радиусов при базовых условиях эксплуатации

Возвышение наружного рельса, мм	Категория качества рельсов						
	ДТ350	ДТ350 (ЧМК)	ДТ350НН	ДТ400ИК	Т1	ВС250Я	ДТ370ИК
1	2	3	4	5	6	7	8
<i>Кривой участок пути R = 300 м</i>							
90	0,0195	0,0206	0,0199	0,0163	0,0189	0,01401	0,0183
100	0,0198	0,0210	0,0202	0,0166	0,0192	0,01424	0,0186
110	0,0204	0,0216	0,0208	0,0171	0,0197	0,01466	0,0191
120	0,0204	0,0216	0,0208	0,0171	0,0197	0,01466	0,0191
130	0,0206	0,0219	0,0211	0,0173	0,0200	0,01484	0,0194
140	0,0209	0,0221	0,0213	0,0175	0,0202	0,01502	0,0196
150	0,0211	0,0224	0,0216	0,0177	0,0205	0,01518	0,0198
<i>Кривой участок пути R = 400 м</i>							
70	0,0157	0,0166	0,0161	0,0132	0,0152	0,0113	0,0147
80	0,0159	0,0168	0,0162	0,0133	0,0154	0,0114	0,0149
90	0,0160	0,0170	0,0164	0,0134	0,0155	0,0115	0,0150
100	0,0161	0,0171	0,0165	0,0135	0,0156	0,0116	0,0152
110	0,0163	0,0173	0,0167	0,0137	0,0159	0,0118	0,0154
120	0,0163	0,0173	0,0167	0,0137	0,0159	0,0118	0,0154
130	0,0164	0,0174	0,0168	0,0138	0,0160	0,0118	0,0155
<i>Кривой участок пути R = 500 м</i>							
50	0,0124	0,0131	0,0127	0,0104	0,0120	0,0089	0,0116
60	0,0125	0,0132	0,0128	0,0105	0,0121	0,0090	0,0117
70	0,0126	0,0133	0,0129	0,0106	0,0122	0,0091	0,0118
80	0,0127	0,0134	0,0130	0,0106	0,0123	0,0091	0,0119
90	0,0127	0,0135	0,0130	0,0107	0,0124	0,0092	0,0120
1	2	3	4	5	6	7	8
100	0,0128	0,0136	0,0131	0,0107	0,0124	0,0092	0,0120
110	0,0129	0,0137	0,0132	0,0108	0,0125	0,0093	0,0121
<i>Кривой участок пути R = 600 м</i>							
30	0,0083	0,0088	0,0085	0,0070	0,0081	0,0060	0,0078
1	2	3	4	5	6	7	8
40	0,0087	0,0092	0,0089	0,0073	0,0084	0,0062	0,0081
50	0,0089	0,0095	0,0091	0,0075	0,0087	0,0064	0,0084
60	0,0092	0,0097	0,0094	0,0077	0,0089	0,0066	0,0086
70	0,0093	0,0099	0,0096	0,0079	0,0091	0,0067	0,0088
80	0,0095	0,0101	0,0097	0,0080	0,0092	0,0069	0,0089
90	0,0097	0,0103	0,0099	0,0081	0,0094	0,0070	0,0091
<i>Кривой участок пути R = 650 м</i>							
30	0,0061	0,0064	0,0062	0,0051	0,0059	0,0044	0,0057
40	0,0066	0,0070	0,0068	0,0055	0,0064	0,0048	0,0062
50	0,0070	0,0074	0,0072	0,0059	0,0068	0,0051	0,0066
60	0,0074	0,0078	0,0075	0,0062	0,0072	0,0053	0,0069
70	0,0077	0,0081	0,0079	0,0065	0,0075	0,0055	0,0072
80	0,0080	0,0084	0,0081	0,0067	0,0077	0,0057	0,0075

Данные интенсивности предложены как *нормативы интенсивности износа рельсов различных категорий качества для базовых условий эксплуатации*. Для

получения фактических интенсивностей износа должны быть учтены конкретные условия эксплуатации с использованием функциональных коэффициентов.

Выполненный анализ интенсивности износа рельсов разных категорий качества показал:

- интенсивность бокового и вертикального износа рельсов является величиной не постоянной, а функционально зависящей от пропущенного тоннажа;

- зависимость интенсивности износа от пропущенного тоннажа описывается степенной функцией;

- определены базовые интенсивности износа рельсов разных категорий качества для базовых условий эксплуатации.

Представленные предельные интенсивности износа рельсов разных категорий качества рассматриваются как базовые, которые требуют корректировки посредством введенных корректирующих функциональных коэффициентов.

Для получения фактических интенсивностей износа должны быть учтены конкретные условия эксплуатации с использованием функциональных коэффициентов.

В эксплуатации имеет место широкий набор различных факторов, которые вносят в результаты расчета заметные коррективы. К факторам, оказывающим значительное влияние на износ рельсов можно отнести – лубрикацию рельсов, величину непогашенного ускорения, конструкции экипажных частей и осевые нагрузки, продольный профиль пути и массы поездов, подуклонка рельсов, типы применяемых промежуточных рельсовых скреплений и др. Ниже приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по определению количественных значений функциональных коэффициентов для разных факторов, оказывающий влияние на износ рельсов:

- конструкции экипажных частей и осевые нагрузки от подвижного состава;
- лубрикация рельсов и тип смазки;
- возвышение наружного рельса, фактические скорости движения, величины непогашенного ускорения;

- уклон продольного профиля пути и массы курсирующих поездов;
- подуклонка рельсов;
- поперечная и вертикальная жесткость пути, определяемая конструкцией промежуточных рельсовых скреплений.

3.2 Влияние конструкции экипажных частей и осевых нагрузок подвижного состава на интенсивности износа рельсов

Многообразие подвижного состава, который эксплуатируется на российских железных дорогах, определило разнообразие конструкций экипажей подвижного состава. Разные базы и конструкции тележек подвижного состава приводят к различиям при вписывании их в кривые участки пути, определяя разницу в уровнях боковых сил [171,172]. На уровне силового воздействия от колес подвижного состава на рельсы оказывают величины осевых нагрузок. Величины боковых и вертикальных сил от колес подвижного состава на рельсы определяют работу сил трения и соответственно величины их износа.

Экспериментальные значения вертикальных и боковых сил, действующих на наружный и внутренний рельсы от разных типов грузовых, пассажирских вагонов и локомотивов, позволяют привести силовое воздействие на рельсы от разных типов подвижного состава к воздействию от колес базового вагона посредством коэффициентов приведения. Для использования этих данных в расчетах износа рельсов согласно [173–175] принято, что работа сил трения пропорциональна средним значениям боковых и вертикальных сил, действующих на рельсы от колес подвижного состава.

В условиях горно-перевального участка Слюдянской дистанции пути направления Иркутск – Чита имеется значительное количество кривых участков малого $R < 350$ м и среднего радиусов $350 \text{ м} < R < 650$ м, расположенных на подъемах и спусках. Сложный продольный и поперечный профиль пути

накладывает определенные особенности по воздействию колес подвижного состава на рельсы в кривых участках в режимах торможения на спусках и в режимах двойной тяги (с использованием толкачей) на подъемах. Это определяет особенности по воздействию на путь подвижного состава в кривых участках пути и интенсивное изнашивание рельсов.

Для определения воздействия на путь от колес эксплуатируемого подвижного состава на II главном пути выбраны четыре опытных участка: два в кривых радиусом R 300 м на подъемах и спусках с уклонами от 16 до 18 ‰, два в кривых радиусом R 600 м на подъемах и спусках с уклонами от 16 до 18 ‰ (Приложения 1).

II главный путь имеет следующие эксплуатационные характеристики:

- 1) класс и специализация линии, класс и код группы пути на 01.01.2021: от 5225 до 5313 км – 1О/2О, с грузонапряженностью – 169,6 млн т брутто/1 км в год;
- 2) суточный пакет поездов на этих участках: грузовых – 85, пассажирских – 6, мотор-вагонных – 2;
- 3) установленная скорость движения по участку – 70/60 км/ч;
- 4) средняя техническая скорость движения по участку: грузовых поездов – 43 км/ч, пассажирских – 46 км/ч;
- 5) средняя осевая нагрузка – 178,9 кН, от груженых грузовых вагонов – 224 кН, от порожних грузовых вагонов – 61,1 кН, от пассажирских – 190,7 кН, от локомотивов – 230 кН;
- 6) путь – бесстыковой из рельсов типа Р65 первой группы, сваренных в плети;
- 7) шпалы – железобетонные 1 срока службы, установлены с эпюрой от 1988 до 2000 шт. на 1 км пути;
- 8) балласт – щебеночный фракцией 25–60 мм, толщина балластной призмы 35–50 см, плечо призмы – 40–50 см.

На смежных участках измерительными датчиками и приборами оборудовался II и I главный путь (Приложение 1).

Для установления силового воздействия эксплуатирующего подвижного

состава на рельсы в условиях горно-перевального участка Глубокая – Подкаменная – Ангасолка – Слюдянка-2 специалистами АО «ВНИКТИ» и Слюдянской дистанции пути проведены испытания по воздействию на путь [171]. Протокол испытаний представлен в Приложении 2.

Опытные участки заложены в кривых для определения силового воздействия на рельсы от колес подвижного состава и проведения мониторинга износа рельсов. Основным отличительным параметром опытных участков являлся радиус кривой и уклон пути. На опытных участках пути проводилось оборудование наружного и внутреннего рельсов измерительными датчиками и приборами. Схема оборудования представлена на рисунке 3.1.

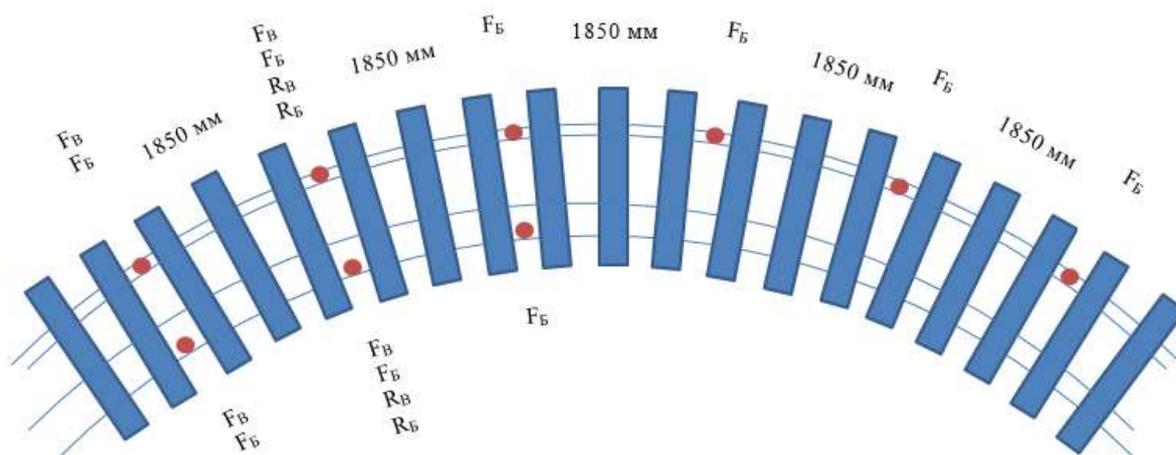


Рисунок 3.1– Схема оборудования пути: $F_{в}$ – вертикальные силы; $F_{б}$ – боковые силы; $R_{в}$ – вертикальный прогиб рельса; $R_{б}$ – боковое отжатие головки рельса

Для измерения боковых и вертикальных сил, в соответствии со схемой оборудования пути на шейку рельса наклеивались тензорезисторы по методу Шлюмпфа в соответствии с ГОСТ Р 55050-2012 [28] (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Общий вид наклейки тензорезисторов на шейке рельса в измерительном сечении

Пример осциллограммы боковых сил от колес локомотива и платформ для перевозки контейнеров представлена на рисунке 3.3.

По результатам обработки полученных данных проведена статистическая обработка боковых и вертикальных сил, действующих на наружный и внутренний рельсы от поездов, сформированных из вагонов-цистерн, полувагонов, контейнеровозов и др.

На рисунке 3.4 представлены распределения вертикальных и боковых сил, воздействующих на наружный и внутренний рельс от колес полувагонов с осевыми нагрузками 245 кН при движении в кривом участке пути радиусом R 298 м на спуске с уклоном 16,2 ‰. В таблице 3.1 приведены статистические показатели для полученных сил.

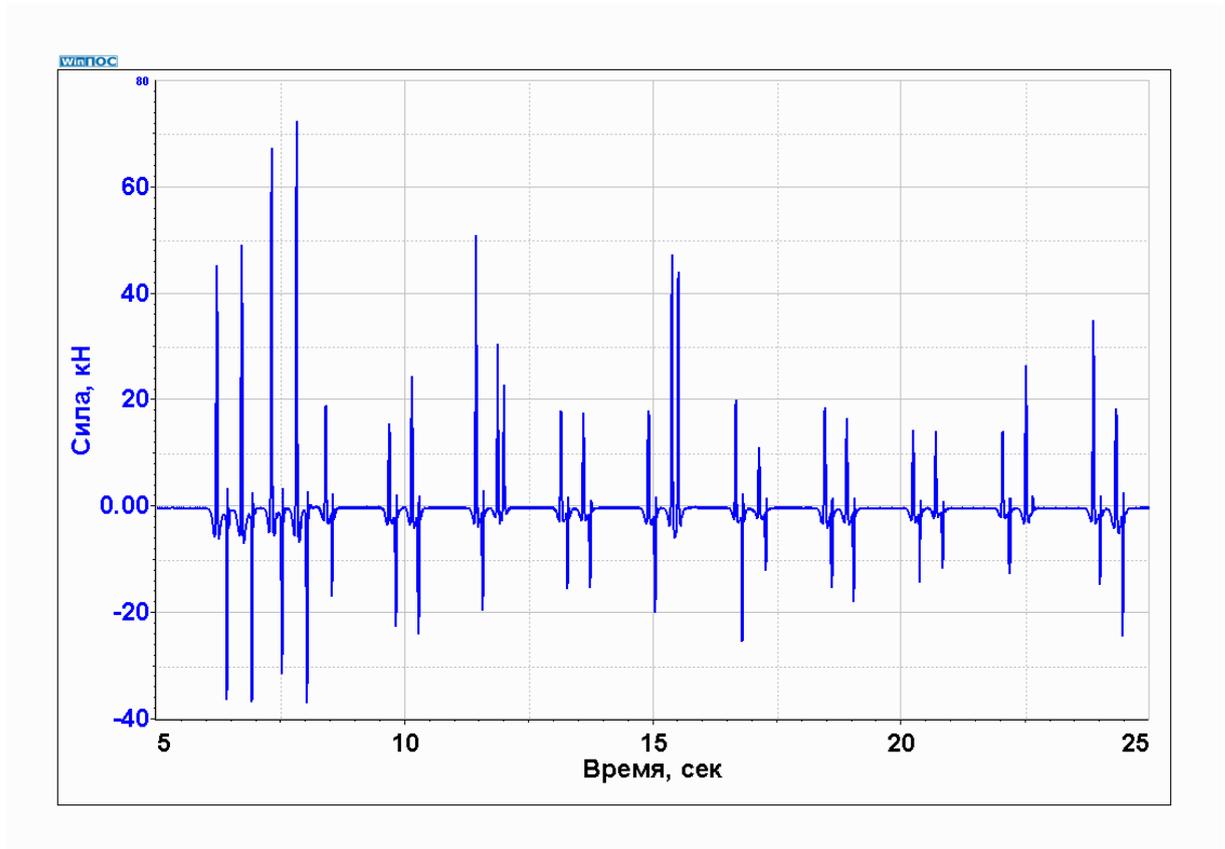
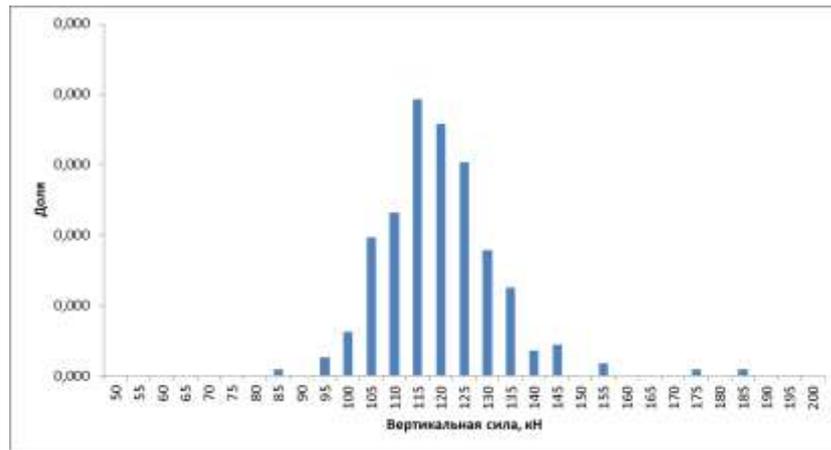


Рисунок 3.3 – Пример оциллограммы боковых сил от воздействия колес локомотива 3ЭС5К в голове поезда и от платформ контейнеровоза

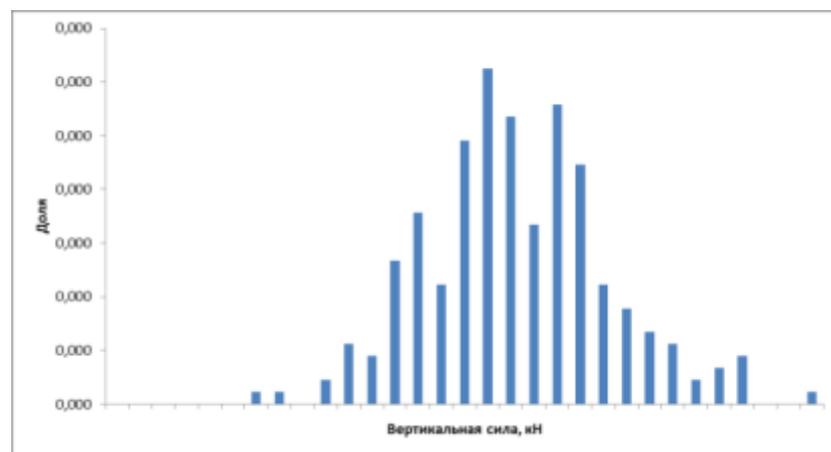
Таблица 3.1– Статистические показатели сил, воздействующих на наружный и внутренний рельс от колес полувагонов с осевыми нагрузками 245 кН при движении в кривом участке пути радиусом R 298 м на спуске с уклоном 16,2 ‰

Параметр	Вертикальная сила, кН		Боковая сила, кН
	Наружный рельс	Внутренний Рельс	Наружный рельс
Среднее, $F_{\text{ср}}$	117,2	133,5	47,6
Стандартное отклонение, σ	12,2	19,9	9,8
Максимальное вероятное значение*, F_{max}	147,7	183,3	72,1

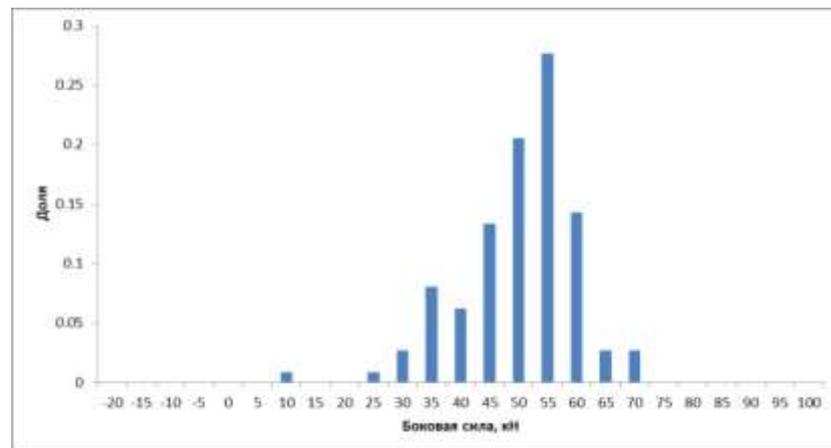
* В соответствии с ГОСТ Р 55050-2012 [37] максимальное вероятное значение определяется с вероятностью 0,994 по экспериментальным рядам распределения, выровненным теоретическими законами распределения Гаусса или Эрмита — Чебышева, следовательно $F_{\text{max}}=F_{\text{ср}}+2,5\sigma$.



а)



б)



в)

Рисунок 3.4 – Распределения вертикальных и боковых сил, воздействующих на наружный и внутренний рельс от колес полувагонов с осевыми нагрузками 245 кН в кривом участке пути радиусом R 298 м на спуске с уклоном 16,2 ‰: а), б) вертикальные силы на наружном и внутреннем рельсах; в) боковая сила на наружном рельсе

На рисунке 3.5 представлены распределения вертикальных и боковых сил, воздействующих на наружный и внутренний рельс от колес полувагонов с осевыми нагрузками 230 кН при движении в кривом участке пути радиусом R 298 м на спуске с уклоном 16,2 ‰.

В таблице 3.2 приведены статистические показатели для полученных сил.

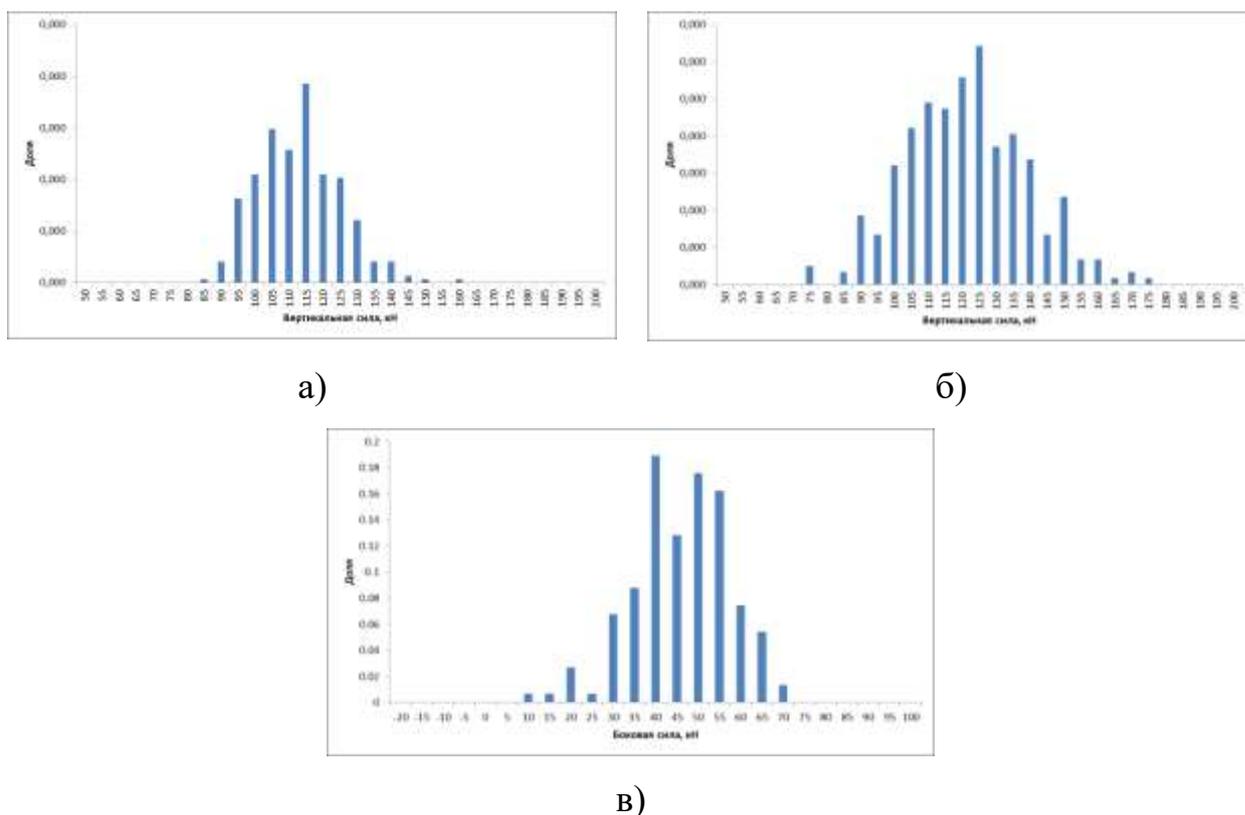


Рисунок 3.5 – Распределения вертикальных и боковых сил, воздействующих на наружный и внутренний рельс от колес полувагонов с осевыми нагрузками 230 кН в кривом участке пути радиусом R 298 м на спуске с уклоном 16,2 ‰: а), б) вертикальные силы на наружном и внутреннем рельсах; в) боковая сила на наружном рельсе

Таблица 3.2 – Статистические показатели сил, воздействующих на наружный и внутренний рельс от колес полувагонов с осевыми нагрузками 230 кН в кривом участке пути радиусом R 298 м на спуске с уклоном 16,2 ‰

Параметр	Боковая сила, кН		Вертикальная сила, кН	
	Наружный рельс	Внутренний рельс	Наружный рельс	Внутренний рельс
Среднее, $F_{\text{ср}}$	43,4	110,4	110,4	118,8
Стандартное отклонение, σ	11,3	11,9	11,9	17,9
Максимальное вероятное значение*, F_{max}	71,7	140,2	140,2	163,6

Для анализа силового воздействия от разных типов локомотивов, грузовых и пассажирских вагонов на наружный и внутренний рельсы в кривых участках пути радиусом 300 и 600 м на подъемах и спусках с уклонами 16–18 ‰ проведена статистическая обработка вертикальных и боковых сил. Рассмотрим результаты статистической обработки боковых и вертикальных сил, полученные в ходе проведения испытаний в условиях горно- перевального участка пути Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской ДИ.

В таблице 3.3–3.6 представлены средние значения, среднеквадратические отклонения и максимальные вероятные значения боковых и вертикальных сил от разных типов грузовых вагонов.

В таблицах 3.7–3.10 представлены средние значения, среднеквадратические отклонения и максимальные вероятные значения боковых и вертикальных сил от разных типов локомотивов.

Таблица 3.3– Статистические параметры силовых факторов от воздействия колес грузовых вагонов на рельсы в кривом участке пути R 298 м на спуске 16,2 ‰

Параметр	Тип подвижного состава							
	Полувагоны с осевой нагрузкой, кН		Цистерна	Контейнеровоз	Хопперы	Смешанные	Пассажирский вагон	Моторвагонный ПС
	245	230						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Боковые силы на наружном рельсе</i>								
F_{cp}	47,6	43,4	40,0	30,0	50,5	33,0	25,0	25,4
σ	9,8	11,3	9,1	8,7	8,6	11,0	9,5	13,0
F_{max}	72,1	71,7	62,8	51,8	72,0	60,5	48,8	57,9
<i>Вертикальные силы на наружном рельсе</i>								
F_{cp}	117,2	110,4	99,0	60,1	87,1	84,7	83,7	67,6
σ	12,2	11,9	14,8	17,8	10,0	14,3	6,4	14,5
F_{max}	147,7	140,2	136,0	104,6	112,1	120,5	99,7	103,9
<i>Вертикальные силы на внутреннем рельсе</i>								
F_{cp}	133,5	118,8	117,4	70,7	130,2	107	66,1	69,7
σ	19,9	17,9	16,3	20,8	15,0	18,7	7,9	13,6
F_{max}	183,3	163,6	158,2	122,7	167,7	153,8	85,9	103,7

Таблица 3.4– Статистические параметры силовых факторов от воздействия колес грузовых вагонов на рельсы в кривом участке пути R 302 м на подъеме 15,4 ‰

Параметр	Тип подвижного состава							
	Полувагоны с осевой нагрузкой, кН		Цистерна	Контейнеровоз	Хопперы	Смешанные	Пассажирский вагон	Моторвагонный ПС
	245	230						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Боковые силы на наружном рельсе</i>								
F_{cp}	35,3	32,7	30,1	18,5	30,8	23,5	19,3	22,9
σ	14,4	13,7	12,4	15,6	12,7	16,2	8,9	7,6
F_{max}	71,3	70,0	61,1	57,5	62,6	64,0	41,6	41,9
<i>Вертикальные силы на наружном рельсе</i>								
F_{cp}	130,6	119,9	109,5	87,0	107,0	83,5	74,3	63,7
1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ	16,3	14,7	18,8	14,9	12,6	14,7	11,3	10,6
F_{max}	171,4	156,7	156,5	124,3	138,5	120,3	102,6	90,2
<i>Вертикальные силы на внутреннем рельсе</i>								
F_{cp}	133,0	120	111,8	78,0	119,0	97,0	60,9	72,7
σ	21,0	23,4	22,3	18,6	22,7	19,3	12,3	11,5
F_{max}	185,5	178,5	167,6	124,5	175,8	145,3	91,7	101,5

Таблица 3.5 – Статистические параметры силовых факторов от воздействия колес грузовых вагонов на рельсы в кривом участке пути R 565 м на спуске 17,1 ‰

Параметр	Тип подвижного состава							
	Полувагоны с осевой нагрузкой, кН		Цистерна	Контейнеровоз	Лесовоз	Смешанные	Пассажирский вагон	Моторвагонный ПС
	245	230						
<i>Боковые силы на наружном рельсе</i>								
F_{cp}	14,3	13,2	12,1	11,0	12,1	10,8	7,8	8,2
σ	15,0	14,6	9,3	8,6	13,7	10,9	6,2	8,6
F_{max}	51,8	49,7	35,4	32,5	46,4	38,1	23,3	29,7
<i>Вертикальные силы на наружном рельсе</i>								
F_{cp}	133,8	118,2	109,0	72,4	103,5	80,4	76,9	66,2
σ	16,3	14,5	11,8	22,8	17,3	22,3	7,4	15,3
F_{max}	174,6	154,5	138,5	129,4	146,8	136,2	95,4	104,5
<i>Вертикальные силы на внутреннем рельсе</i>								
F_{cp}	113,3	98,7	101,0	61,8	94,5	69,0	52,7	55,4
σ	15,2	13,2	14,8	18,0	15,3	18,3	6,9	13,9
F_{max}	151,3	131,7	138,0	106,8	132,8	114,8	70,0	90,2

Таблица 3.6 – Статистические параметры силовых факторов от воздействия колес грузовых вагонов на рельсы в кривом участке пути R 605 м на подъеме 16,5 ‰

Параметр	Тип подвижного состава							
	Полувагоны с осевой нагрузкой, кН		Цистерна	Контейнеровоз	Лесовоз	Смешанные	Пассажирский вагон	Моторвагонный ПС
	245	230						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Боковые силы на наружном рельсе</i>								
F_{cp}	21,8	20,1	19,2	18,4	19,8	17,3	13,8	11,0
σ	16,0	14,6	12,7	12,1	14,3	15,7	9,9	7,2
F_{max}	61,8	56,6	51,0	48,7	55,6	56,6	38,6	29,0
<i>Вертикальные силы на наружном рельсе</i>								
F_{cp}	111,7	105,2	105,0	70,4	98,0	87,0	74,0	74,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ	12,9	13,1	15,6	23,7	14,1	13,6	11,6	19,4
F_{max}	144,0	138,0	144,0	129,7	133,3	121,0	103,0	122,5
<i>Вертикальные силы на внутреннем рельсе</i>								
F_{cp}	132,6	125,0	122,0	75,7	120,0	93,0	53,9	58,1
σ	19,6	14,0	13,9	25,9	13,5	14,9	11,6	14,9
F_{max}	181,6	160,0	156,8	140,5	153,8	130,3	82,9	95,4

Таблица 3.7 – Статистические параметры силовых факторов от воздействия колес локомотивов на рельсы в кривом участке пути R 298 м на спуске 16,2 ‰

Параметр	Тип подвижного состава				
	ВЛ85 (в голове поезда)	ВЛ80р (в голове поезда)	ЗЭС5К (в голове поезда)	ЗЭС5К (в хвосте поезда – толкачи)	ЭП1
<i>Боковые силы на наружном рельсе</i>					
$F_{\text{ср}}$	36,8	56,3	65,2	52,1	34,3
σ	18,8	10,2	13,6	7,6	19,9
F_{max}	83,8	81,8	99,2	71,1	84,1
<i>Вертикальные силы на наружном рельсе</i>					
$F_{\text{ср}}$	114,0	110,5	104,9	107,4	120,8
σ	11,9	10,1	10,4	11,7	14,6
F_{max}	143,8	135,8	130,9	136,7	157,3
<i>Вертикальные силы на внутреннем рельсе</i>					
$F_{\text{ср}}$	118,9	126,1	128,9	131,0	97,8
σ	19,4	18,0	14,9	14,3	15,3
F_{max}	167,4	171,1	166,2	166,8	136,1

Таблица 3.8 – Статистические параметры силовых факторов от воздействия колес локомотивов на рельсы в кривом участке пути R 302 м на подъеме 15,4 ‰

Параметр	Тип подвижного состава			
	ВЛ85 (в голове поезда)	ВЛ80р (в голове поезда)	ЗЭС5К (в голове поезда)	ЗЭС5К (в хвосте поезда – толкачи)
<i>Боковые силы на наружном рельсе</i>				
$F_{\text{ср}}$	25,3	26,3	28,8	48,9
σ	17,1	10,9	18,1	17,8
F_{max}	68,1	53,6	79,5	93,4
<i>Вертикальные силы на наружном рельсе</i>				
$F_{\text{ср}}$	114,1	118,6	121,1	131,7
σ	15,0	16,8	14,9	21,3
F_{max}	151,6	160,6	158,4	185,0
<i>Вертикальные силы на внутреннем рельсе</i>				
$F_{\text{ср}}$	108,5	121,5	122,4	119,0
σ	18,0	16,2	13,7	13,9
F_{max}	153,5	162,0	156,7	153,8

Таблица 3.9 – Статистические параметры силовых факторов от воздействия колес локомотивов на рельсы в кривом участке пути R 565 м на спуске 17,1 ‰

Параметр	Тип подвижного состава				
	ВЛ85 (в голове поезда)	ВЛ80р (в голове поезда)	ЗЭС5К (в голове поезда)	ЗЭС5К (в хвосте поезда – толкачи)	ЭП1
<i>Боковые силы на наружном рельсе</i>					
$F_{\text{ср}}$	22,8	36,4	32,9	29,4	26,6
σ	13,6	12,2	11,7	10,9	9,6
F_{max}	56,8	66,9	62,2	56,7	50,6
<i>Вертикальные силы на наружном рельсе</i>					
$F_{\text{ср}}$	119,0	128,8	121,5	116,2	113,0
σ	14,8	15,7	12,5	9,0	10,9
F_{max}	156,0	168,1	152,8	138,7	140,3
<i>Вертикальные силы на внутреннем рельсе</i>					
$F_{\text{ср}}$	108,0	111,2	105,5	108,4	84,1
σ	19,3	19,7	16,6	12,0	6,9
F_{max}	156,3	160,5	147,0	138,4	101,4

Таблица 3.10 – Статистические параметры силовых факторов от воздействия колес локомотивов на рельсы в кривом участке пути R 605 м на подъеме 16,5 ‰

Параметр	Тип подвижного состава			
	ВЛ85 (в голове поезда)	ВЛ80р (в голове поезда)	ЗЭС5К (в голове поезда)	ЗЭС5К (в хвосте поезда – толкачи)
<i>Боковые силы на наружном рельсе</i>				
$F_{\text{ср}}$	36,3	41,6	35,3	42,0
σ	6,8	9,9	16,1	8,9
F_{max}	53,3	66,4	75,6	64,3
<i>Вертикальные силы на наружном рельсе</i>				
$F_{\text{ср}}$	114,2	122,5	119,3	118,8
σ	17,1	13,5	18,4	11,0
F_{max}	157,0	156,3	165,3	146,3
<i>Вертикальные силы на внутреннем рельсе</i>				
$F_{\text{ср}}$	108,5	121,5	119,0	112,5
σ	19,3	18,1	14,4	12,4
F_{max}	156,8	166,8	155,0	143,5

Таким образом, получены средние значения вертикальных и боковых сил, действующих на наружный и внутренний рельсы от разных типов грузовых, пассажирских вагонов и локомотивов. Для использования этих данных в расчетах износа рельсов принято допущение, что работа сил трения пропорциональна средним значениям боковых и вертикальных сил, действующих на рельсы от колес подвижного состава.

Предложено ввести коэффициенты приведения для боковых и вертикальных сил, которые показывают насколько соотношение средних значений боковых и вертикальных сил от воздействия разных типов подвижного состава (локомотивов, разных типов грузовых вагонов, пассажирских вагонов, моторвагонного подвижного состава) отличается от воздействия от колес базового полувагона с осевыми нагрузками 230 кН на тележках модели 18-100.

В таблицах 3.11–3.18 представлены средние значения боковых и вертикальных сил и коэффициентов приведения для разных типов подвижного состава (грузовых, пассажирских вагонов и локомотивов), зарегистрированных на подъемах и спусках в кривых участках пути радиусами 300 и 600 м.

Таблица 3.11. – Средние значения боковых и вертикальных сил и коэффициентов приведения от воздействия колес грузовых и пассажирских вагонов на рельсы. Кривая R 298 м, спуск 16,2 ‰

Параметры	Тип подвижного состава						
	Полувагоны с осевой нагрузкой, кН		Цистерны	Контейнеровозы	Смешанные	Пассажирский вагон	Моторвагонный ПС
	245	230					
1	2	3	4	5	6	7	8
Средние значения боковых сил на наружный рельс, кН	47,6	43,4	40	30,0	33	25,0	25,4
Коэффициент приведения боковых сил на наружный рельс	1,10	1,00	0,92	0,69	0,76	0,58	0,59
Средние значения вертикальных сил на наружный рельс, кН	117,2	110,4	99	60,1	84,7	83,7	67,6
Коэффициент приведения вертикальных сил на наружный рельс	1,06	1,00	0,90	0,54	0,77	0,76	0,61
Средние значения вертикальных сил на внутренний рельс, кН	133,5	118,8	117,4	70,7	107	66,1	69,7
Коэффициент приведения вертикальных сил на внутренний рельс	1,12	1,00	0,99	0,60	0,90	0,56	0,59

Таблица 3.12 – Средние значения боковых и вертикальных сил и коэффициентов приведения от воздействия колес грузовых и пассажирских вагонов на рельсы.
Кривая R 302 м, подъем 15,4 ‰

Параметры	Тип подвижного состава							
	Полувагоны с осевой нагрузкой, кН		Цистерна	Контейнеровозы	Хопперы	Смешанные	Пассажирский вагон	Моторвагонный ПС
	245	230						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Средние значения боковых сил на наружный рельс, кН	35,3	32,7	30,1	18,5	30,8	23,5	19,3	22,9
Коэффициент приведения боковых сил на наружный рельс	1,08	1,00	0,92	0,57	0,94	0,72	0,59	0,70
Средние значения вертикальных сил на наружный рельс, кН	130,6	119,9	109,5	87,0	107,0	83,5	74,3	63,7
Коэффициент приведения вертикальных сил на наружный рельс	1,09	1,00	0,91	0,73	0,89	0,70	0,62	0,53
Средние значения вертикальных сил на внутренний рельс, кН	133,0	120,0	111,8	78,0	119,0	97,0	60,9	72,7
Коэффициент приведения вертикальных сил на внутренний рельс	1,11	1,00	0,93	0,65	0,99	0,81	0,51	0,61

Таблица 3.13 – Средние значения боковых и вертикальных сил и коэффициентов приведения от воздействия колес грузовых и пассажирских вагонов на рельсы.

Кривая R 565 м, спуск 17,1 ‰

Параметры	Тип подвижного состава							
	Полувагоны с осевой нагрузкой, кН		Цистерна	Контейнеровозы	Лесовозы	Смешанные	Пассажирский вагон	Мотовгонный ПС
	245	230						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Средние значения боковых сил на наружный рельс, кН	14,3	13,2	12,1	11,0	12,1	10,8	7,8	8,2
Коэффициент приведения боковых сил на наружный рельс	1,08	1,00	0,92	0,83	0,92	0,82	0,59	0,61
Средние значения вертикальных сил на наружный рельс, кН	133,8	118,2	109,0	72,4	103,5	80,4	76,9	66,2
Коэффициент приведения вертикальных сил на наружный рельс	1,13	1,00	0,92	0,61	0,88	0,68	0,65	0,56
Средние значения вертикальных сил на внутренний рельс, кН	113,3	98,7	101,0	61,8	94,5	69,0	52,7	55,4
Коэффициент приведения вертикальных сил на внутренний рельс	1,15	1,00	1,02	0,63	0,96	0,70	0,53	0,56

Таблица 3.14 – Средние значения боковых и вертикальных сил и коэффициентов приведения от воздействия колес грузовых и пассажирских вагонов на рельсы.
Кривая R 605 м, подъем 16,5 ‰

Параметры	Тип подвижного состава							
	Полувагоны с осевой нагрузкой, кН		Цистерны	Контейнеровозы	Лесовозы	Смешанные	Пассажирский вагон	Мотоврагонный ПС
	245	230						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Средние значения боковых сил на наружный рельс, кН	21,8	20,1	19,2	18,4	19,8	17,3	13,8	11,0
Коэффициент приведения боковых сил на наружный рельс	1,08	1,00	0,96	0,92	0,99	0,86	0,69	0,55
Средние значения вертикальных сил на наружный рельс, кН	111,7	105,2	105,0	70,4	98,0	87,0	74,0	74,0
Коэффициент приведения вертикальных сил на наружный рельс	1,06	1,00	1,00	0,67	0,93	0,83	0,70	0,70
Средние значения вертикальных сил на внутренний рельс, кН	132,6	125,0	122,0	75,7	120,0	93,0	53,9	58,1
Коэффициент приведения вертикальных сил на внутренний рельс	1,06	1,00	0,98	0,61	0,96	0,74	0,43	0,46

Таблица 3.15 – Средние значения боковых и вертикальных сил и коэффициентов приведения от воздействия колес локомотивов на рельсы. Кривая R 298 м, спуск 16,2 ‰

Параметры	Тип подвижного состава					
	Полувагоны с осевой нагрузкой 230 кН	ВЛ85 (тягачи)	ВЛ80р (тягачи)	ЗЭС5К (тягачи)	ЗЭС5К (толкачи)	ЭП1
Средние значения боковых сил на наружный рельс, кН	43,4	36,8	56,3	65,2	52,1	34,3
Коэффициент приведения боковых сил на наружный рельс.	1,00	0,85	1,30	1,50	1,20	0,79
Средние значения вертикальных сил на наружный рельс, кН	110,4	114,0	110,5	104,9	107,4	120,8
Коэффициент приведения вертикальных сил на наружный рельс	1,00	1,03	1,00	0,95	0,97	1,09
Средние значения вертикальных сил на внутренний рельс, кН	118,8	118,9	126,1	128,9	131,0	97,8
Коэффициент приведения вертикальных сил на внутренний рельс	1,00	1,00	1,06	1,09	1,10	0,82

Таблица 3.16 – Средние значения боковых и вертикальных сил и коэффициентов приведения от воздействия колес локомотивов на рельсы.

Кривая R 302 м, подъем 15,4 ‰

Параметры	Тип подвижного состава				
	Полувагоны с осевой нагрузкой 230 кН	ВЛ85 (тягачи)	ВЛ80р (тягачи)	ЗЭС5К (тягачи)	ЗЭС5К (толкачи)
Средние значения боковых сил на наружный рельс, кН	32,7	25,3	26,3	28,8	48,9
Коэффициент приведения боковых сил на наружный рельс	1,00	0,77	0,80	0,88	1,50
Средние значения вертикальных сил на наружный рельс, кН	119,9	114,1	118,6	121,1	131,7
Коэффициент приведения вертикальных сил на наружный рельс	1,00	0,95	0,99	1,01	1,10
Средние значения вертикальных сил на внутренний рельс, кН	120,0	108,5	121,5	122,4	119,0
Коэффициент приведения вертикальных сил на внутренний рельс	1,00	0,90	1,01	1,02	0,99

Таблица 3.17 – Средние значения боковых и вертикальных сил и коэффициентов приведения от воздействия колес локомотивов на рельсы.

Кривая R 565 м, спуск 17,1 ‰

Параметры	Тип подвижного состава					
	Полувагоны с осевой нагрузкой 230 кН	ВЛ85 (тягачи)	ВЛ80р (тягачи)	ЗЭС5К (тягачи)	ЗЭС5К (толкачи)	ЭП1
Средние значения боковых сил на наружный рельс, кН	13,2	22,8	36,4	32,9	29,4	26,6
Коэффициент приведения боковых сил на наружный рельс	1,00	1,73	2,76	2,49	2,23	2,02
Средние значения вертикальных сил на наружный рельс, кН	118,2	119	128,8	121,5	116,2	113
Коэффициент приведения вертикальных сил на наружный рельс	1,00	1,01	1,09	1,03	0,98	0,96
Средние значения вертикальных сил на внутренний рельс, кН	98,7	108	111,2	105,5	108,4	84,1
Коэффициент приведения вертикальных сил на внутренний рельс	1,00	1,09	1,13	1,07	1,10	0,85

Таблица 3.18 – Средние значения боковых и вертикальных сил и коэффициентов приведения от воздействия колес локомотивов на рельсы.

Кривая R 600 м, подъем 16,5 ‰

Параметры	Тип подвижного состава				
	Полувагоны с осевой нагрузкой 230 кН	ВЛ85 (тягачи)	ВЛ80р (тягачи)	ЗЭС5К (тягачи)	ЗЭС5К (толкачи)
Средние значения боковых сил на наружный рельс, кН	20,1	36,3	41,6	35,3	42
Коэффициент приведения боковых сил на наружный рельс	1,00	1,81	2,07	1,76	2,09
Средние значения вертикальных сил на наружный рельс, кН	105,2	114,2	122,5	119,3	118,8
Коэффициент приведения вертикальных сил на наружный рельс	1,00	1,09	1,16	1,13	1,13
Средние значения вертикальных сил на внутренний рельс, кН	125	108,5	121,5	119	112,5
Коэффициент приведения вертикальных сил на внутренний рельс	1,00	0,87	0,97	0,95	0,90

На основании экспериментально установленных средних значений вертикальных и боковых сил, действующих на наружный и внутренний рельсы от разных типов грузовых, пассажирских вагонов и локомотивов установлены коэффициенты приведения к средним значениям боковых и вертикальных сил от воздействия базового полувагона. Для использования этих данных в расчетах износа рельсов принято допущение, что работа сил трения пропорциональна средним значениям боковых и вертикальных сил, действующих на рельсы от колес подвижного состава. С учетом уровней силового воздействия предложено ранжирование подвижного состава по кластерам (группам) в зависимости от диапазона силового воздействия.

Ранжирование подвижного состава по группам позволяет учесть вклад каждой группы в боковой и вертикальный износ рельсов. Проведенное ранжирование подвижного состава по кластерам позволяет упорядочить значительное многообразие подвижного состава по диапазонам силового воздействия на путь.

На основании анализа уровней силового воздействия разных типов подвижного состава выполнено его ранжирование по кластерам:

1) локомотивы:

I группа – инновационные локомотивы с осевой нагрузкой 245 кН и повышенной силой тяги;

II группа – серийные грузовые и пассажирские локомотивы с осевыми нагрузками не более 230 кН;

2) вагоны:

I группа – инновационные грузовые вагоны с осевыми нагрузками 245 кН;

II группа – серийные грузовые вагоны с осевыми нагрузками 230 кН (полувагоны цистерны хопперы, лесовозы и т.д.) на тележках модели 18-100;

III группа – пассажирские вагоны, мотор-вагонный подвижной состав, контейнеровозы и т.п.;

IV группа – порожние грузовые вагоны.

Определение доли типов подвижного состава устанавливается по данным

технического отдела ПЧ. Соотношение силовых факторов определяется на основании результатов экспериментальных исследований силового воздействия разных типов подвижного состава на путь.

В таблице 3.19 представлены коэффициенты, которые связывают средние значения боковых и вертикальных сил, действующих на наружный и внутренний рельсы, от разных типов грузовых и пассажирских вагонов по отношению к средним воздействиям от колес базовых грузовых полувагонов.

В таблице 3.20 представлены коэффициенты, которые связывают средние значения боковых и вертикальных сил, действующих на наружный и внутренний рельсы, от разных типов локомотивов по отношению к средним воздействиям от колес базовых грузовых полувагонов.

Таблица 3.19 – Коэффициенты приведения силовых факторов, действующих от колес вагонов кластеров I–IV на рельсы в кривых разных радиусов, к средним значениям силовых факторов от базового грузового вагона

№	Коэффициент приведения	Кластер вагонов							
		I		II		III		IV	
		$R \leq 350$	$350 < R \leq 650$	$R \leq 350$	$350 < R \leq 650$	$R \leq 350$	$350 < R \leq 650$	$R \leq 350$	$350 < R \leq 650$
1	Боковые силы, действующие на наружный рельс	$\frac{1,1}{1,1}$	$\frac{0,88}{1,10}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,75}{0,64}$	$\frac{0,84}{1,38}$	$\frac{0,21}{0,17}$	$\frac{0,25}{0,30}$
2	Вертикальные силы, действующие на наружный рельс	$\frac{1,07}{1,10}$	$\frac{1,14}{1,07}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,55}{0,81}$	$\frac{0,62}{0,87}$	$\frac{0,21}{0,21}$	$\frac{0,22}{0,29}$
3	Вертикальные силы, действующие на внутренний рельс	$\frac{1,08}{1,11}$	$\frac{1,01}{1,10}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,60}{0,65}$	$\frac{0,63}{0,87}$	$\frac{0,31}{0,23}$	$\frac{0,22}{0,27}$

Примечание. В числителе – спуск; в знаменателе – подъем.

Таблица 3.20 – Коэффициенты приведения силовых факторов от воздействия колес локомотивов на рельсы к средним значениям вертикальных и боковых сил базового грузового полувагона (спуск/подъем)

	Коэффициент приведения	Кластер локомотивов			
		I		II	
		$R \leq 350$	$350 \leq R \leq 650$	$R \leq 350$	$350 \leq R \leq 650$
1	Боковые силы, действующие на наружный рельс	$\frac{0,88...1,2^*}{0,77...1,5^*}$	$\frac{1,88...2,23^*}{1,81...2,09^*}$	$\frac{1,60}{0,84}$	$\frac{2,63}{1,92}$
2	Вертикальные силы, действующие на наружный рельс	$\frac{1...0,97^*}{0,86...1,10^*}$	$\frac{1,28...0,98^*}{1,45...1,13^*}$	$\frac{1,18}{0,95}$	$\frac{1,58}{1,40}$
3	Вертикальные силы, действующие на внутренний рельс	$\frac{0,94...1,10^*}{0,88...0,99^*}$	$\frac{1,07...1,10^*}{1,16...0,90^*}$	$\frac{1,11}{0,99}$	$\frac{1,26}{1,11}$

Примечание. В числителе – спуск; в знаменателе – подъем.

* Работа локомотива в режиме толкача.

Таким образом, получены коэффициенты приведения, отражающие различие в уровнях средних значений боковых и вертикальных сил, действующих на наружный и внутренний рельсы от разных типов грузовых, пассажирских вагонов и локомотивов. В зависимости от доли подвижного состава эксплуатируемого на рассматриваемом участке пути, где расположена анализируемая кривая, введем интегральные коэффициенты приведения для боковых сил, действующих на наружный рельс; для вертикальных сил, действующих на наружный рельс; для вертикальных сил, действующих на внутренний рельс.

Ниже приведены аналитические выражения для определения интегральных коэффициентов приведения боковых и вертикальных сил от разных типов подвижного состава к средним значениям боковых и вертикальных сил от базового груженого полувагона.

Интегральный коэффициент приведения боковых сил, действующих на наружный рельс от разных типов подвижного состава

$$K_{\text{пс}}^{\text{бок}} = K_{\text{локI}}^{\text{бок}} \cdot \gamma_{\text{локI}} + K_{\text{локII}}^{\text{бок}} \cdot \gamma_{\text{локII}} + K_{\text{вагI}}^{\text{бок}} \cdot \gamma_{\text{вагI}} + K_{\text{вагII}}^{\text{бок}} \cdot \gamma_{\text{вагII}} + \\ + K_{\text{вагIII}}^{\text{бок}} \cdot \gamma_{\text{вагIII}} + K_{\text{вагIV}}^{\text{бок}} \cdot \gamma_{\text{вагIV}}, \quad (3.1)$$

$K_{\text{локI}}^{\text{бок}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений боковых сил, действующих на наружный рельс от локомотивов кластера II, к средним значениям боковых сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{локI}}^{\text{бок}} = \frac{F_{\text{локI}}^{\text{сп}}}{F_{\text{баз}}^{\text{сп}}}$);

$K_{\text{локII}}^{\text{бок}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений боковых сил, действующих на наружный рельс от локомотивов кластера II, к средним значениям боковых сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{локII}}^{\text{бок}} = \frac{F_{\text{локII}}^{\text{сп}}}{F_{\text{баз}}^{\text{сп}}}$);

$\gamma_{\text{локI}}, \gamma_{\text{локII}}$ – доля локомотивов кластеров I и II в суточном пакете поездов;

$K_{\text{вагI}}^{\text{бок}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений боковых сил, действующих на наружный рельс от вагонов кластера I, к средним значениям боковых сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{вагI}}^{\text{бок}} = \frac{F_{\text{вагI}}^{\text{сп}}}{F_{\text{баз}}^{\text{сп}}}$);

$K_{\text{вагII}}^{\text{бок}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений боковых сил, действующих на наружный рельс от вагонов кластера II, к средним значениям боковых сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{вагII}}^{\text{бок}} = \frac{F_{\text{вагII}}^{\text{сп}}}{F_{\text{баз}}^{\text{сп}}}$);

$K_{\text{вагIII}}^{\text{бок}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений боковых сил, действующих на наружный рельс от вагонов кластера III, к средним значениям боковых сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{вагIII}}^{\text{бок}} = \frac{F_{\text{вагIII}}^{\text{сп}}}{F_{\text{баз}}^{\text{сп}}}$);

$K_{\text{вагIV}}^{\text{бок}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений боковых сил, действующих на наружный рельс от вагонов кластера IV, к средним значениям боковых сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{вагIV}}^{\text{бок}} = \frac{F_{\text{вагIV}}^{\text{сп}}}{F_{\text{баз}}^{\text{сп}}}$);

$\gamma_{\text{вагI}}, \gamma_{\text{вагII}}, \gamma_{\text{вагIII}}, \gamma_{\text{вагIV}}$ – доля вагонов кластеров I–IV в суточном пакете поездов.

Интегральный коэффициент вертикальных сил, действующих на наружный рельс от разных типов подвижного состава

$$K_{\text{ПС}}^{\text{ВН}} = K_{\text{ЛОКI}}^{\text{ВН}} \cdot \gamma_{\text{ЛОКI}} + K_{\text{ЛОКII}}^{\text{ВН}} \cdot \gamma_{\text{ЛОКII}} + K_{\text{ВАГI}}^{\text{ВН}} \cdot \gamma_{\text{ВАГI}} + K_{\text{ВАГII}}^{\text{ВН}} \cdot \gamma_{\text{ВАГII}} + K_{\text{ВАГIII}}^{\text{ВН}} \cdot \gamma_{\text{ВАГIII}} + K_{\text{ВАГIV}}^{\text{ВН}} \cdot \gamma_{\text{ВАГIV}}, \quad (3.2)$$

$K_{\text{ЛОКI}}^{\text{ВН}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений вертикальных сил, действующих на наружный рельс от локомотивов кластера I, к средним значениям вертикальных сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{ЛОКI}}^{\text{ВН}} = \frac{F_{\text{ЛОКI}}^{\text{СР}}}{F_{\text{БАЗ}}^{\text{СР}}}$);

$K_{\text{ЛОКII}}^{\text{ВН}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений вертикальных сил, действующих на наружный рельс от локомотивов кластера II, к средним значениям вертикальных сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{ЛОКII}}^{\text{ВН}} = \frac{F_{\text{ЛОКII}}^{\text{СР}}}{F_{\text{БАЗ}}^{\text{СР}}}$);

$\gamma_{\text{ЛОКI}}, \gamma_{\text{ЛОКII}}$ – доля локомотивов кластеров I и II в суточном пакете поездов;

$K_{\text{ВАГI}}^{\text{ВН}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений вертикальных сил, действующих на наружный рельс от вагонов кластера I, к средним значениям вертикальных сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{ВАГI}}^{\text{ВН}} = \frac{F_{\text{ВАГI}}^{\text{СР}}}{F_{\text{БАЗ}}^{\text{СР}}}$);

$K_{\text{ВАГII}}^{\text{ВН}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений вертикальных сил, действующих на наружный рельс от вагонов кластера II, к средним значениям вертикальных сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{ВАГII}}^{\text{ВН}} = \frac{F_{\text{ВАГII}}^{\text{СР}}}{F_{\text{БАЗ}}^{\text{СР}}}$);

$K_{\text{ВАГIII}}^{\text{ВН}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений вертикальных сил, действующих на наружный рельс от вагонов кластера III, к

средним значениям вертикальных сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{вагIII}}^{\text{BH}} = \frac{F_{\text{вагIII}}^{\text{CP}}}{F_{\text{баз}}^{\text{CP}}}$);

$K_{\text{вагIV}}^{\text{BH}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений вертикальных сил, действующих на наружный рельс от вагонов кластера IV, к средним значениям вертикальных сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{вагIV}}^{\text{BH}} = \frac{F_{\text{вагIV}}^{\text{CP}}}{F_{\text{баз}}^{\text{CP}}}$);

$\gamma_{\text{вагI}}, \gamma_{\text{вагII}}, \gamma_{\text{вагIII}}, \gamma_{\text{вагIV}}$ – доля вагонов кластеров I–IV в суточном пакете поездов.

Интегральный коэффициент вертикальных сил, действующих на внутренний рельс от разных типов подвижного состава

$$K_{\text{ПС}}^{\text{BB}} = K_{\text{локI}}^{\text{BB}} \cdot \gamma_{\text{локI}} + K_{\text{локII}}^{\text{BB}} \cdot \gamma_{\text{локII}} + K_{\text{вагI}}^{\text{BB}} \cdot \gamma_{\text{вагI}} + K_{\text{вагII}}^{\text{BB}} \cdot \gamma_{\text{вагII}} + K_{\text{вагIII}}^{\text{BB}} \cdot \gamma_{\text{вагIII}} + K_{\text{вагIV}}^{\text{BB}} \cdot \gamma_{\text{вагIV}}, \quad (3.3)$$

$K_{\text{локI}}^{\text{BB}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений вертикальных сил, действующих на внутренний рельс от локомотивов кластера I, к средним значениям вертикальных сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{локI}}^{\text{BB}} = \frac{F_{\text{локI}}^{\text{CP}}}{F_{\text{баз}}^{\text{CP}}}$);

$K_{\text{локII}}^{\text{BB}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений вертикальных сил, действующих на внутренний рельс от локомотивов кластера II, к средним значениям вертикальных сил от базовых грузовых ($K_{\text{локII}}^{\text{BB}} = \frac{F_{\text{локII}}^{\text{CP}}}{F_{\text{баз}}^{\text{CP}}}$);

$\gamma_{\text{локI}}, \gamma_{\text{локII}}$ – доля локомотивов кластеров I и II в суточном пакете поездов;

$K_{\text{вагI}}^{\text{BB}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений вертикальных сил, действующих на внутренний рельс от вагонов кластера I, к средним значениям вертикальных сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{вагI}}^{\text{BB}} = \frac{F_{\text{вагI}}^{\text{CP}}}{F_{\text{баз}}^{\text{CP}}}$);

$K_{\text{вагII}}^{\text{BB}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений вертикальных сил, действующих на внутренний рельс от вагонов кластера II, к средним значениям вертикальных сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{вагII}}^{\text{BB}} = \frac{F_{\text{вагII}}^{\text{CP}}}{F_{\text{баз}}^{\text{CP}}}$);

$K_{\text{вагIII}}^{\text{BB}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений вертикальных сил, действующих на внутренний рельс от вагонов кластера III, к средним значениям вертикальных сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{вагIII}}^{\text{BB}} = \frac{F_{\text{вагIII}}^{\text{CP}}}{F_{\text{баз}}^{\text{CP}}}$);

$K_{\text{вагIV}}^{\text{BB}}$ – коэффициент, учитывающий отношение средних значений вертикальных сил, действующих на внутренний рельс от вагонов кластера IV, к средним значениям вертикальных сил от базовых грузовых вагонов ($K_{\text{вагIV}}^{\text{BB}} = \frac{F_{\text{вагIV}}^{\text{CP}}}{F_{\text{баз}}^{\text{CP}}}$);

$\gamma_{\text{вагI}}, \gamma_{\text{вагII}}, \gamma_{\text{вагIII}}, \gamma_{\text{вагIV}}$ – доля вагонов кластеров I–IV в суточном пакете поездов.

Таким образом, в результате проведенных исследований по воздействию на путь подвижного состава с разными конструкциями экипажных частей и осевых нагрузок в условиях горно-перевальных участков Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской ДИ:

- установлены средние значения боковых и вертикальных сил, действующих на наружный и внутренний рельсы в кривых участках пути с радиусами R300 и R600 м от эксплуатируемых типов локомотивов, пассажирских и грузовых вагонов имеют существенные различия;

- введены коэффициенты приведения средних значений вертикальных и боковых сил, действующих от подвижного состава различного типа, к средним значениям сил, действующих от груженого полувагона с осевой нагрузкой 230 кН для использования полученных данных в расчетах износа рельсов;

- на основании анализа уровней силового воздействия на путь и анализа

значений коэффициентов приведения предложено ранжировать подвижной состав по кластерам:

1) локомотивы:

I кластер – инновационные локомотивы с осевой нагрузкой 245 кН и повышенной силой тяги;

II кластер – серийные грузовые и пассажирские локомотивы с осевыми нагрузками не более 230 кН и умеренной силой тяги;

2) вагоны:

I кластер – инновационные грузовые вагоны с осевыми нагрузками 245 кН;

II кластер – серийные грузовые вагоны с осевыми нагрузками 230 кН (полувагоны цистерны хопперы, лесовозы и т.д.) на тележках модели 18-100;

III кластер – пассажирские вагоны, мотор-вагонный подвижной состав, контейнеровозы;

IV кластер – порожние грузовые вагоны;

- получены математические выражения для интегральных коэффициентов приведения от воздействий разных типов подвижного состава на наружный и внутренний рельсы в кривых участках пути. Пример определения интегральных коэффициентов приведения от воздействий разных типов подвижного состава для участков Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской ДИ представлены в Приложении 3.

3.3 Влияние лубрикации рельсов на интенсивность их износа

Лубрикация рельсов в кривых производится с использованием вагонов-рельсосмазывателей (ВРС), локомотивов-рельсосмазывателей (ЛРС), стационарных путевых лубрикаторов, тягового подвижного состава, оборудованного бортовыми гребнесмазывателями. ВРС по нормативам в зависимости от грузонапря-

женности должны обеспечивать нанесение смазки в кривых в зону контакта «колесо – рельс» со следующей периодичностью [176]:

- до 45 млн т брутто/км в год – не менее чем с одним проходом в двое суток;
- 45–80 млн т брутто/км в год – с одним проходом в сутки;
- более 80 млн т брутто/км в год – не менее чем с тремя проходами в двое суток.

Тип применяемой смазки определяет количество пропущенных осей до сохранения ею смазывающих свойств и динамику изменения коэффициента трения от пропущенных осей (см. таблицу 3.21).

Таблица 3.21– Стойкость смазывающего материала [177]

Смазка	Количество смазки, мл		Коэффициент трения $K_{тр}$		Количество пропущенных осей O_s	Стойкость смазочного материала, мл/км
	абсолютное	относительное	исходный	Конечный		
СР-КУ	1995	350	0,13	0,27	25000	71,4
СР-КУ	667	117	0,12	0,27	12600	107,7
СР-КУ	1110	195	0,12	0,25	20100	103,0
МС-27	630	112	0,12	0,26	12600	112,5
МС-27	850	149	0,12	0,26	18900	126,8
КР-400	2400	420	0,12	0,26	30240	72,0
КР-400	1100	193	0,12	0,26	24696	128,0
ПУМА-МР	740	130	0,12	0,26	11349	87,0

Работу системы «колесо – рельс» при проведении лубрикации можно описать двумя различными режимами.

Первый режим, когда система «колесо – рельс» работает при своевременной проведенной лубрикации, второй – когда лубрификация проведена с превышением нормативных сроков.

Согласно данным таблицы 3.21, минимальное значение $K_{тр}^{min} = 0,12...0,13$ по мере пропущенного тоннажа коэффициент трения возрастает по зависимости:

$$K_{тр} = K_{тр}^{min} \cdot K_{O_s} \cdot O_s,$$

где $K_{тр}^{min}$ – минимальное значение коэффициента трения после проведения лубрикации;

K_{O_s} – коэффициент пропорциональности, учитывающий увеличение

коэффициента трения от количества пропущенных осей после проведения лубрикации;

O_s – количество пропущенных осей по участку после проведения лубрикации.

В случае своевременной лубрикации работа системы «колесо – рельс» может быть представлена в виде циклограммы изображенной на рисунке 3.6.

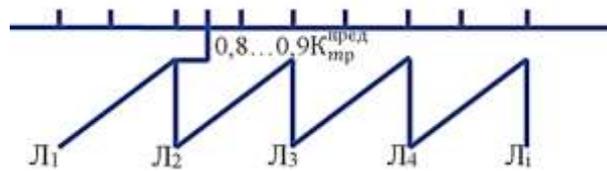


Рисунок 3.6 – Циклограмма работы системы «колесо – рельс» при своевременной периодичности проведения лубрикации

В представленном случае коэффициент трения $K_{тр}$ повышается от минимального значения, имеющего место сразу после проведения лубрикации, до некоторого промежуточного значения составляющего $0,85...0,95 K_{тр}^{пред}$. После этого производится повторная лубрикация и цикл повторяется. Изменение коэффициента трения происходит по нелинейным зависимостям, которые с достаточной для практического использования точностью можно заменить линейными.

В случае несвоевременной лубрикации работа системы «колесо – рельс» может быть представлена в виде циклограммы изображенной на рисунке 3.7.

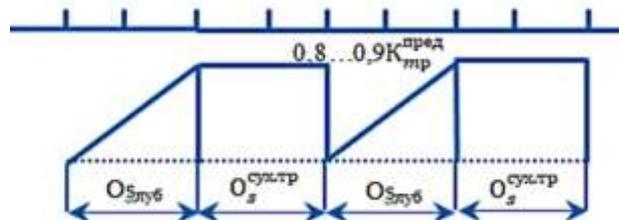


Рисунок 3.7 – Циклограмма работы системы «колесо – рельс» при несвоевременной периодичности проведения лубрикации

Циклограмма работы системы «колесо – рельс» при несвоевременной периодичности проведения лубрикации представляет совокупность циклов работы при низких значениях трения и при полциклах, когда значения коэффициента трения достигают предельных значений: $K_{тр}^{пред} = 0,26...0,27$.

После проведения лубрикации цикл повторяется.

По полученным значениям коэффициента трения от условий лубрикации [177] установлены зависимости коэффициентов трения от количества пройденных осей колесных пар. Выражения для определения коэффициентов трения в зависимости от типа смазки и количества пропущенных осей представлены в таблице 3.22.

Таблица 3.22 – Расчет коэффициента трения для учета лубрикации в боковом износе головки наружного рельса

Смазка	Коэффициент трения $K_{тр}$		Количество пропущенных осей O_s	Формула для расчета коэффициента трения
	исходный	конечный		
СР-КУ	0,13	0,27	25000	$0,13 + 2,8 \cdot 10^{-6} \cdot O_s$
СР-КУ	0,12	0,25	20100	$0,12 + 4,0 \cdot 10^{-6} \cdot O_s$
МС-27	0,12	0,26	18900	$0,12 + 4,2 \cdot 10^{-6} \cdot O_s$
КР-400	0,12	0,26	30240	$0,12 + 2,6 \cdot 10^{-6} \cdot O_s$
КР-400	0,12	0,26	24696	$0,12 + 3,2 \cdot 10^{-6} \cdot O_s$

При расчете износа рельсов значения коэффициентов трения выбираются в зависимости от типа применяемой смазки и количества пройденных осей колесных пар из последнего столбца таблицы 3.22.

Зависимости интенсивности износа рельсов от величины коэффициентов трения при $K_{тр} = 0,12; 0,29; 0,25$ изнашивания представлены на рисунке 3.8.

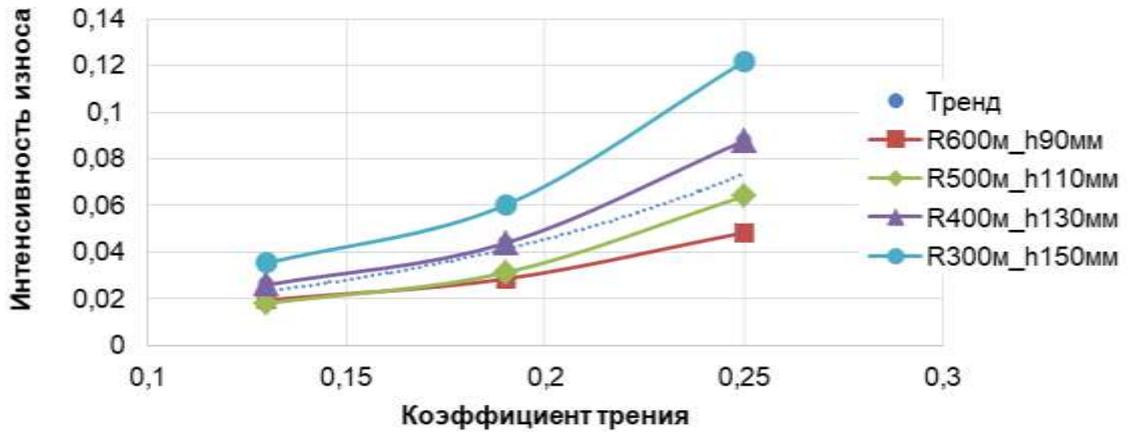


Рисунок 3.8 – Зависимости изменения «базового» бокового износа от коэффициента трения между гребнем колеса и боковой поверхностью рельса для кривых разных радиусов

По расчетным данным определены функциональные коэффициенты, определяющие влияние коэффициентов трения на интенсивность износа рельсов. Зависимости функциональных коэффициентов от величин коэффициентов трения представлены на рисунке 3.9.

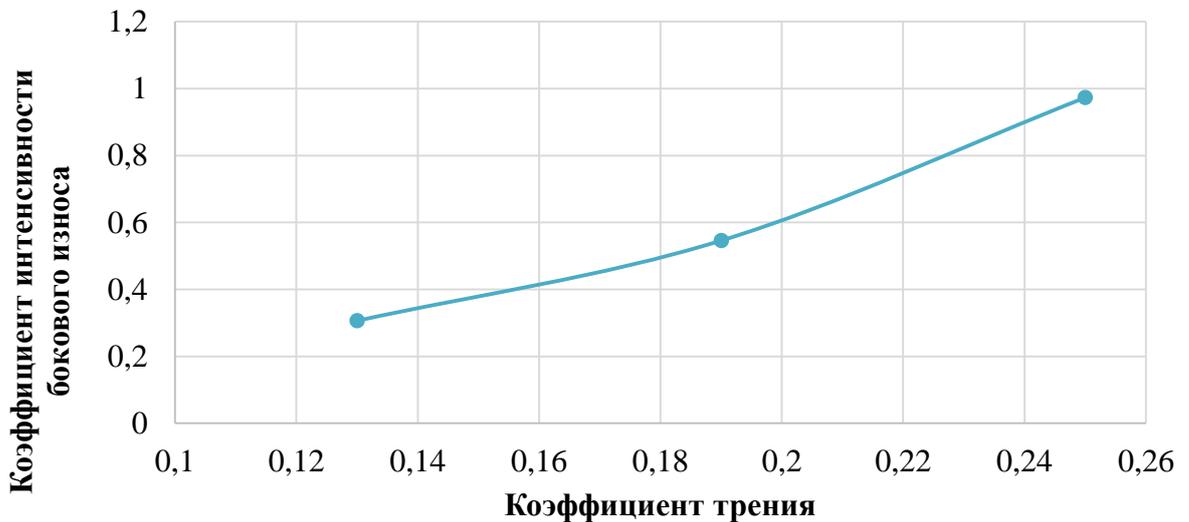


Рисунок 3.9 – Коэффициенты интенсивности бокового износа в зависимости от коэффициентов трения для кривых участков пути радиусами 300–600 м

Установленные функциональные коэффициенты смазки позволяют

откорректировать базовые значения интенсивностей износа (см. раздел 2) с учетом величин коэффициентов трения.

3.4 Влияние продольного профиля пути, массы поезда и радиуса кривой на интенсивность износа рельсов

При движении поездов на пути с уклонами продольного профиля возникают продольные силы, которые в кривых участках пути вызывают повышение боковых сил от подвижного состава на путь. Для установления влияния величин уклонов, массы поезда, подъемов и спусков на величины боковых сил, и в конечном итоге на интенсивность износа рельсов, проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований. Для решения данной задачи использовался модуль UM Train в рамках программного комплекса «Универсальный механизм» [161]. Модуль позволяет рассчитывать продольную динамику поезда в режимах выбега, тяги и торможения на пути любой конфигурации. При создании модели поезда из базы выбирался наиболее распространенный на российских железных дорогах подвижной состав – полувагоны. Поезда формировались разной массы и длины – из 45, 55, 63 и 71 полувагона с осевыми нагрузками 230 и 245 кН, что соответствовало массам поездов 4230, 5170, 6300, 7100 т. В железнодорожный состав включена уточненная модель трехвагонного сцепа для более подробного анализа влияния продольных сил, возникающих на спусках и подъемах на величины боковых сил (модуль UM Train 3D). Модель поезда для исследования влияния уклонов на динамику продольных сил представлена на рисунке 3.10.



Рисунок 3.10 – Модель поезда для исследования продольных сил в поезде с включением трехвагонного сцепа [161]

Для определения значений боковых сил проведено моделирование движение поезда с трехвагонным сцепом 3D-моделей (см. рисунок 3.11) полувагонов от набегающих колес 11-го вагона при движении поездов массой 4230, 5170, 6300, 7100 т на спуске с уклоном 17,3 ‰ в кривых участках пути радиусами 300, 400, 500, 600 м при регулировочном торможении с реализацией равномерной скорости движения.

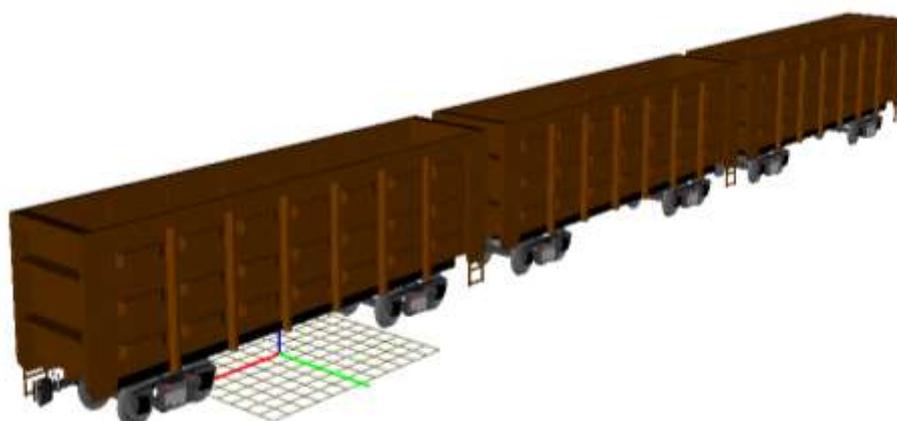
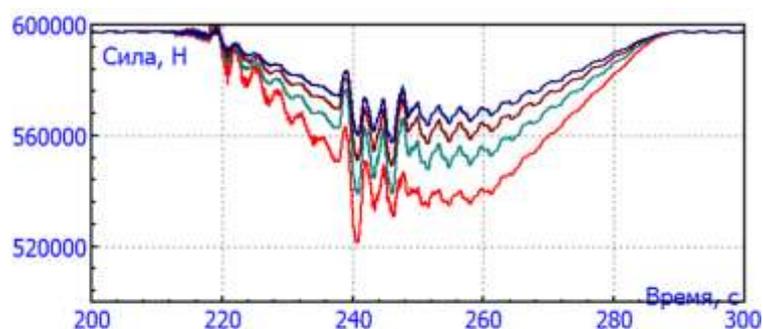


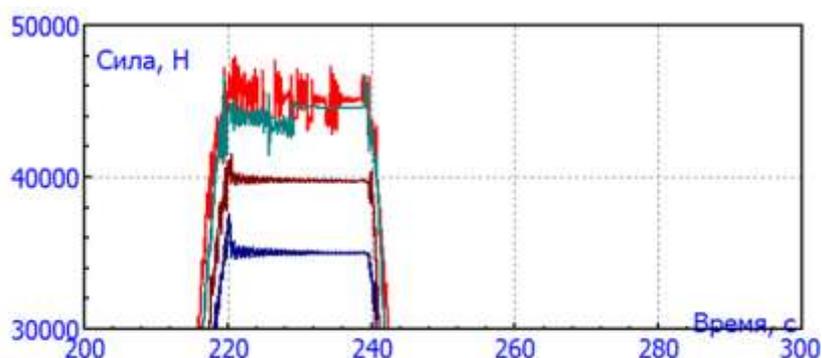
Рисунок 3.11 – Сцеп 3D-моделей из трех полувагонов [161]

На рисунке 3.12 представлены примеры расчетных осциллограмм изменения продольных и боковых сил от набегающих колес 11-го вагона с головы поезда при движении поезда массой 7100 т на уклоне 17,3 ‰ в кривых разного радиуса при регулировочном торможении с реализацией равномерной и равновесной скорости движения.

Зависимости изменения боковых сил от набегающих колес полувагонов при движении поездов разной массы на спусках и подъемах для кривой радиусом 300 м от величин уклонов и массы поездов представлены соответственно на рисунке 3.13 и 3.14. Зависимости установлены в результате моделирования и анализа экспериментальных исследований продольной динамики поездов [178].



а)



б)

Рисунок 3.12– Расчетные осциллограммы изменения продольных (а) и боковых (б) сил движения поезда массой 7100 т на уклоне 17,3 ‰ в кривых разного радиуса с равновесной и равномерной скоростями: красный – R 300 м; зеленый – R 400 м; коричневый – R 500 м; синий – R 600 м

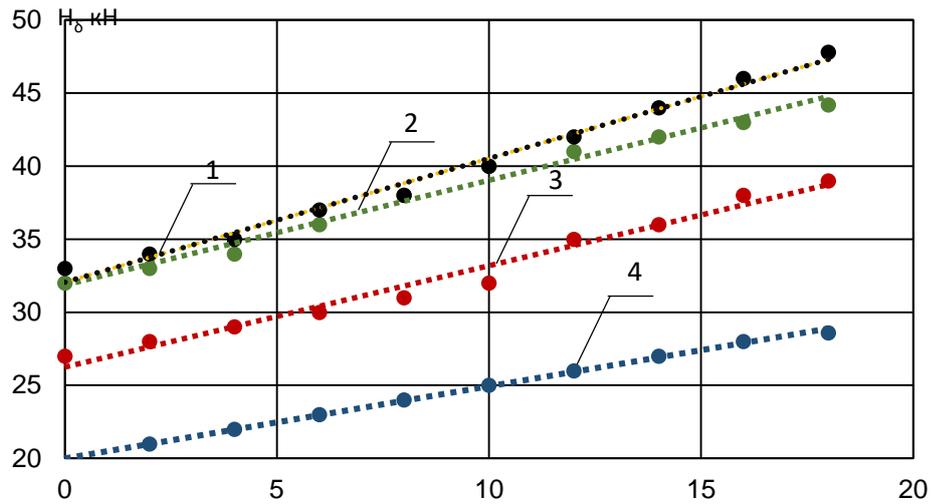


Рисунок 3.13 – Зависимости изменения боковых сил от набегавших колес полувагонов при движении поездов разной массы на спусках от величин уклонов: 1 – 7100 т, 2 – 6300 т, 3 – 5150 т, 4 – 4230 т

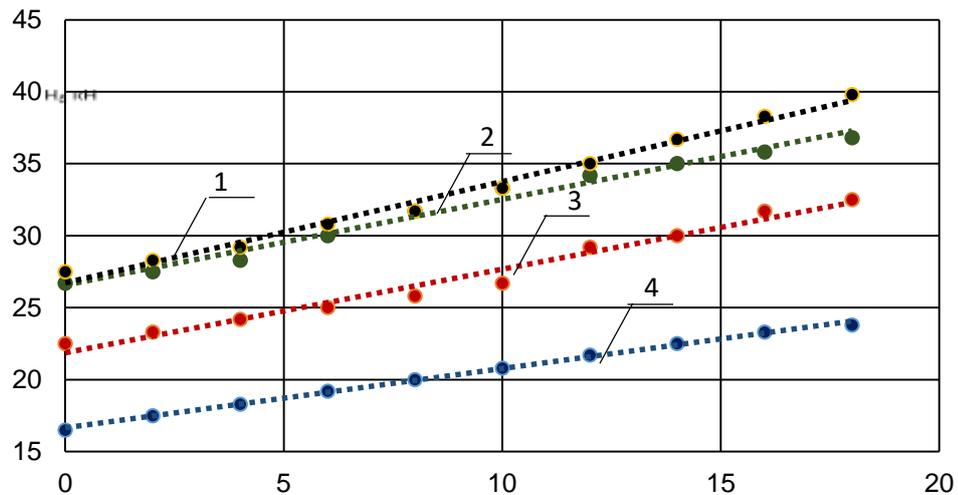


Рисунок 3.14 – Зависимости изменения боковых сил от набегавших колес полувагонов при движении поездов разной массы на подъемах от величин уклонов: 1 – 7100 т, 2 – 6300 т, 3 – 5150 т, 4 – 4230 т

Анализ результатов расчета показал:

- при движении поезда на спуске в кривом участке пути продольные силы в междвагонных соединениях снижаются тем интенсивнее, чем круче кривая;
- боковые силы возрастают с уменьшением радиуса кривого участка пути;

- увеличение уклонов продольного профиля пути и массы поезда на спусках приводит к росту продольных и боковых сил;

- повышение продольных сил в поезде определяет рост бокового воздействия в кривом участке пути и соответственно увеличение интенсивности износа пропорционально повышению боковых сил;

- при регулировочном торможении поезда для обеспечения постоянной скорости движения помимо квазистатических сил в поезде возникали динамические силы, которые приводят к росту суммарных продольных сил. Это определяло повышенные значения боковых сил от набегающих колес вагонов на наружный рельс в кривом участке пути.

Для оценки влияния уклонов продольного профиля пути на износ рельсов в кривых участках пути выполнен анализ результатов экспериментальных наблюдений специалистов технического отдела Слюдянской дистанции пути и построены зависимости изменения интенсивности износа для рельсов категорий ДТ350 и ДТ370ИК в кривых участках пути с близкими радиусами на спусках и подъемах с уклонами, изменяющимися в диапазонах 0–20 ‰.

Графики зависимостей интенсивности бокового износа наружных рельсов категории ДТ350 для кривых, расположенных на участках с разными уклонами продольного профиля пути представлены на рисунке 3.15.

Значения коэффициентов, определяющих изменение интенсивности износа рельсов ДТ350 от величин уклонов, определенных по значениям степенной функцией, представлены в таблице 3.23.

Графики зависимостей интенсивности износа боковой поверхности рельсов ДТ370ИК для кривых разных радиусов, расположенных на подъемах и спусках с близкими уклонами продольного профиля пути, представлены на рисунке 3.16.

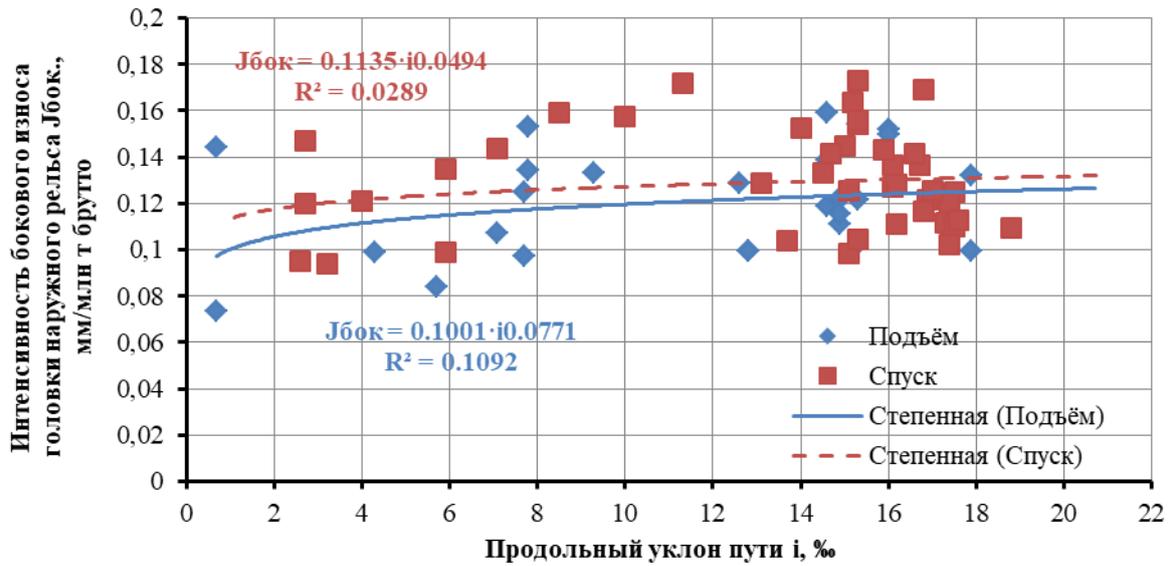


Рисунок 3.15 – Зависимости интенсивности бокового износа рельсов ДТ350 для кривых $R \leq 350$ м на 2-м главном пути в 2020–2021 гг., расположенных на подъемах и спусках с разными уклонами продольного профиля пути

Значения коэффициентов, определяющих изменение интенсивности износа рельсов ДТ370ИК, уложенных на 2-м главном пути в 2020–2021 гг., от величин уклонов в кривых $R \leq 350$ м, представлены в таблице 3.24.

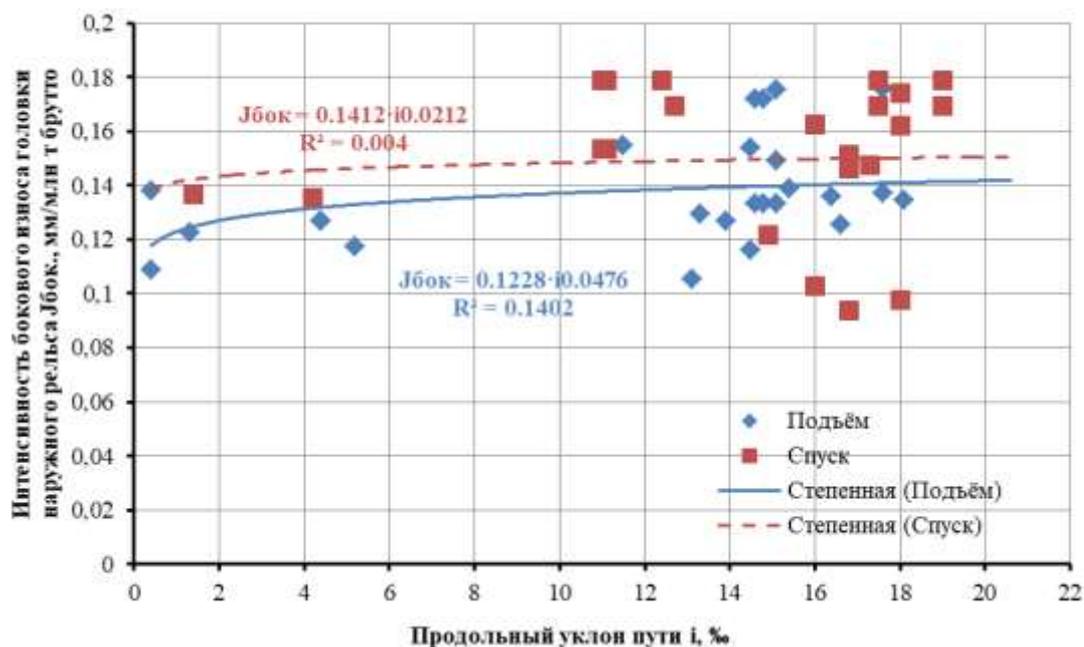


Рисунок 3.16 – Зависимости интенсивности бокового износа рельсов ДТ370ИК для кривых $R \leq 350$ м на 2-м главном пути в 2020-2021 гг., расположенных на подъемах и спусках с разными уклонами продольного профиля пути

Таблица 3.23 – Коэффициенты K_i , учитывающие влияние уклона продольного профиля пути поезда на боковой износ рельсов ДТ350 на спуске и подъеме

Продольный профиль пути	Величина уклона i , %								
	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Спуск	1,013	1,045	1,068	1,087	1,102	1,115	1,127	1,137	1,146
Подъем	1,039	1,060	1,075	1,087	1,097	1,105	1,112	1,119	1,125

Таблица 3.24 – Коэффициенты K_i , учитывающие влияние уклона продольного профиля пути поезда на боковой износ рельсов ДТ370ИК на спуске и подъеме

Продольный профиль пути	Величина уклона i , %								
	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Спуск	1,033	1,053	1,068	1,079	1,088	1,096	1,103	1,110	1,115
Подъем	1,054	1,063	1,069	1,074	1,079	1,082	1,085	1,088	1,090

Анализ опытных данных показал:

- интенсивности износа рельсов одинаковых категорий качества в схожих условиях эксплуатации. имеют значительный разброс, что определяет существен-

ную зависимость трендов от количества опытных значений интенсивностей;

- вместе с тем во всех случаях интенсивность износа на спусках выше, чем интенсивность износа на подъемах. Разница в интенсивностях изменяется от 7 до 12 %;

- изменение интенсивности от уклонов описывается степенными функциями, параметры степенных функций зависят от направления уклонов (спуск, подъем) и категорий качества рельсов;

- для всех категорий рельсов на подъемах и спусках наблюдается устойчивая тенденция к повышению интенсивности износа с увеличением величины уклона;

- углы наклона линий трендов для рельсов разных категорий качества имеют близкие значения, что позволяет усреднить значения функциональных коэффициентов.

Усредненные функциональные коэффициенты приведены в таблице 3.25.

Таблица 3.25 – Усредненные K_i , учитывающие влияние уклонов продольного профиля пути на боковой износ рельсов на спусках и подъемах

Продольный профиль пути	Величина уклона i , ‰								
	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Спуск	1,0230	1,0490	1,068	1,0830	1,095	1,1055	1,1150	1,1235	1,1305
Подъем	1,0465	1,0615	1,072	1,0805	1,088	1,0935	1,0985	1,1035	1,1075

Усредненные функциональные коэффициенты K_i , определяющие изменение интенсивности износа рельсов разных категорий качества от величин уклонов продольного профиля пути представлены на рисунке 3.17.

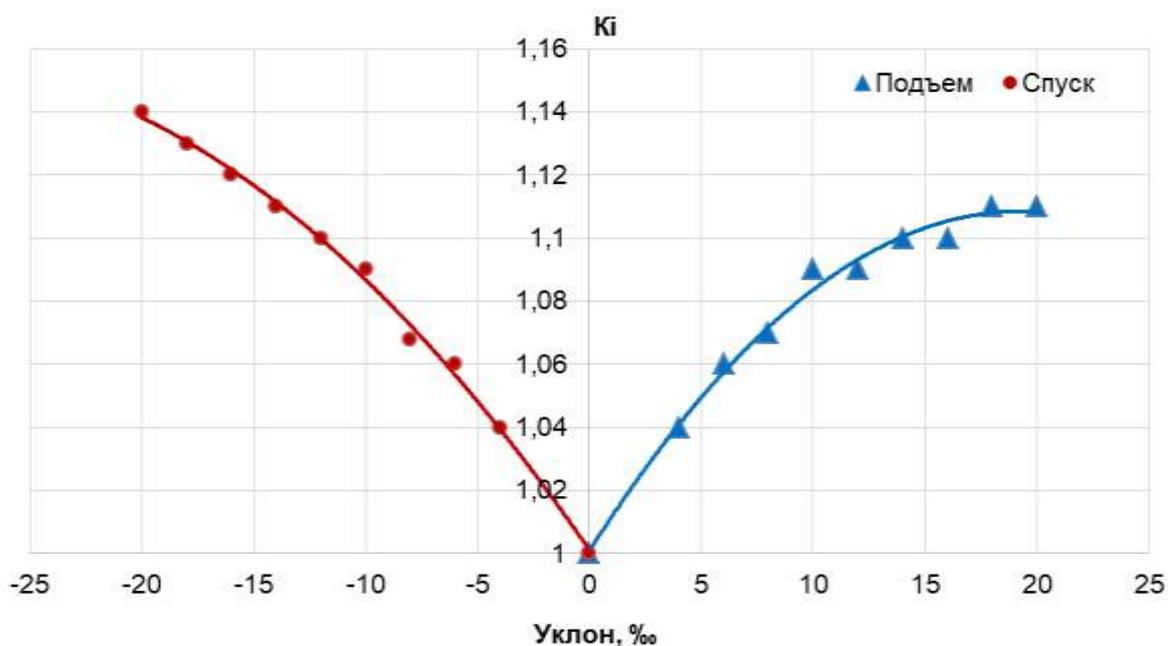


Рисунок 3.17 – Изменение функциональных коэффициентов, учитывающих влияние уклонов пути на спусках и подъемах на интенсивность износа рельсов

Таким образом, на основании выполненных исследований установлено:

1 При движении грузовых поездов на горно-перевальных участках возникают продольные силы, которые инициируют рост боковых сил и, как следствие, интенсивность износа рельсов в кривых участках пути.

2 При движении на спусках в поездах возникают квазистатические продольные сил от веса поезда и динамические силы при режимах как служебного, так и регулировочного торможений.

3 По результатам экспериментальных исследований износа рельсов категорий ДТ350 и ДТ370ИК в кривых участках пути с близкими радиусами на спусках и подъемах с уклонами, изменяющимися в диапазонах 0...20 ‰, установлено:

– для всех категорий рельсов на подъемах и спусках наблюдается устойчивая тенденция к повышению интенсивности износа с увеличением величины уклона;

– углы наклона линий трендов для рельсов разных категорий качества име-

ют близкие значения, что позволяет усреднить значения функциональных коэффициентов;

– во всех случаях интенсивность износа на спусках выше, чем интенсивность износа на подъемах. Разница в интенсивностях изменяется от 7 до 12 %;

– изменение интенсивности от уклонов описывается степенными функциями, параметры степенных функций зависят от направления уклонов (спуск, подъем) и категорий качества рельсов.

4 По результатам моделирования и экспериментальных исследований определены функциональные коэффициенты, позволяющие учитывать уклоны продольного профиля пути и массы поездов на интенсивность износа рельсов.

3.5 Влияние непогашенного ускорения на интенсивность износа рельсов

3.5.1 Влияние величины положительного непогашенного ускорения на износ рельсов

Скорость движения подвижного состава при выбранных параметрах кривой – радиусе и возвышении наружного рельса – определяет величины непогашенного ускорения [178].

Для установления влияния на износ рельсов величин непогашенного ускорения проведено моделирование движения модели груженого полувагона (см. рисунок 2.7). Моделирование выполнено в кривой R 300 м при возвышении наружного рельса $h = 90, 120, 150$ мм с различными скоростями движения. Показатели взаимодействия колес грузового вагона с рельсами определены для новых профилей рельса и усредненного профиля колес [10, 168]. Параметры компьютерной модели груженого полувагона представлены в таблице 3.26.

Таблица 3.26– Массовые и инерционные параметры модели груженого полувагона [161]

Осевая нагрузка P_{oc} , кгс	23 500
Масса вагона $m_{ваг}$, кг	94 000
Масса кузова $m_{куз}$, кг	84 000
Момент инерции кузова $X I_{куз_X}$, кг*м ²	119 000
Момент инерции кузова $Y I_{куз_Y}$, кг*м ²	1 220 000
Момент инерции кузова $Z I_{куз_Z}$, кг*м ²	1 230 000

Исследовались динамические параметры взаимодействия колес груженого полувагона с рельсами при движении в кривой со скоростями соответствующими значениям непогашенного ускорения от минус 0,3 до 0,3 м/с² с шагом 0,1 м/с². Подробные результаты моделирования представлены в работе [179].

Путем моделирования определены вертикальные и боковые силы в контакте «колесо – рельс», максимальные контактные давления в точках контакта колеса с поверхностью катания рельса от величины непогашенного ускорения при разных возвышениях наружного рельса [179,180]. Во всех рассмотренных вариантах наблюдалось снижение вертикальных и боковых сил на внутреннем рельсе с одновременным повышением на наружном рельсе при увеличении непогашенного ускорения. Характер зависимостей вертикальных и боковых сил от непогашенного ускорения с изменением величин возвышения наружного рельса имеют определенные различия [179]. При возвышении $h = 150$ мм значения вертикальных сил на наружном и внутреннем рельсах имеют одинаковые значения при положительной величине непогашенного ускорения 0,1 м/с². При снижении величин возвышения наружного рельса точки равных значений вертикальных и боковых сил смещаются в зону более высоких значений непогашенных ускорений. При движении полувагона в кривом участке пути от набегающего колеса с увеличением значения непогашенного ускорения наблюдался незначительный рост контактных давлений в первой точке на наружном рельсе при одновременном более интенсивном снижении контактных давлений на внутреннем рельсе. Следует отметить, что на наружном рельсе значения давлений в первой точке контакта ниже, чем на

внутреннем в 1,5...2,2 раза. На наружном рельсе на боковой поверхности контактные давления во второй точке практически не изменялись от величин непогашенного ускорения C с ростом скорости наблюдается рост боковых сил. Сдерживание роста контактных давлений связано очевидно с увеличением площади контакта во второй точке.

В результате выполненного моделирования движения модели груженого полувагона по кривой радиусом 300 м при разных положительных величинах непогашенного ускорения установлено:

- вертикальные и боковые силы, действующие на наружный рельс, возрастают с повышением величин непогашенного ускорения с одновременным снижением вертикальных сил на внутреннем рельсе;

- контактные давления при возвышении $h = 150$ мм возрастают на поверхности катания и боковой грани наружного рельса с повышением величин непогашенного ускорения с одновременным снижением контактных давлений на внутреннем рельсе;

- при снижении возвышения наружного рельса до 120 мм и менее контактные давления на поверхности катания и боковой грани наружного рельса с повышением величин непогашенного ускорения практически оставались без изменений или незначительно повышались с одновременным снижением контактных давлений на внутреннем рельсе;

- мощность сил трения увеличивается как на наружном рельсе в точках контакта 1 и 2, так и на внутреннем рельсе в точке 1 с увеличением значения непогашенного ускорения.

Проведенные расчеты показывают, с увеличением непогашенных ускорений происходит рост боковых сил, контактных давлений, мощности сил трения и повышается износ наружного рельса. Аналогичные выводы делаются в работах [89, 173, 174, 180].

3.5.2 Влияние величин отрицательных непогашенного ускорений на износ рельсов

В ряде работ [181–184] отмечается, что длительное снижение скорости в кривой по сравнению с равновесной более вредно, чем повышение, и не потому, что перегружается внутренняя рельсовая нить, а потому, что недопустимо разгружается наружная. Разгрузка наружной рельсовой нити ведет к увеличению интенсивности бокового износа рельсов и гребней колес, а не к уменьшению.

В работах [181, 182, 184] рассмотрен случай движения экипажей при избытке возвышения наружного рельса. Распределения центробежной, силы тяжести от величин непогашенных ускорений исследовано в работе [182].

Избыток возвышения наружного рельса в крутых кривых вызывает перераспределение продольного скольжения колес из-за их жесткой насадки на оси с внутренней на наружную рельсовую нить [181, 184]. Это основная причина перераспределения износа рельсов с внутренней на наружную рельсовую нить. При этом чрезвычайную роль играет образующийся эффект «точила» при совместном круговом и продольном скольжении гребня по боковой грани наружного рельса в кривых вследствие забега z контакта гребня по сравнению с контактом обода колеса [181].

Если имеется избыток возвышения, т. е. если сопротивление скольжению по наружному рельсу меньше, чем по внутреннему, то происходит продольное скольжение колеса по наружному рельсу по направлению движения. В тележке колесные пары связаны боковинами, надрессорной балкой и рессорами. В этом случае продольная движущая сила приложена к подпятнику и практически всегда в режиме тяги и выбега направлена по направлению движения.

Для экспериментального определения зависимостей интенсивности износа от уровня отрицательных непогашенного ускорения на БМО Голутвинской дистанции пути были заложены 18 опытных участков с кривыми разного радиуса

(Приложение 1). Подробные исследования по влиянию уровня отрицательных непогашенных ускорений на интенсивность износа рельсов представлены в работе [179].

На основании экспериментальных данных [179] получены зависимости изменения интенсивности бокового износа рельсов от величин отрицательного непогашенного ускорения. Экспериментальные данные и аппроксимирующая их кривая представлены на рисунке 3.18.

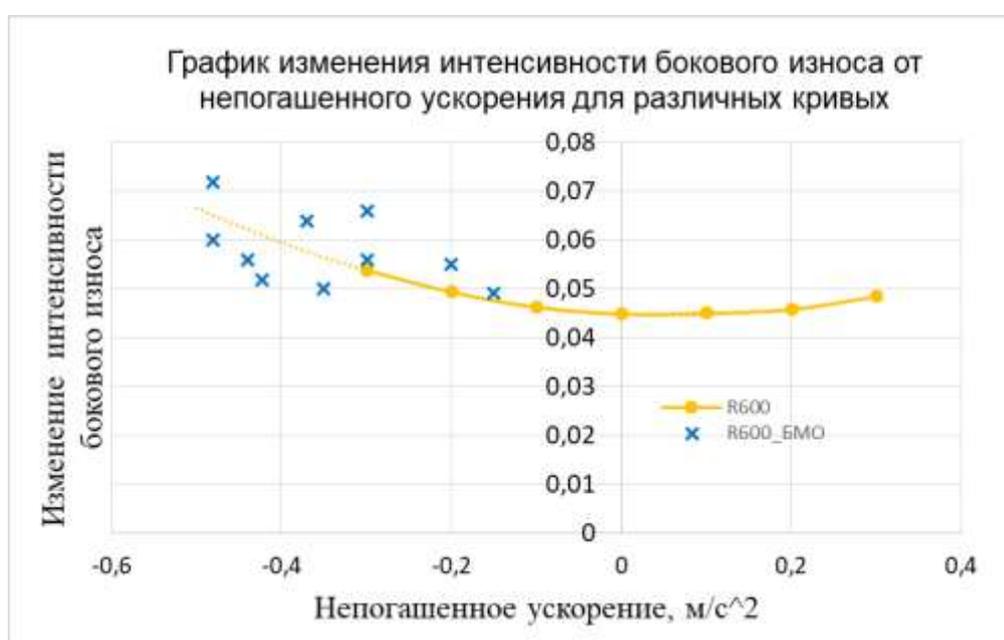


Рисунок 3.18 – Зависимости изменения интенсивности бокового износа рельсов от величин отрицательного непогашенного ускорения по экспериментальным данным, полученным в условиях Московской ДИ

На основании экспериментально полученных зависимостей установлены функциональные коэффициенты, определяющие влияние отрицательных величин непогашенных ускорений на интенсивность износа рельсов.

По результатам моделирования процесса изнашивания при положительных значениях ускорений и результатов экспериментально полученных зависимостей отрицательных величин непогашенных ускорений определены «базовые интен-

сивности» бокового и вертикального износа рельсов от величин непогашенного ускорения.

Зависимости «базовой интенсивности» бокового износа наружного рельсов от величин непогашенного ускорения для кривых участков пути разных радиусом представлены в таблице 3.27.

Таблица 3.27– Значения базовой интенсивности бокового износа наружного рельса от величин непогашенного ускорения для кривых участков пути разных радиусов

Радиус кривой R, м	Непогашенное ускорение a , м/с ²						
	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3
300	0,142782	0,12873	0,118418	0,113319	0,114452	0,118985	0,129295
400	0,09966	0,090257	0,083666	0,080371	0,080853	0,083988	0,090016
500	0,073272	0,066665	0,062161	0,060059	0,060359	0,062221	0,066065
600	0,053885	0,049394	0,046251	0,044904	0,045084	0,045802	0,048496

Функциональные коэффициенты, определяющие интенсивность бокового износа рельсов от величины непогашенного ускорения для кривых участков пути разного радиуса приведены на рисунке 3.19.

Зависимости базовой интенсивности вертикального износа наружного рельса от величин непогашенного ускорения для кривых участков пути разных радиусом представлены в таблице 3.28.

Таблица 3.28 – Значения базовой интенсивности вертикального износа наружного рельса от величин непогашенного ускорения для кривых участков пути разных радиусов

Радиус кривой R, м	Непогашенное ускорение a , м/с ²						
	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3
300	0,011733	0,011991	0,012259	0,012536	0,012823	0,01312	0,01342652
400	0,010131	0,010304	0,010492	0,010693	0,010909	0,011139	0,01138279
500	0,00802	0,008141	0,00827	0,008407	0,008551	0,008702	0,00886072
600	0,007145	0,007203	0,007273	0,007355	0,007449	0,007556	0,00767432

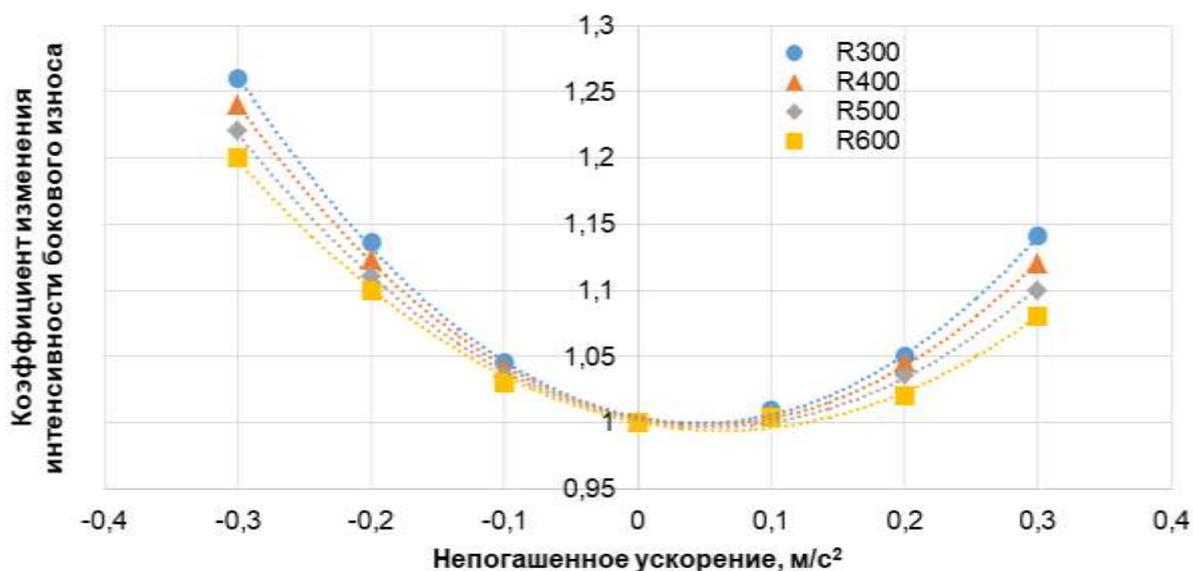


Рисунок 3.19 – Изменение функциональных коэффициентов, определяющих интенсивность бокового износа рельсов от величины непогашенного ускорения для кривых участков пути разного радиуса

Функциональные коэффициенты, определяющие интенсивность вертикального износа наружного рельса от величин непогашенного ускорения для кривых участков пути разного радиуса приведены на рисунке 3.20.

Зависимости базовой интенсивности вертикального износа внутреннего рельса от величин непогашенного ускорения для кривых участков пути разных радиусом представлены в таблице 3.29.

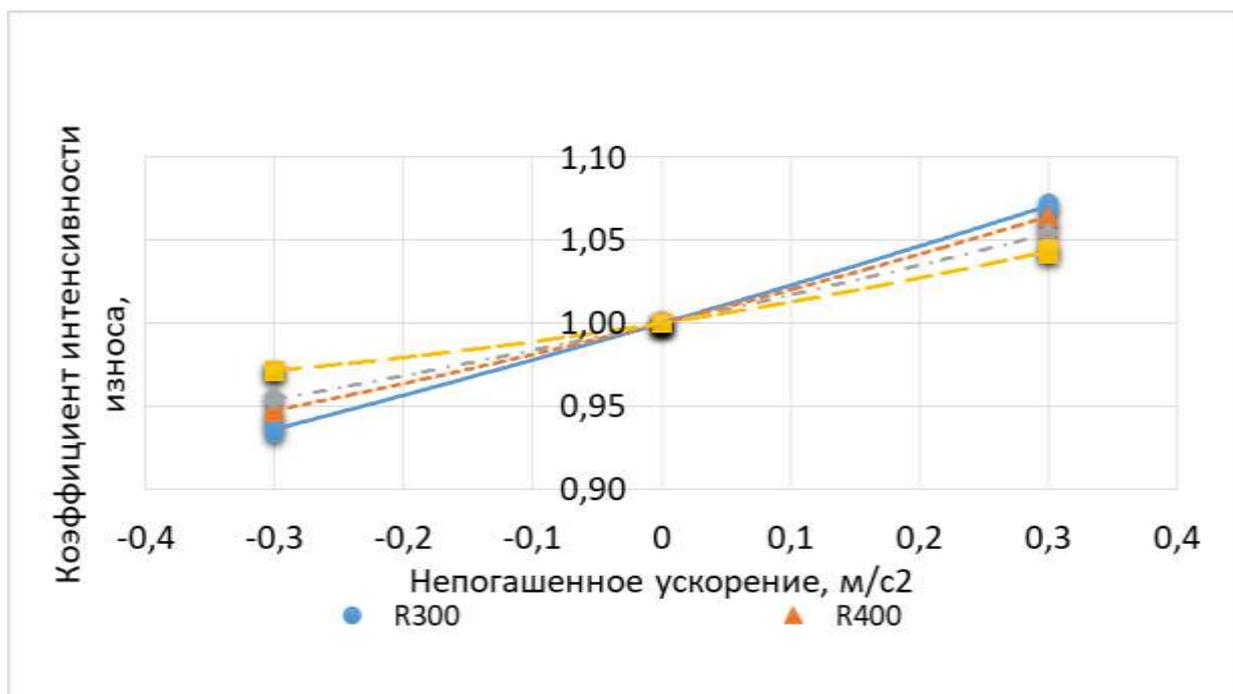


Рисунок 3.20 – Изменение функциональных коэффициентов, определяющих интенсивность вертикального износа наружного рельса от величины непогашенного ускорения для кривых участков пути разного радиуса

Таблица 3.29 – Значения базовой интенсивности вертикального износа внутреннего рельсов от величин непогашенного ускорения для кривых участков пути разных радиусов

Радиус кривой R, м	Непогашенное ускорение a , м/с ²						
	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,1	0,2	0,3
300	0,022263	0,021488	0,020825	0,020273	0,019833	0,019504	0,0192872
400	0,017513	0,017028	0,016605	0,016246	0,01595	0,015717	0,01554721
500	0,012951	0,012745	0,012551	0,01237	0,012201	0,012044	0,01189975
600	0,009213	0,009128	0,009041	0,008953	0,008863	0,008772	0,00868003

Функциональные коэффициенты, определяющие интенсивность вертикального износа наружного рельса от величин непогашенного ускорения для кривых участков пути разного радиуса приведены на рисунке 3.21.

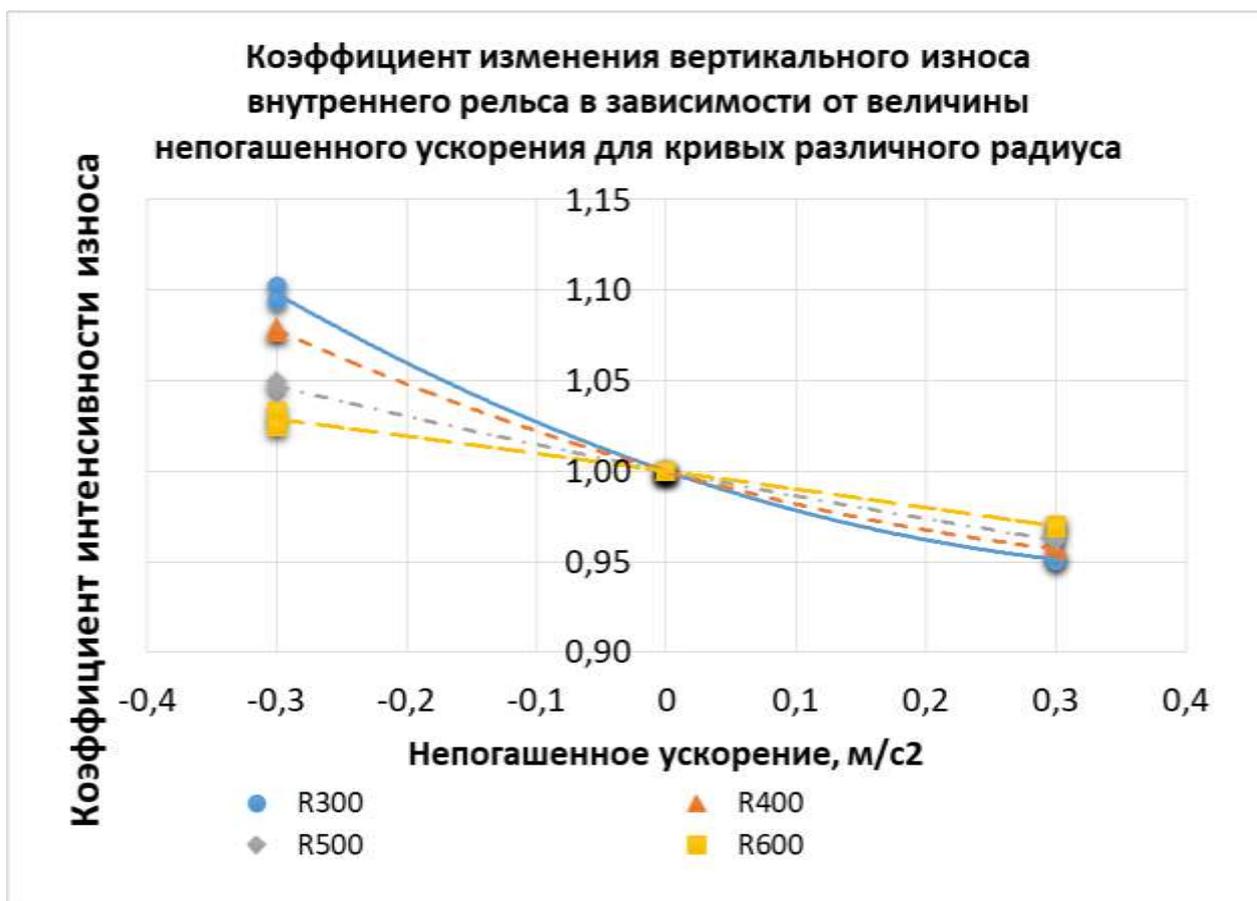


Рисунок 3.21 – Изменение функциональных коэффициентов, определяющих интенсивность вертикального износа внутреннего рельса от величины непогашенного ускорения для кривых участков пути разного радиуса

Установлено, что функциональные коэффициенты слабо зависят от величин возвышения наружного рельса. Это позволяет использовать единую функциональную зависимость для разных возвышений наружного рельса в пределах эксплуатационных интервалов их использования.

Функциональные коэффициенты, определяющие влияние непогашенного ускорения на интенсивность износа рельсов позволяют откорректировать базовые интенсивности износа (см. таблицу 5.2) с учетом полученных коэффициентов и рассчитать фактическую интенсивность износа рельсов в соответствии с выражениями раздела 2.

3.6 Влияние типа промежуточных рельсовых креплений на интенсивность износа рельсов

В последнее время на российских железных дорогах внедрены и эксплуатируются несколько типов промежуточных рельсовых креплений. Для оптимизации разработаны сферы рационального применения конкретных типов креплений [185]. В зависимости от типа и конструктивного исполнения промежуточных рельсовых креплений крутильная и вертикальная жесткость рельсов отличается. При движении подвижного состава происходит боковое отжатие головки рельса из-за действия боковых сил от колес подвижного состава. Величина бокового отжатия зависит от величины боковых сил, вертикального пригруза рельса и его крутильной жесткости, которая зависит от типа применяемых креплений.

Известно ряд критериев [173,175,186,187], с использованием которых можно оценить влияние на износ рельса: режимов движения колеса, продольное скольжение гребня, зависящее от режима движения, размера колеса, угла наклона гребня, радиуса колеса и глубины точки контакта гребня.

Для анализа влияния крутильной жесткости креплений на износ рельсов воспользуемся критерием предложенным проф.В.А. Шевалиным [187]

$$\Phi = \frac{Y\omega_0 f}{\text{Sin}\gamma 2\pi(R+\alpha)} \quad (3.4)$$

где Y – поперечная направляющая сила, действующая от колеса на рельс;

f – коэффициент трения между колесом и рельсом;

γ – угол наклона в точках контакта гребня или его выкружки с рельсом, измеряемый от горизонтали;

ω_0 – результирующее скольжение гребня колеса по рельсу, представляющее собой геометрическую сумму продольного и поперечного скольжений;

R – радиус колеса;

α – расстояние от поверхности катания рельсовой головки до контакта гребня

колеса с рельсом (глубина точки контакта).

Из анализа параметров, входящих в формулу фактора износа, следует отметить, что боковое отжатие («динамическая разуклонка») будет оказывать влияние на изменения угла наклона гребня γ и глубины касания гребня и боковой поверхности рельса, приведенную площадь контакта гребня колеса с боковой поверхностью головки рельса. Это определяет влияние типа креплений на интенсивность бокового износа рельсов. В работе [188] делается вывод о снижении интенсивности бокового износа рельсов при применении промежуточных рельсовых креплений с упругими клеммами. При этом количественные показатели интенсивности износа при использовании клемм СМ-1 снижаются на 20...24 % по сравнению с конструкцией пути при использовании клемм с жесткой клеммой КБ-65. В работе [16] на основании эксплуатационных наблюдений делается вывод о влиянии конструкций рельсовых креплений на интенсивность износа рельсов. При этом, чем круче кривая, тем в большей степени интенсивность износа зависит от типа креплений. При этом лучшими качествами по снижению износа обладают подкладочные крепления ЖБР-65ПШР, ЖБР-65ПШМ.

Для уточнения влияния типов промежуточных рельсовых креплений на износ специалистами АО «ВНИКТИ» проведен комплекс экспериментальных и теоретических исследований, результаты которых представлены в работе [189]. Учитывая, что в условиях эксплуатации на износ действует, как правило, одновременно несколько факторов, специалистами АО «ВНИКТИ» для установления влияния крутильной жесткости креплений на интенсивность износа использован метод моделирования процесса изнашивания наружных рельсов в кривых участках пути при разных значениях крутильной жесткости. На первом этапе проведены экспериментальные исследования по определению крутильной жесткости рельсов при разных типах промежуточных рельсовых креплений. Для этого выбирались участки пути, где уложены крепления ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65, ЖБР-65ПШР, АРС-4, W-30 (Фоссло), ПКФ-350 (Пандрол), КБ-65.

Измерение крутильной жесткости проводилось с использованием попереч-

ной винтовой тяги и балочных прогибомеров. Общий вид устройства представлен на рисунке 3.22. Поперечная тяга на концах оборудована съемными упорами, охватывающими внутреннюю часть головок наружного и внутреннего рельса. Тяга оборудована измерительными тензодатчиками, соединенными по схеме, исключаящими изгиб. Предварительно измерительная схема тарировалась путем приложения сжимающего усилия за счет винтового механизма, установленного в средней зоне тяги. Боковое отжатие головки рельса измерялось с использованием балочных прогибомеров, закрепленных на свайке, которая забивалась в пространство между концами шпал. Балочные прогибомеры тарировались с использованием мерных пластин толщиной 0,5; 1; 1,5 мм. Для исключения замыкания рельсовых цепей правая и левая части винтовой тяги конструктивно разобщены посредством текстолитовых шайб.

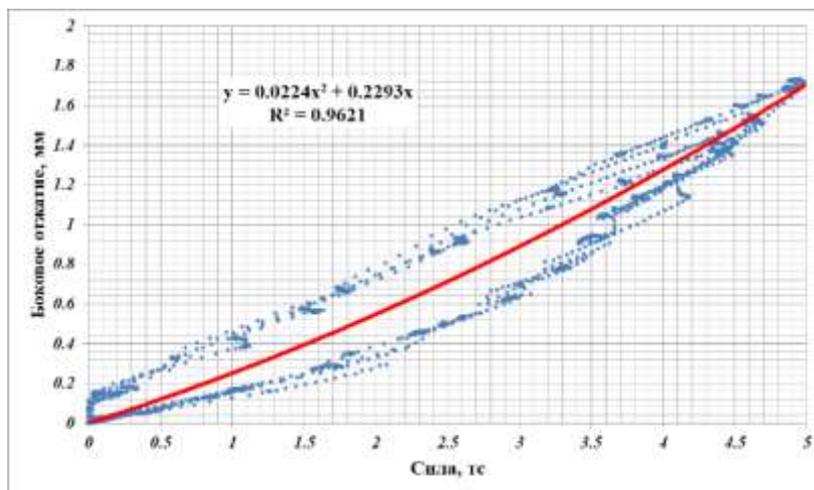


Рисунок 3.22 – Общий вид винтовой тяги для создания поперечного нагружения рельсов

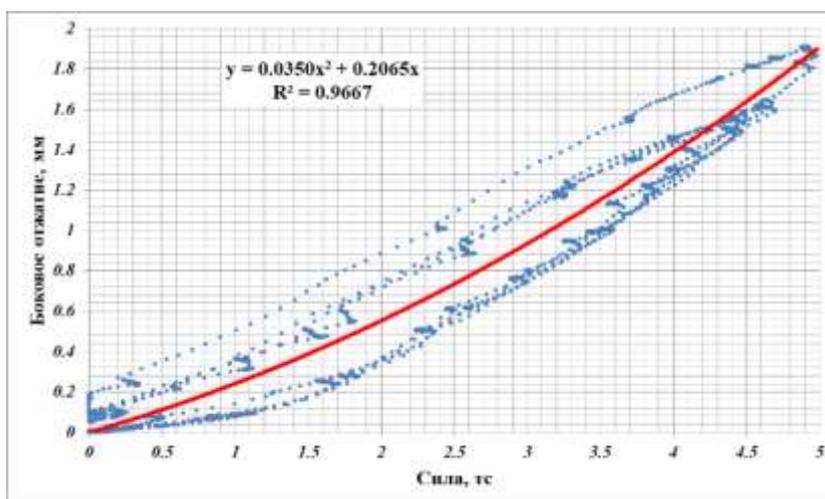
При проведении измерений выполнялось вращение винтовой пары посредством ключа, что приводило к возникновению усилий отжатия головок наружного и внутреннего рельсов. Производилось плавное нагружение усилием до 40 кН с последующим плавным разгрузением. Сигналы с измерительных схем

винтовой тяги и балочного прогибомера синхронно регистрировались с использованием измерительного комплекса МИС-026 фирмы «Мера».

Типовые диаграммы нагружения/разгружения рельса боковыми силами на скреплениях ПКФ-350 («Пандрол») представлены на рисунке 3.23.



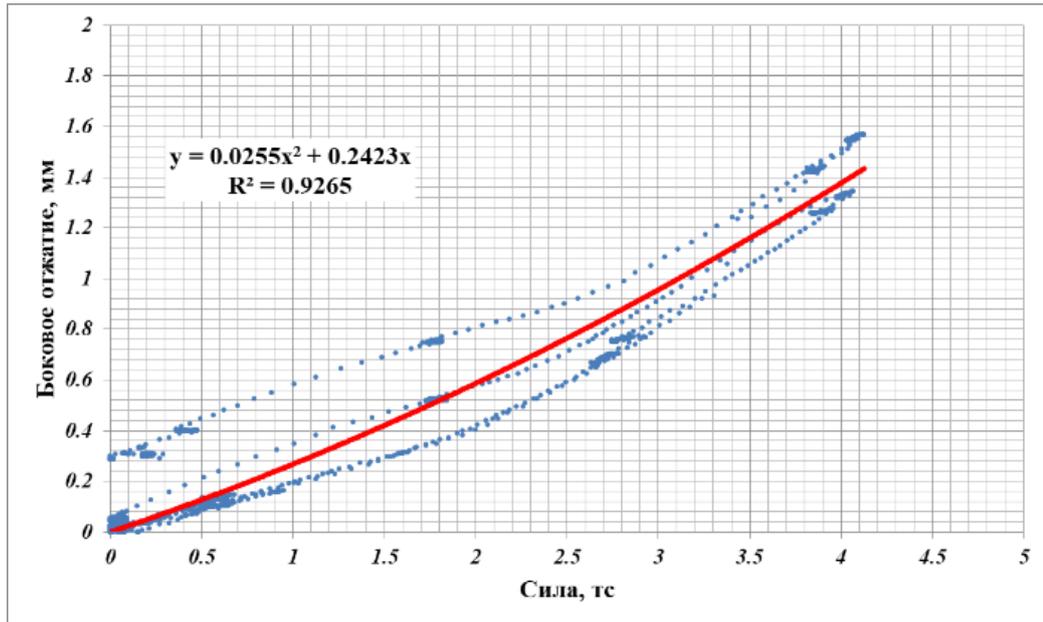
а)



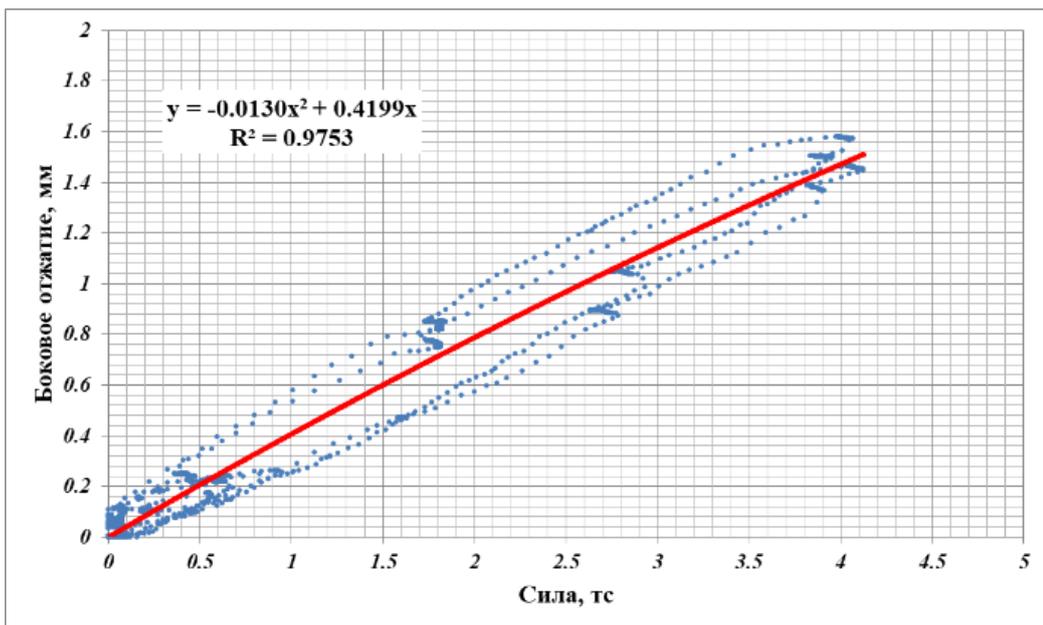
б)

Рисунок 3.23 – Диаграмма нагружение/разгружение наружного (а) и внутреннего (б) рельсов в кривом участке пути R 600 м на скреплениях ПКФ-350 («Пандрол»)

Типовые диаграммы нагружения/разгружения рельса боковыми силами на скреплениях ЖБР-65ПШМ представлены на рисунке 3.24.



а)



б)

Рисунок 3.24 – Диаграмма нагружение/разгружение наружного (а) и внутреннего (б) рельсов в кривом участке пути R 565 м на скреплениях ЖБР-65ПШМ

Аналогичные диаграммы были получены для скреплений ЖБР-65, ЖБР-65ПШР, АРС-4, W-30 (Фоссло), КБ-65.

По экспериментально полученным диаграммам нагружение/разгружение определялась крутильная жесткость рельсов, закрепленных на шпалах с

использованием разных типов креплений. Расчетная схема для определения крутильной жесткости рельса представлена на рисунке 3.25.

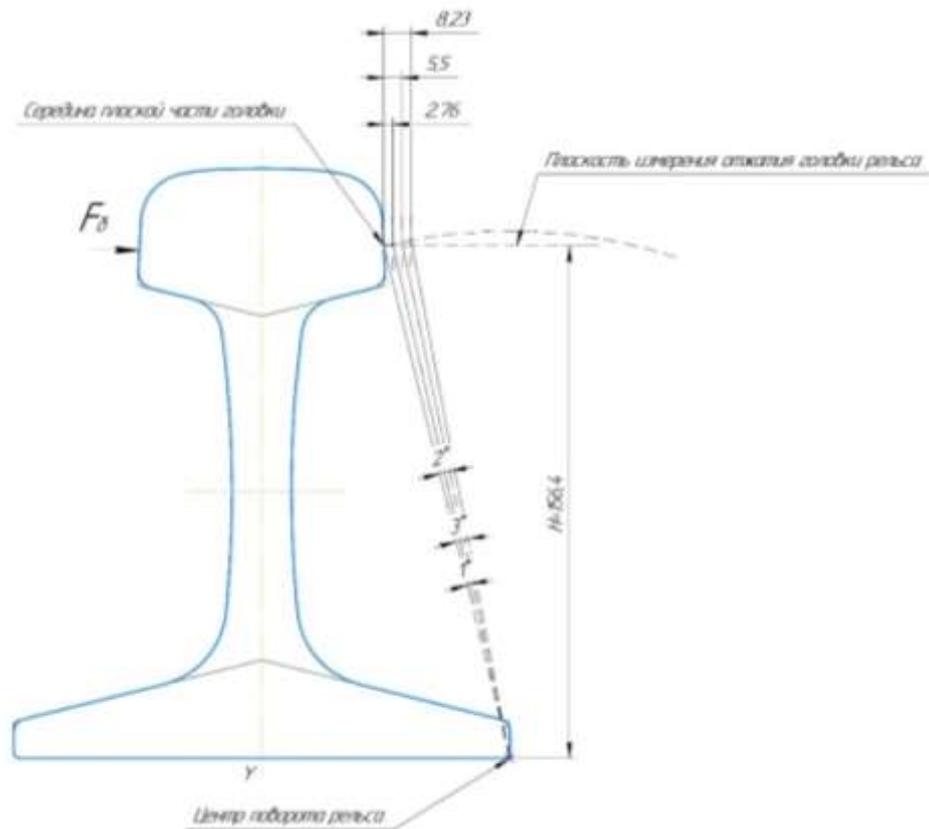


Рисунок 3.25 – Расчетная схема определения крутильной жесткости рельса

Крутильная жесткость рельса определялась из выражения:

$$C_{кр} = \frac{F_B \cdot H}{\gamma}, \quad (3.9)$$

где F_B – боковая сила, Н;

H – плечо приложения силы, м;

γ – угол поворота, рад.

С учетом выражения (1) определены значения угла поворота от величины бокового перемещения головки рельса.

Определенные экспериментально-расчетным путем значения крутильной жесткости рельсов, прикрепленных к шпалам разными типами промежуточных рельсовых креплений [189], представлены в таблице 3.30.

Таблица 3.30 – Экспериментально-расчетные значения крутильной жесткости рельсов от типа промежуточных рельсовых креплений

Тип крепления	Рельс	Боковая сила, кН	Плечо, м	Боковое отжатие головки рельса, мм	Угол поворота, рад	Крутильная жесткость, кН*м/рад	Среднее значение крутильной жесткости, кН*м/рад	
	АРС-4	левый	39,2	0,1564	1,34	0,0086	715,1	728,1
	правый	39,2	0,1564	1,29	0,0083	741,1		
	ЖБР-65	левый	39,2	0,1564	1,74	0,0111	551,7	533,6
	правый	39,2	0,1564	1,86	0,0119	515,6		
	ЖБР-65ПШМ	левый	39,2	0,1564	1,38	0,0088	696,4	673,9
	правый	39,2	0,1564	1,47	0,0094	651,4		
	ЖБР-65ПШР	левый	39,2	0,1564	1,28	0,0082	747,6	725
	правый	39,2	0,1564	1,37	0,0087	704		
	PANDROL	левый	39,2	0,1564	1,28	0,0082	751,5	721,7
	правый	39,2	0,1564	1,39	0,0089	691,9		
	VOSSLON	левый	39,2	0,1564	1,61	0,0103	594,9	611,4
	правый	39,2	0,1564	1,53	0,0098	628,0		
	КБ 65	левый	39,2	0,1564	2,45	0,0157	391,1	397,8
	правый	39,2	0,1564	2,37	0,0152	404,4		

Полученные значения крутильной жесткости рельсов при разных типах креплений позволяют идентифицировать тип креплений при проведении расчетов по износу рельсов с учетом крутильной жесткости. В условиях эксплуатации боковые отжатия головки рельсов происходят при вертикальном пригрузе от воздействия колес подвижного состава. Это определяет разницу в величинах бокового отжатия головки рельсов, выполненных при нагруженном и ненагруженном состояниях пути. Для установления различий в боковых отжатиях при нагруженном пути и без были выполнены измерения боковых отжатий рельсов при движении поезда по измерительным участкам на спуске 17,1 % в кривых участках пути

с радиусами $R 298$ м и $R 565$ м на скреплениях ЖБР-65ПШМ в условиях Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской ДИ [189].

На рисунке 3.26 представлены осциллограммы боковых отжатий головки рельсов и синхронно действующих от колес подвижного состава боковых сил в кривом участке пути радиусом $R 298$ м на скреплениях ЖБР-65ПШМ.

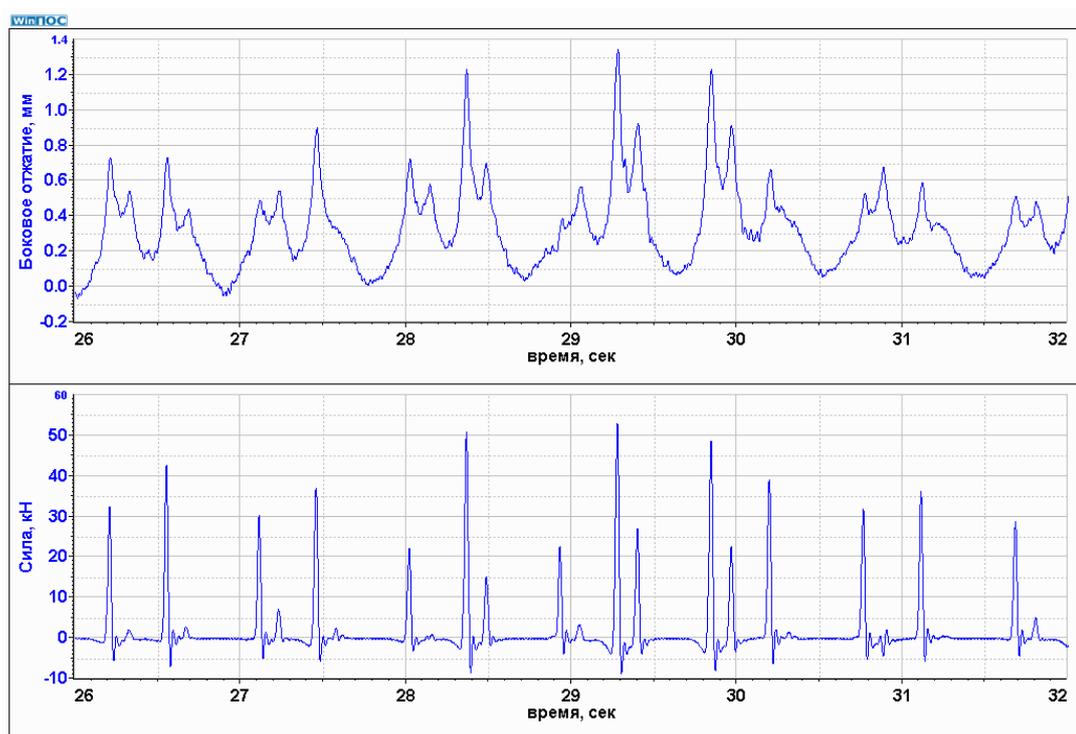


Рисунок 3.26 – Осциллограммы боковых отжатий головки наружного рельса и синхронно действующих от колес подвижного состава боковых сил в кривом участке пути радиусом $R 298$ м на скреплениях ЖБР-65ПШМ

На рисунке 3.27 представлены осциллограммы боковых отжатий головки рельсов и синхронно действующих от колес подвижного состава боковых сил в кривом участке пути радиусом $R 565$ м на скреплениях ЖБР-65ПШМ.

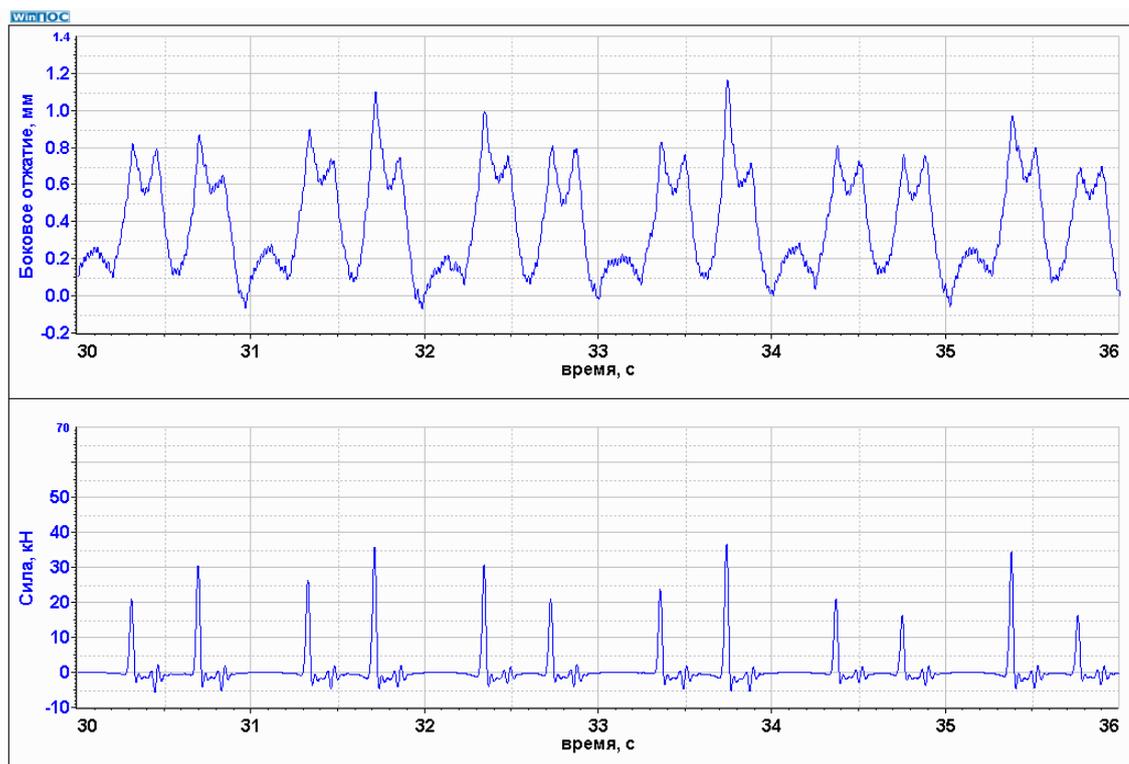


Рисунок 3.27 – Осциллограммы боковых отжатий головки наружного рельса и синхронно действующих от колес подвижного состава боковых сил в кривом участке пути радиусом $R 565$ м на скреплениях ЖБР-65ПШМ

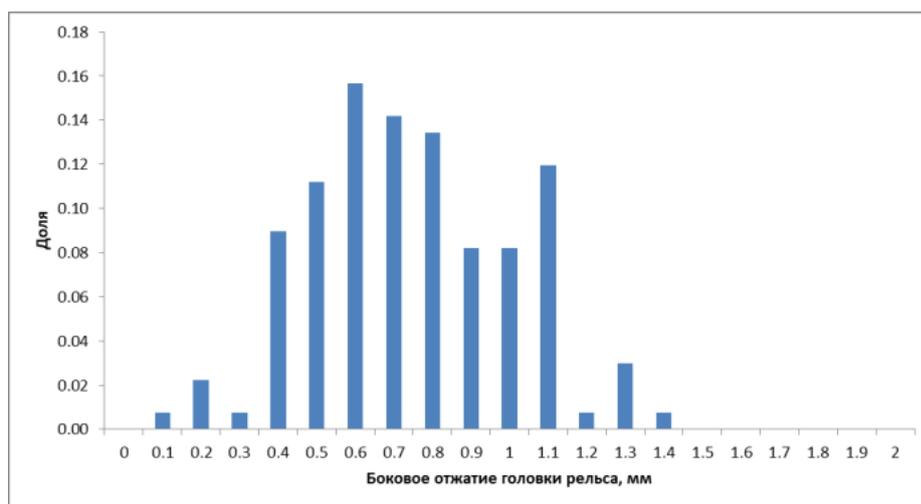
Анализ величин боковых отжатий наружного рельса под проходящим поездом показал:

- отжатие наружного рельса определяется не кратковременным воздействием на измерительное сечение набегающего колеса, а суммарным действием колес тележки, что определяет боковое отжатие рельса на базе тележки. Поэтому продолжительность динамической разуклонки определяться базой тележки и скоростью движения. Это в свою очередь определяет большее время и путь скольжения гребня колеса по боковой грани рельса при разуклонке;
- имеется разница в величинах боковых отжатий головки рельсов с одинаковыми типами промежуточных рельсовых скреплений при нагружении рельса боковым усилием в свободном состоянии и под проходящим поездом.

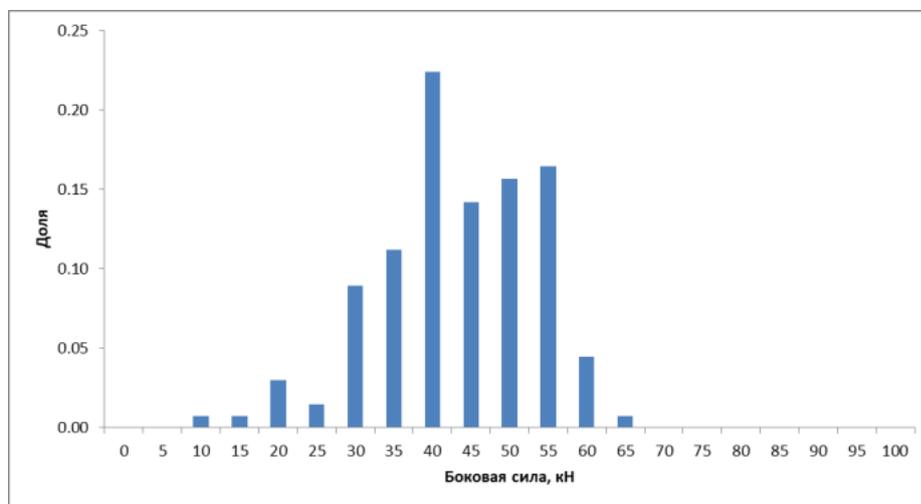
Величины боковых отжатий головки наружного и внутреннего рельсов

носят вероятностный характер. Для определения параметров распределений боковых отжатий и соответствующих им боковых сил выполнен статистический анализ.

На рисунке 3.28 представлены гистограммы величин боковых отжатий и боковых сил, зарегистрированных в кривых участках пути радиусами R 298 м.



а)



б)

Рисунок 3.28 – Гистограммы распределения на наружном рельсах боковых отжатий (а) и боковых сил (б) в кривом участке пути радиусами R 298 м на креплениях ЖБР-65ПШМ

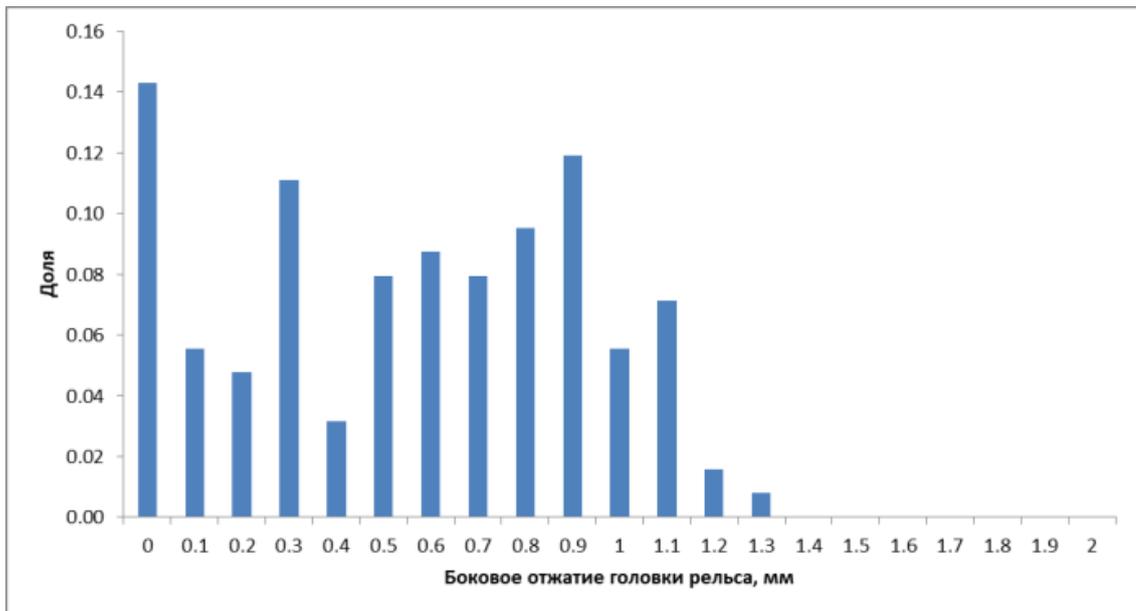
Статистические характеристики боковых отжатий и боковых сил наружного рельса от воздействия груженых полувагонов в кривом участке пути радиусами R 298 м на креплениях ЖБР-65ПШМ представлены в таблице 3.31.

Таблица 3.31 – Статистические характеристики по боковым отжатым и боковым силам наружного рельса от воздействия груженых полувагонов в кривом участке пути радиусами R 298 м

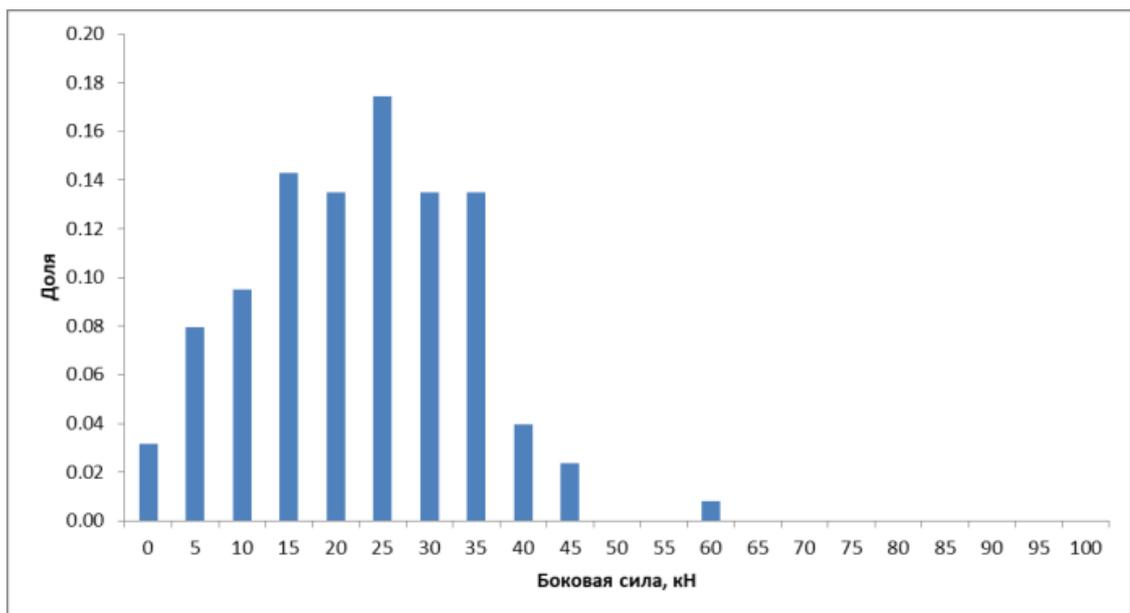
Параметр	Боковые силы на наружном рельсе, мм	Боковые силы на наружном рельсе, кН
Среднее	0,69	40,58
Стандартное отклонение	0,26	10,18
Дисперсия выборки	0,07	103,6
Минимум	0,08	5,1
Максимум	1,33	61,9

На рисунке 3.29 представлены гистограммы величин боковых отжатым и боковых сил, зарегистрированных в кривом участке пути радиусами R 565 м.

Статистические характеристики боковых отжатым и боковых сил наружного рельса от воздействия груженых полувагонов в кривом участке пути радиусами R 565 м на креплениях ЖБР-65ПШМ представлены в таблице 3.32.



а)



б)

Рисунок 3.29 – Гистограммы распределения на наружном рельсах боковых отжатий (а) и боковых сил (б) в кривом участке пути радиусами R 565 м на креплениях ЖБР-65ПШМ

Таблица 3.32 – Статистические характеристики по боковым отжатым и боковым силам наружного рельса от воздействия груженных полувагонов в кривом участке пути радиусами R 565 м

Параметр	Боковые силы на наружном рельсе, мм	Боковые силы на наружном рельсе, кН
Среднее	0,49	20,13
Стандартное отклонение	0,39	11,47
Дисперсия выборки	0,15	131,7
Минимум	0,32	- 10,75
Максимум	1,28	59,69

Анализ вероятностных характеристик боковых отжатий и боковых сил действующих на наружный рельс от проходящих поездов показал:

- значения боковых отжатий наружного рельса при нагружении последнего под поездной нагрузкой и без при одинаковых значениях боковых сил имеют существенные различия;

- фактические величины боковых отжатий в кривых малого радиуса R 298 м не превышали 1,2...1,3 мм, средние величины боковых отжатий составили 0,69 мм при средних значениях боковых сил 40,58 кН и среднеквадратических отклонениях 10,2 кН;

- с увеличением радиуса кривой до R 565 м величины боковых сил снизились, средних значения составили 20,13 кН и среднеквадратических отклонениях 11,47 кН. При этом средние величины боковых отжатий составили 0,49 мм при среднеквадратических отклонениях 0,39 мм;

- величины боковых отжатий на скреплениях ЖБР-65ПШМ при квазистатическом нагружении рельса винтовой тягой в свободном состоянии усилием 39,2 кН составили 1,38...1,47 мм. Средние величины боковых отжатий головки наружного рельса под поездом при близких значениях боковых сил 40,6 кН в кривой R 298 м составили 0,69 мм, что меньше в 2...2,13 раза.

Таким образом, для практического применения данных по крутильной жесткости рельсов приведенных в таблице 3.33 при определении фактической

динамической разуклонке рельсов с учетом вертикального пригруза от колес груженых грузовых вагонов предложен коэффициент $K_{\text{приг.}} = 2$, учитывающий снижение динамической разуклонки за счет вертикального пригруза от колес подвижного состава.

Рассмотрим влияние динамической разуклонки рельсов на изменение точек контакта колеса с рельсом.

При нормативной подуклонке 0,05 (1/20) [190] значение угла между линией горизонта шпалы и линией подошвы рельса составляет $2,86^\circ$ (см. рисунок 3.30). При возникновении бокового усилия на головку рельса, происходит поворот рельса относительно внешнего края подошвы рельса. При возникновении бокового усилия 40 кН характерного для серийных грузовых вагонов при движении в кривой R 300 м. Для большинства современных типов скреплений в ненагруженном состоянии рельса это определяет поворот на угол $0,009 \dots 0,011$ рад или на $0,5 \dots 0,65^\circ$. При повороте на 1° угол между линией горизонта шпалы и линией подошвы рельса будет составлять $1,86^\circ$, что соответствует значению подуклонки 0,0325.

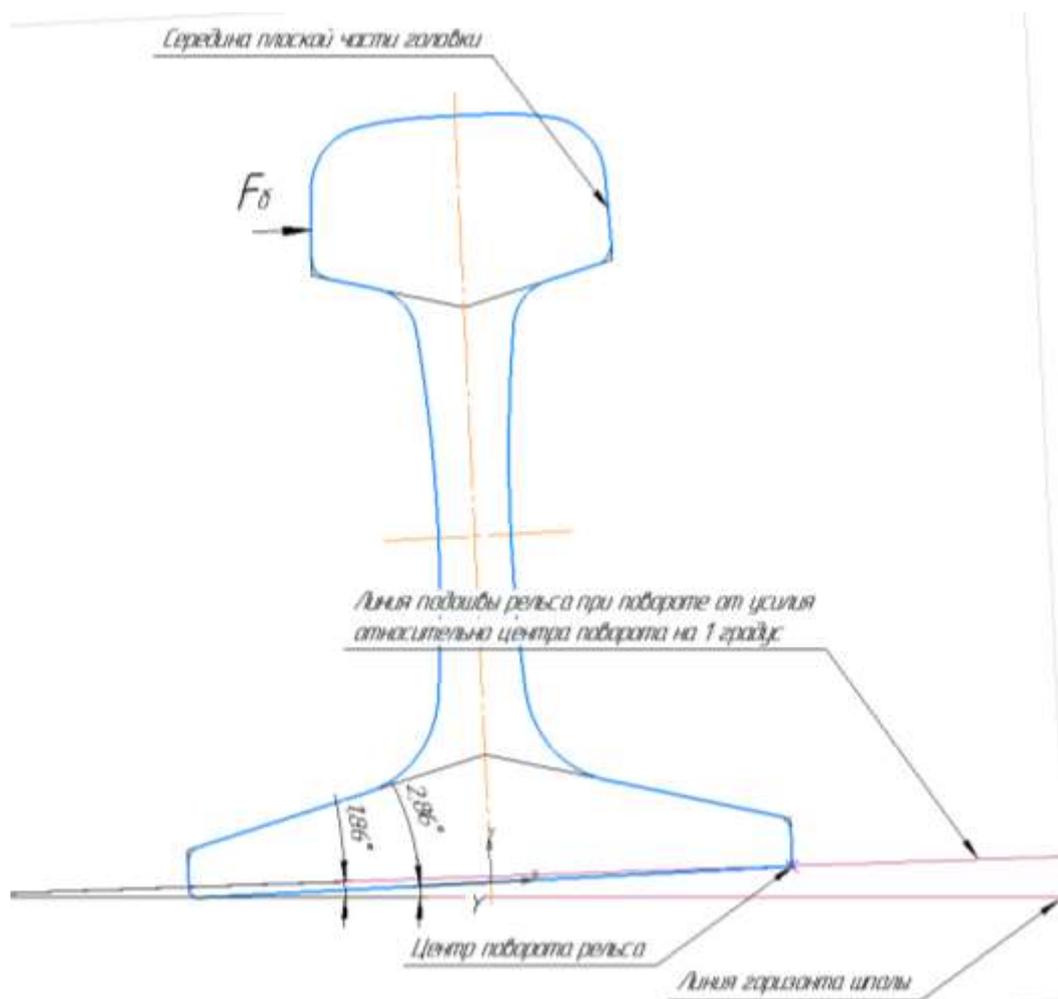


Рисунок 3.30– Расчетная схема динамической разуклонки рельса

На рисунке показаны контактные точки на профилях при различных значениях подуклонки рельса: 0,05 (1/20) и 0,0325 (1/30). Красным выделен отрезок, который соответствует текущему значению смещения. Для рельса использовался профиль Р65, для колеса – среднесетевой профиль.

Для определения количественных показателей износа рельсов от типов применяемых на российских железных дорогах промежуточных рельсовых креплений выполнено моделирование процесса изнашивания рельсов от их крутильной жесткости, определяемой в первую очередь крутильной жесткостью креплений.

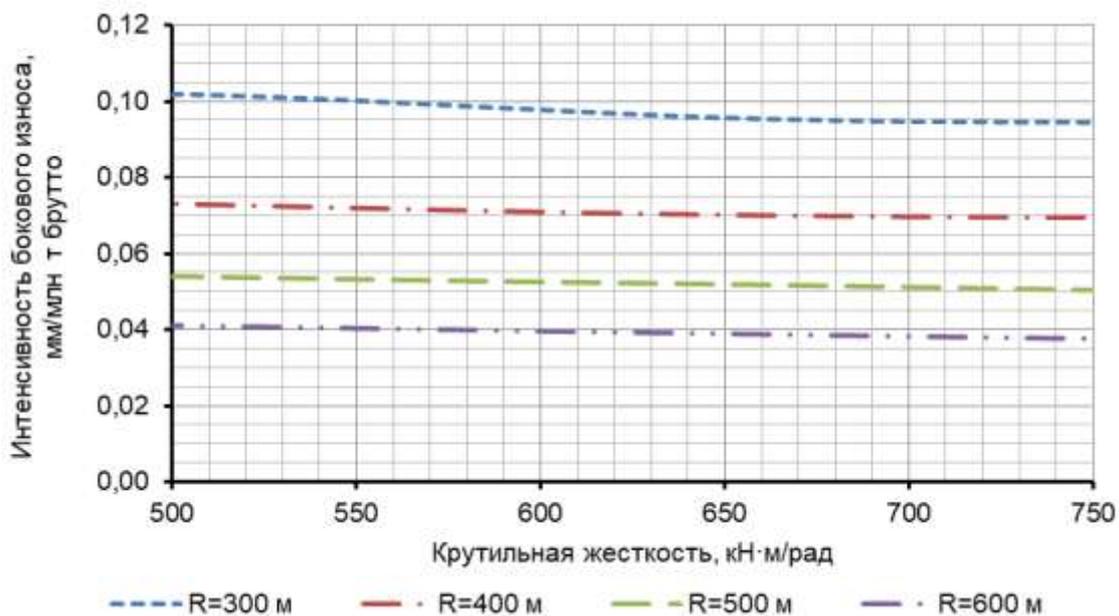
В программном комплексе «Универсальный механизм» для моделирования различных типов креплений используется идентификатор «Крутильная жест-

кость» [162], задание которого обеспечивает необходимый уровень поперечного перемещения головки рельса.

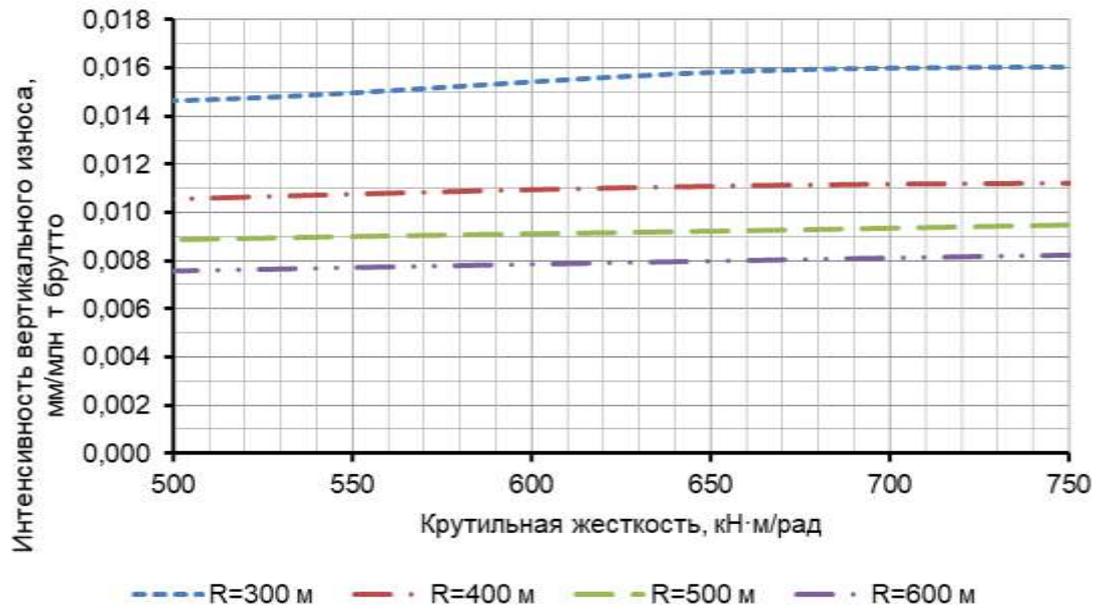
Подобрав значение крутильной жесткости соответствующей конкретному типу креплений, можно смоделировать процесс изнашивания наружного и внутреннего рельсов с учетом боковых перемещений головки наружного рельса от воздействия колес подвижного состава и фактического пятна контакта гребня колеса и головки рельса.

Для исследования влияния крутильной жесткости узла креплений на интенсивность износа рельсов проведены расчеты для кривых с радиусами R 300 м, R 400 м, R 500 м и R 600 м [189].

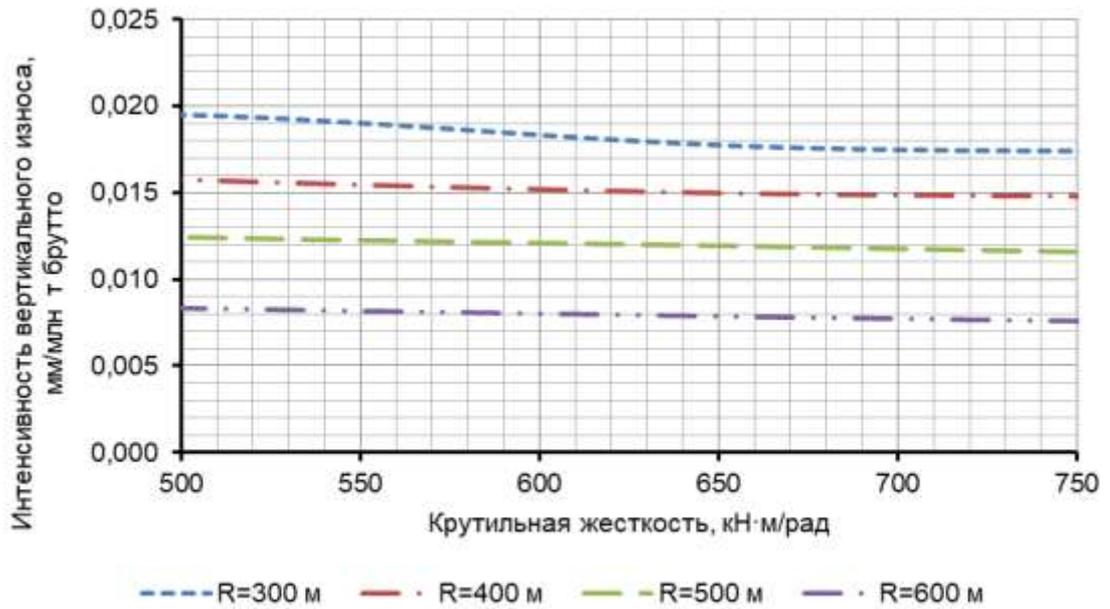
На рисунке 3.31 представлены графики изменения бокового и вертикального износа рельсов от значений крутильной жесткости при моделировании в кривых различного радиуса от воздействия колес базового полувагона с осевой нагрузкой 230 кН при движении с равновесной скоростью.



а)



б)



в)

Рисунок 3.31–.Интенсивности бокового (а), вертикального износа наружного рельса (б) и вертикального износа внутреннего рельса (в) от крутильной жесткости рельса в кривых разных радиусов от воздействия груженных полувагона

Анализ результатов расчетных данных интенсивностей износа рельсов показал, что с повышением крутильной жесткости с 500 до 750 кН*м/рад, что соответствует диапазону современных рельсовых скреплений, интенсивность бокового износа наружного и вертикального внутреннего рельсов – в кривой R 300 м снижается на 8 %, на наружном рельсе вертикальный износ возрастает на 8,3 %. С увеличением радиуса кривой общая интенсивность снижается, при этом влияние крутильной жесткости также уменьшается. Так при увеличении радиуса кривого участка с R 300 до R 600 м интенсивность бокового износа для рельсов ДТ350 при равновесной скорости движения снизилась с 0,105 мм/млн т брутто до 0,044 мм/млн т брутто или в 2,38 раза, при этом в кривой R 600 м при повышении крутильной жесткости с 500 до 750 кН*м/рад интенсивность бокового износа снизилась на 4,6 %. Вертикальный износ наружного рельса наоборот повысился на 4,9 %. Для внутреннего рельса зависимость близка по характеру к боковому износу наружного рельса и также увеличилась на 5,2 %.

Таким образом, наиболее значимое влияние промежуточные рельсовые скрепления оказывают в кривых участках пути малого радиуса $R \leq 350$ м, а также при более низких значениях крутильной жесткости (530 кН*м/рад), когда динамическая разуклонка имеет наибольшие значения, достигая 8...9 %. При кривых средних радиусов $350 \text{ м} < R \leq 650 \text{ м}$ и скреплениях с крутильной жесткостью 650...750 кН*м/рад влияние промежуточных рельсовых скреплений на износ рельсов не превышает 4...6 %. Полученные значения бокового и вертикального износа рельсов для «базовых условий» с учетом крутильной жесткости рельса, позволяют откорректировать значения интенсивности износа с учетом применяемых типов промежуточных рельсовых скреплений.

По результатам моделирования определены зависимости изменения коэффициента интенсивности износа от крутильной жесткости. На рисунке 3.32 представлена зависимости изменения коэффициента интенсивности бокового износа от крутильной жесткости рельсов.

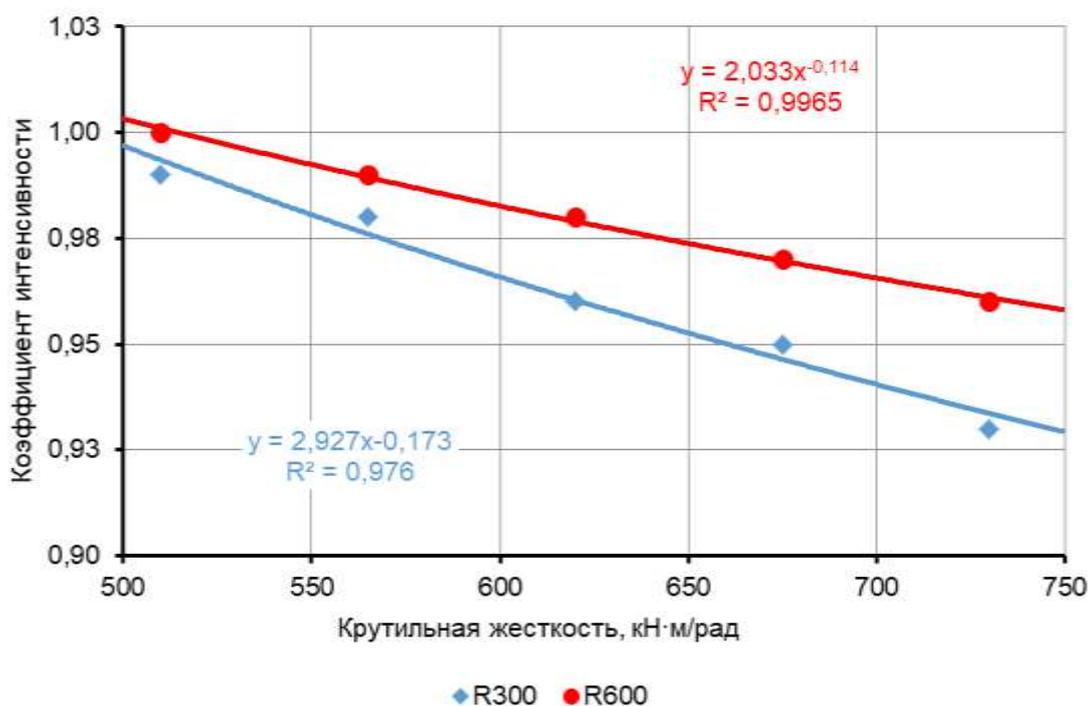


Рисунок 3.32 – Коэффициенты интенсивности бокового износа наружного рельса в кривом участке пути от крутильной жесткости рельса (типа промежуточных рельсовых креплений)

Аналогично определены коэффициенты интенсивности вертикального износа наружного и внутреннего рельсов в кривом участке пути от крутильной жесткости (типа промежуточных рельсовых креплений).

На рисунке 3.33 представлены зависимости изменения коэффициентов интенсивности вертикального износа наружного и внутреннего рельсов в кривом участке пути от крутильной жесткости.

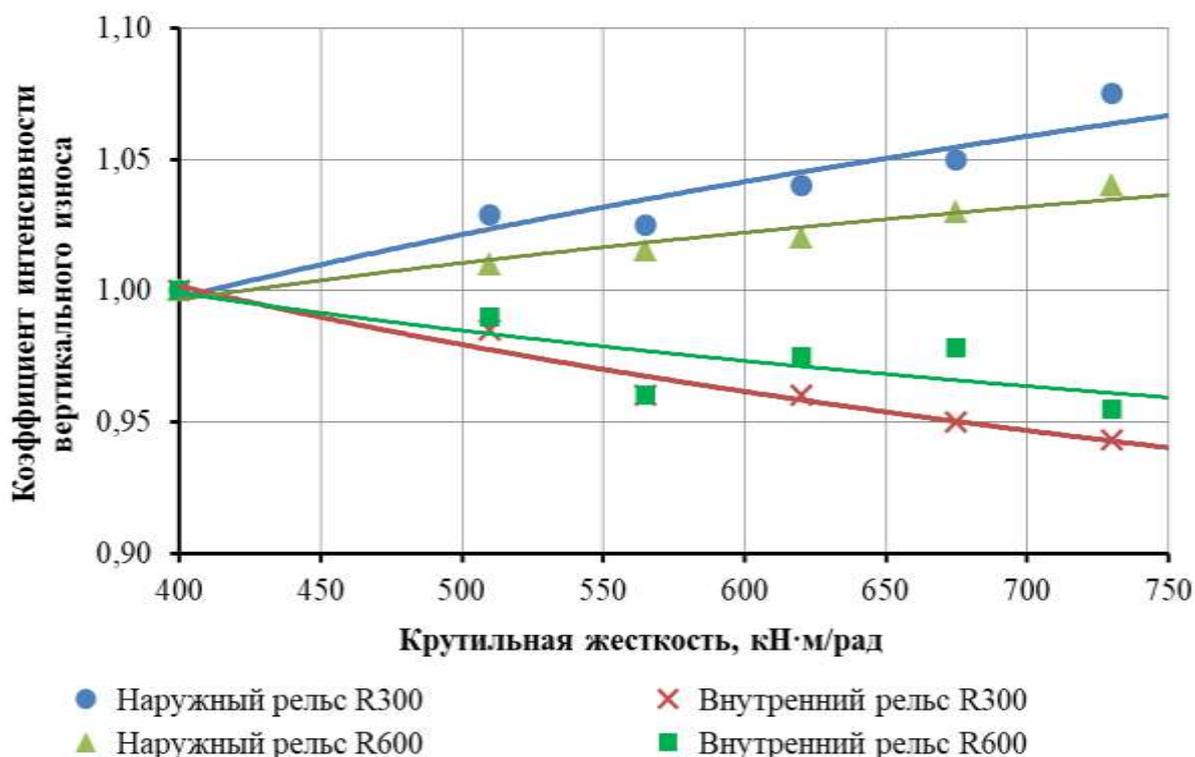


Рисунок 3.33 – Коэффициенты интенсивности вертикального износа наружного и внутреннего рельса в зависимости от крутильной жесткости

Из построенных графиков видно, что интенсивность вертикального износа внутреннего рельса имеет прямо пропорциональную зависимость с интенсивностью бокового износа наружного рельса, а интенсивность вертикального износа наружного рельса обратно пропорциональную.

В результате выполненных исследований установлено:

1 При работе пути в кривых участках под поездами происходит динамическая разуклонка рельсов от действия боковых сил.

2 Величина динамической разуклонки определяется крутильной жесткостью скреплений, величинами боковых сил и вертикальным пригрузом рельса от колес подвижного состава.

3 Экспериментально-расчетным путем установлены значения крутильной жесткости рельсов при использовании современных типов скреплений ЖБР-65,

ЖБР-65ПШМ, ЖБР-65ПШР, ПКФ-350 (ф. Пандрол), W-350 (ф. Фоссло), АРС-4, КБ-65. Анализ величин крутильной жесткости разных типов креплений показал, что их значения находятся в пределах 533...728 кН*м/рад.

4 Получены расчетные значения интенсивности бокового и вертикального износа наружного и внутреннего рельсов ДТ350 от воздействия грузовых вагонов в кривых участках пути разных радиусов и возвышений при разной крутильной жесткости рельсов, определяемой типом применяемых рельсовых креплений.

5 Определены функциональные коэффициенты, позволяющие корректировать интенсивность бокового и вертикального износа рельсов в кривых участках пути в зависимости от типа применяемых рельсовых креплений.

3.7 Влияние подуклонки рельсов на их износ

В ряде исследований [191, 192] авторы указывают на влияния подуклонки на интенсивность износа рельсов. Для определения количественных значений интенсивности износа рельсов выполнено моделирование процесса изнашивания от разных величин подуклонки для кривого участка пути радиусом R 400 м и возвышением наружного рельса $h = 110$ мм при равновесной скорости движения и варьировании величины подуклонки от 1/30 до 1/12. Результаты моделирования показаны на рисунке 3.34.

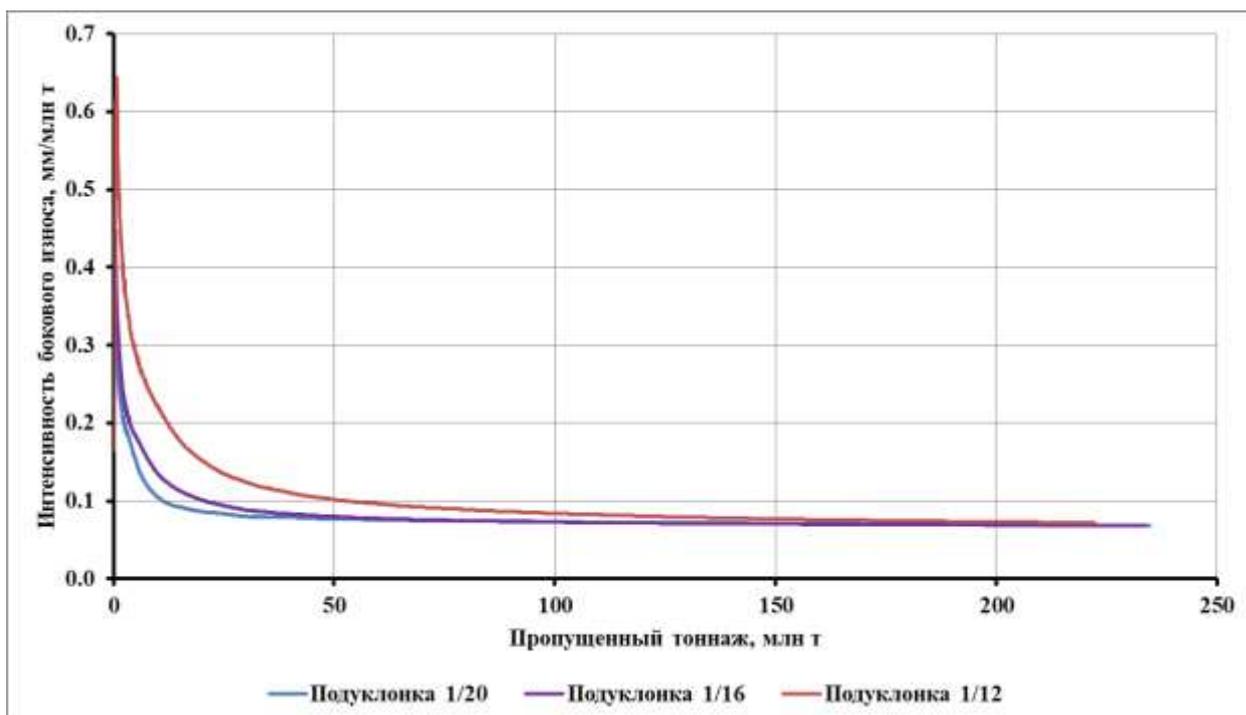


Рисунок 3.34– Результаты моделирования процесса изнашивания рельсов от их подуклонки для кривого участка пути радиуса R 400 м и возвышением наружного рельса $h = 110$ мм

Пропущенный тоннаж до достижения рельсом предельного бокового износа по результатам моделирования процесса изнашивания рельсов от их подуклонки для кривого участка пути радиуса R 400 м и с возвышением наружного рельса $h = 110$ мм приведен в таблице 3.33.

Таблица 3.33 – Величина пропущенного тоннажа до достижения рельсом предельного бокового износа от велтчины подуклонки.

Подуклонка	1/28	1/24	1/20	1/16	1/12
Пропущенный тоннаж до достижения рельсом предельного износа, млн т брутто	243	239	234,8	230	222,2

В результате моделирования установлено, что величина подуклонки оказывает влияние на интенсивность износа в период приработки – наиболее значимое

влияние оказывает при максимальном отклонении от номинального значения до $1/12$ и пропущенном тоннаже до 50 млн т брутто, в среднем расчетная интенсивность может снижаться до 50 %. При меньших отклонениях подуклонки – $1/16$ различия в интенсивностях не превышают 10...12 %. В работах [193, 194] проведены исследования по влиянию конструкции промежуточных рельсовых скреплений на стабильность подуклонки. Распределение величин подуклонки (ПУ) и наклона поверхности катания (НПК) в условиях эксплуатации по данным измерения ПУ и НПК путеизмерительными комплексами Эра и ЦНИИ-4 исследованы в работе [194]. Общая длина участков со скреплениями КБ-65, АРС-4, ЖБР-65, W-30, ПКФ-350 (Пандрол) имела протяженность более 1300 км. В процессе анализа опытных данных установлено: сразу после укладки пути величины ПУ и НПК близки к номиналу $1/20$; с ростом пропущенного тоннажа увеличиваются отклонения от номинала, причем в прямых и кривых участках ПУ и НПК изменяются по разному. Установлено, что в кривых участках пути по мере роста износа боковой поверхности наружного рельса НПК увеличивается по обеим рельсовым нитям – в среднем до $1/14$ - $1/13$ [194]. Растет средняя подуклонка наружной нити, величина средней подуклонки внутренней нити меняется незначительно в сторону ее увеличения от номинального значения [194]. Одним из способов управления интенсивностью износа является применение прокладок повышенной жесткости одновременно с упругими подрельсовыми подкладками под подошвой шпал. Учитывая, что изменение ПУ и НПК определяется деградацией элементов скреплений от пропущенного тоннажа, для прогнозирования износа рельсов принято учитывать состояние подуклонки на начальный период эксплуатации. Отсутствие конкретных данных по величинам отклонения подуклонки рельсов от типа применяемых скреплений и пропущенного тоннажа следует продолжить исследование данного вопроса.

3.8 Ранжирование функциональных факторов по вкладу их в интенсивность износа рельсов

В вышеприведенных исследованиях предложено использовать понятие «базовой интенсивности» как некоторый идеальный износ рельсов ДТЗ50, которые массово внедряются на российских железных дорогах от воздействия груженого полувагона с осевой нагрузкой 230 кН при движении с равновесной скоростью.

Учет эксплуатационных условий предложено учитывать с использованием функциональных факторов. В результате анализа и научного обоснования факторов, влияющих на износ, последние разделены на три группы (см. таблицу 1.3 в разделе 1).

I группа – факторы, оказывающие значительное и постоянное влияние на износ рельсов;

II группа – факторы, носящие случайный характер и определяемые системой технического обслуживания подвижного состава и пути;

III группа – факторы, оказывающие незначительное влияние на износ рельсов.

Факторы второй группы, несмотря на их значимость, не рассматривались, т.к. носят случайный характер и определяются системой технического обслуживания подвижного состава и пути.

Факторы III группы оказывают несущественное влияние (менее 3 %) и поэтому не учитывались.

Рассмотрены следующие факторы:

- 1 Радиус кривой.
- 2 Уровни непогашенного ускорения.
- 3 Категория качества рельсов.
- 4 Конструкция экипажных частей и осевая нагрузка.
- 5 Тип смазки и периодичность лубрикации.

- 6 Уклоны продольного профиля пути и массы поездов.
- 7 Тип промежуточных рельсовых скреплений.
- 8 Подуклонка рельса.

На основании моделирования процесса изнашивания и проведения верификации исследуемого фактора по эксплуатационным данным выполнено ранжирование исследуемых факторов по влиянию их на интенсивность износа. Результаты представлены в таблице 3.34.

Таблица 3.34 – Ранжирование факторов, влияющих на износ рельсов, по их вкладу в интенсивность износа

№ п/п	Фактор	Доля влияния фактора на износ рельса	Примечание
1	2	3	4
1	Радиус кривого участка пути	С увеличением радиуса кривой интенсивность износа снижается по степенной функции $I = aR^{-b}$: – при изменении радиуса с 300 до 400 м интенсивность износа снижается на 50–60 %; – с 400 до 500 м – на 37 %; – с 500 до 600 м – на 32%	a, b – эмпирические коэффициенты; R – радиус кривого участка пути, м. Для типовых условий: $a = 637...739$; $b = -1,47...-1,53$
2	Периодичность лубрикации рельсов	Интенсивность износа рельсов снижается в 1,5–2 раза в зависимости от периодичности лубрикации.	
3	Конструкция экипажных частей подвижного состава, осевая нагрузка	При доминировании в структуре поездопотока: – грузовых поездов с инновационными вагонами – повышается на 10–15 %; – контейнеровозов, пассажирских поездов – снижается на 25–30 %; – поездов, сформированных из порожних вагонов, – снижается на 65–75 %	

1	2	3	4
4	Категория качества рельсов	<p>Интенсивность износа рельсов может быть снижена (по сравнению с рельсами ДТ350) за счет качества категории рельсов:</p> <ul style="list-style-type: none"> – для отечественных рельсов – на 16–17 %; – для импортных (японских) – на 22–28 % 	Категория качества рельсов имеет разную износостойкость ввиду различий в твердости и структуре металла
5	Уровни непогашенных ускорений	<p>Интенсивность износа рельсов возрастает:</p> <ul style="list-style-type: none"> – при непогашенном ускорении $+0,3 \text{ м/с}^2$ для кривых радиусом 600 м – на 12 %; для кривых радиусом 300 м – на 18 %; – при непогашенном ускорении $-0,3 \text{ м/с}^2$ для кривых радиусом 600 м – на 20 %; для кривых радиусом 300 м – на 26 % 	При положительном непогашенном ускорении износ рельсов возрастает за счет увеличения направляющих усилий, при отрицательном непогашенном ускорении – за счет увеличения проскальзывания колес относительно наружного рельса
6	Скорость движения подвижного состава	С повышением скорости относительно равновесной на 30 % интенсивность износа увеличивается на 7–13 % при изменении радиуса кривой с 600 до 300 м	При увеличении скорости выше равновесной происходит увеличение боковых усилий от набегających колес и рост интенсивности износа рельсов
7	Возвышение наружного рельса	<p>Интенсивность износа рельсов возрастает:</p> <ul style="list-style-type: none"> – в кривой радиусом 300 м при изменении возвышения наружного рельса с 90 до 150 мм – на 16,5 %; – в кривой радиусом 600 м при изменении возвышения наружного рельса с 30 до 80 мм – на 14,6 % 	С увеличением возвышения наружного рельса при прочих равных условиях интенсивность износа возрастает на 14–17 %

1	2	3	4
8	Продольный профиль пути, масса поезда	Интенсивность износа рельсов на уклонах до 18–20 ‰ при массах поездов 6300–7100 т возрастает: – на спусках – до 12–13 %; – на подъемах – до 10–12 %	При движении на уклонах в поезде возрастают продольные силы, что приводит к росту направляющих усилий. При уменьшении величины уклонов и массы поездов влияние уклонов на интенсивность износа снижается
9	Тип промежуточных рельсовых скреплений	Интенсивность износа рельсов с увеличением крутильной жесткости снижается в кривом участке пути – радиусом 600 м – на 3–4 %; – радиусом 300 м – на 6–8 %	Тип промежуточных рельсовых скреплений определяет величины крутильной жесткости рельса и динамической разуклонки.

Для автоматизации расчетов интенсивности бокового и вертикального износа рельсов в среде графического программирования Lab View 2011 разработано программное обеспечение. Описание ПО приведено в Приложении 4. Программа прогнозирования износа рельсов разных категорий качества в разных условиях эксплуатации, разработанная в среде графического программирования Lab View 2011 представлена в Приложении 5. На примере 36 кривых проведено моделирование бокового износа рельсов с использованием разработанной методики. Выполнен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных по износу рельсов, представленных техническим отделом Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской ДИ. Сходимость между расчетными и экспериментальными данными составила менее 15%. Результаты верификации расчетных и экспериментальных данных приведены в Приложении 6. Акты внедрения «Программы прогнозирования износа рельсов разных категорий качества в разных условиях эксплуатации» представлены в Приложении 7,8,9.

В этой главе изучены факторы, влияющие на износ рельсов - категории качества рельсов, лубрикация рельсов, структура подвижного состава и величины

осевых нагрузок, уровни непогашенного ускорения, уклоны продольного профиля и массы поездов, тип промежуточных рельсовых скреплений, подуклонка рельсов. Выделены факторы, позволяющие управлять износом рельсов:

- категория качества рельсов (подбор категории качества рельсов может снижать интенсивность износа на 16...30%);

- тип смазки и периодичность лубрикации(мощный фактор, позволяющий снижать интенсивность износа на 50...60% при правильно подобранном типе смазки и своевременной лубрикации);

- уровень непогашенного ускорения(необходимо стремиться к движению доли грузовых или пассажирских поездов в зависимости от их доминирования со скоростями близкими к равновесной. Не допускать длительного движения поездов с уровнями отрицательного непогашенного ускорения менее - 0,2 м/с². Это может снижать интенсивность износа рельсов на 20...30%;

- стабильность подуклонки рельсов. Необходимо минимизировать тенденцию к изменению подуклонки рельсов в кривых участках пути по причине релаксации подрельсовых прокладок от пропущенного тоннажа путем повышения их жесткости. Это может снизить интенсивность износа рельсов на 8...12 %.

Выводы по главе 3

1 На основании проведенного анализа результатов наблюдений за износом рельсов в условиях Восточно-Сибирской и Московской ДИ, данных, полученных специалистами ПКБ И, АО «ВНИИЖТ» определены коэффициенты, увязывающие износостойкость рельсов разных категорий качества. С использованием базовых значений интенсивности износа рельсов ДТ350 и значений увязывающих коэффициентов разработаны «Нормативы интенсивности износа рельсов различных категорий качества для базовых условий эксплуатации».

2 На основании экспериментально установленных средних значений вертикальных и боковых сил, действующих на наружный и внутренний рельсы от разных типов грузовых, пассажирских вагонов и локомотивов. установлены коэффициенты приведения к средним значениям боковых и вертикальных сил от воздействия базового полувагона. На основании анализа уровней силового воздействия на путь и анализа значений коэффициентов приведения предложено ранжировать подвижной состав по кластерам.

3 Для всех категорий рельсов на подъемах и спусках наблюдается устойчивая тенденция к повышению интенсивности износа с увеличением величины уклона. Во всех случаях интенсивность износа на спусках выше, чем интенсивность износа на подъемах от 7 до 12 %. Изменение интенсивности износа рельсов от уклонов описывается степенными функциями, параметры которых зависят от направления уклонов (спуск, подъем) и категорий качества рельсов. Углы наклона линий трендов для рельсов разных категорий качества имеют близкие значения, что позволяет усреднить значения функциональных коэффициентов.

4 Показано, что лубрикация является мощным управляющим фактором, снижающим износ рельсов (при условии исключения попадания абразива в смазку). Снижение интенсивности износа с учетом изменения коэффициента трения от количества пропущенных осей в среднем может составлять до 50 %.

5 При исследовании влияния непогашенного ускорения на интенсивность износа рельсов установлено: минимальный износ наблюдается при равновесной скорости движения, когда непогашенное ускорение равно нулю. Природа повышенного износа наружного и внутреннего рельсов от знака непогашенного ускорения различна – при росте положительных непогашенных ускорений интенсивность износа повышается за счет увеличения вертикальных и боковых сил, контактных давлений, мощности сил трения на поверхности катания и боковой грани наружного рельса с одновременным снижением на внутреннем рельсе.

Избыток возвышения наружного рельса в крутых кривых при нереализованных скоростях (отрицательные непогашенные ускорения) движения вызывает

перераспределение продольного скольжения колес с внутренней на наружную рельсовую нить по причине затруднительного вписывание тележек экипажных мастей подвижного состава из-за перевалки кузова внутрь колеи и пригруза скользунов. Установлены функциональные коэффициенты, определяющие влияние уровня и знака непогашенного ускорения на интенсивность износа рельсов.

6 Экспериментально-расчетным путем установлено, что наиболее значимое влияние промежуточные рельсовые скрепления оказывают в кривых участках пути малого радиуса $R \leq 350$ м, а также при более низких значениях крутильной жесткости (530 кН*м/рад), когда динамическая разуклонка имеет наибольшие значения, достигая 6...8%. При кривых средних радиусов $350 < R \leq 650$ м и скреплениях с крутильной жесткостью 650...750 кН*м/рад влияние промежуточных рельсовых скреплений на износ рельсов не превышает 3...4%. Полученные функциональные коэффициенты позволяют откорректировать значения интенсивности бокового и вертикального износа с учетом применяемых типов промежуточных рельсовых скреплений.

7 На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований количественных значений факторов износа выполнено их ранжирование по доле влиянию их на интенсивность износа рельсов. Для автоматизации расчетов интенсивности бокового и вертикального износа рельсов в среде графического программирования Lab View 2011 разработано программное обеспечение.

8 В этом исследовании выделены факторы, позволяющие управлять износом рельсов: категория качества рельсов, тип смазки и периодичность лубрикации, уровень непогашенного ускорения. Следует продолжить работы по рациональному выбору управляющих факторов с использованием методики прогнозирования для минимизации интенсивности износа рельсов в различных условиях эксплуатации.

ГЛАВА 4

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРОГНОЗИРОВАНИЮ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ РЕЛЬСОВ

4.1 Кинематика образования и роста контактно-усталостных трещин на поверхности катания рельсов

Проблеме образования дефектов контактно-усталостного характера на поверхности катания рельсов посвящено значительное количество работ как отечественных, так и зарубежных ученых. В работах [81, 83-87, 195] экспериментально исследованы и описаны причины образования дефектов контактно-усталостного характера в рельсах:

- развитие процессов деструкции поверхностного слоя металла головки рельсов;

- недостаточная чистота рельсовой стали.

Деструкция поверхностного слоя металла головки рельсов протекает под воздействием циклических упруго-пластических деформаций металла рельса в зоне контакта с колесом подвижного состава и состоит из следующих этапов [81, 84, 132, 133, 195, 196]:

- образование наклепанного слоя с микроструктурой волокнисто-деформированного перлита;

- образование трещин при деформации наклепанного упрочненного слоя с волокнисто-деформированной микроструктурой и пониженными характеристиками пластичности;

- рост и развитие трещин в поверхностном слое.

В работе Шура Е.А. и др. [195] исследована кинематика образования и роста контактно-усталостных трещин на объемно-закаленных рельсах, изъятых после

пропуска 301,6; 398, 3 и 478,6 млн.т брутто. Рельсы эксплуатировались на внутренних нитях прямого участка Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ». Во всех случаях выделены следующие стадии развития трещин: образование на поверхности катания сетки микротрещины и развитие их от поверхности катания под углом от 9° до 37° вглубь головки рельса; поворот и дальнейшее развитие в плоскости параллельной поверхности катания; поворот и дальнейшее развитие вверх в направлении поверхности катания с образованием выкрашивания или разворотом вниз с развитием поперечной усталостной трещины с дефектом по коду 21.1 в соответствии с [197]. Согласно представленным исследованиям [195] кинематика развития контактно- усталостных трещин включает три стадии. представленные в табл. 4.1.

Таблица 4.1– Кинематика развития контактно - усталостных трещин на поверхности катания рельсов до достижения им предельного состояния

I стадия	II стадия	III стадия
<p>Формирования сетки микротрещин на поверхности катания. Модель Брауна-Миллера[68,220] Пропущенный тоннаж до образования трещин на поверхности катания:- для объемно- закаленных рельсов Т1-250...300 млн т брутто; для дифференцированно- закаленных ДТ350- 320...350 млн т брутто.</p>	<p>Развитие трещин от поверхности катания вглубь под углом $9...37^\circ$ с разворотом и ростом параллельно поверхности катания. Рост трещин определяется моделями линейной механики разрушения[201].</p>	<p>Разворот трещин вверх или вниз, развитие до критического размера. Рост трещин определяется моделями линейной механикой разрушения [201]. Образование ОДР после пропуска тоннажа 500...800 млн т брутто от начала эксплуатации.</p>

Известны исследования направленные на прогнозирование контактно-усталостных повреждений в рельсах от качения колес подвижного состава [153,198 - 200]. Гавриловым В.М. [198] предложена математическая модель дву-

стадийного контактно-усталостного повреждения рельсов, представлена методика накопления удельного выхода рельсов по дефектам 21.1-2. В работе [199] определен полный тензор напряжений в зоне контакта колеса с рельсом методом конечных элементов. Сувориным П.Г. [200] усовершенствована методика расчетного и экспериментального определения коэффициентов интенсивности напряжений (КИН). Показано, что усталостные трещины распространяются вдоль направления действия главных напряжений. Расчетным путем получены зависимости критического размера дефектов от остаточных напряжений и продольной силы. Построена модель поворота внутренней продольной трещины в головке рельса и переход ее в поперечную. Таким образом, основная доля исследований посвящена определению напряженно-деформированного состояния зоны контакта колеса с рельсом при разных комбинациях силовых факторов, определению коэффициентов интенсивности напряжений, либо определению скорости роста трещин с использованием линейной механики разрушения [201]. Практически отсутствуют работы посвященные первой стадии образования контактно-усталостных трещин на поверхности катания рельсов. Автором настоящей работы обоснована и предложена деформационная модель Брауна – Миллера для определения повреждаемости поверхности катания рельсов на первой стадии [202 – 206].

Ниже представлены теоретические исследования по прогнозированию срока службы рельсов до образования трещин в поверхностных слоях металла головки рельсов от воздействия циклических упруго-пластических деформаций в зоне контакта от колес подвижного состава.

4.2 Алгоритм определения контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов

Оценку усталостной долговечности элементов конструкций можно проводить по трем классическим типам критериев и моделей разрушения: силовым, деформационным и энергетическим. При анализе многоциклового прочностного поведения конструкций долговечность обычно определяется на основе характеристик цикла напряжений. В качестве исходных данных здесь используется кривая усталости Велера, описывающая зависимость амплитуды напряжения от числа циклов до разрушения [58, 59]. В ряде работ [65, 66, 67] установлено, что усталостные трещины в пластичных материалах возникают в плоскостях с максимальными амплитудами напряжений сдвига. На рост трещин влияют нормальные напряжения в прилегающих зонах. В области контактной прочности для случая качения колеса по рельсу разработано несколько критериев для расчета на многоцикловую и малоцикловую усталость, с учетом нормальных составляющих и напряжений сдвига. В зависимости от напряжений фактический механизм усталости подразумевает пластичность в месте зарождения трещины. Установлена связь между амплитудой пластической деформации и сроком службы до разрушения, которая может быть линеаризована в логарифмическом масштабе, Браун и Миллер [68] сформулировали критерий контактно-усталостной повреждаемости с учетом сдвига и нормальных деформаций. Этот критерий наиболее близко описывает условия нагружения рельса при качении колеса.

Для оценки контактно-усталостной повреждаемости рельсов предложен алгоритм, схема которого представлена на рисунке 4.1.

Представленный алгоритм включает комплекс исследований, которые необходимо провести для установления образования трещин в поверхностном слое рельса, а именно:

- исследовать напряженно- деформированное состояние (НДС) поверхности катания рельса при прокатке вагонного колеса;
- на основании анализа НДС выбрать модель для расчета контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов;
- провести расчет деформационных кривых усталости для рельсовой стали;
- по выбранной модели контактно-усталостной повреждаемости с учетом параметров деформационных кривых усталости выполнить –расчеты относительной повреждаемости от величин колесных нагрузок;
- исследовать вероятности распределения контакта колеса с рельсом по поперечному сечению поверхности катания рельса;
- разработать методику расчета контактно-усталостной повреждаемости рельсов до образования трещин на поверхности катания с учетом деградации механических свойств от пропущенного тоннажа.

В соответствии с основными положениями разработанного алгоритма проведены исследования, результаты которых изложены в настоящей главе.

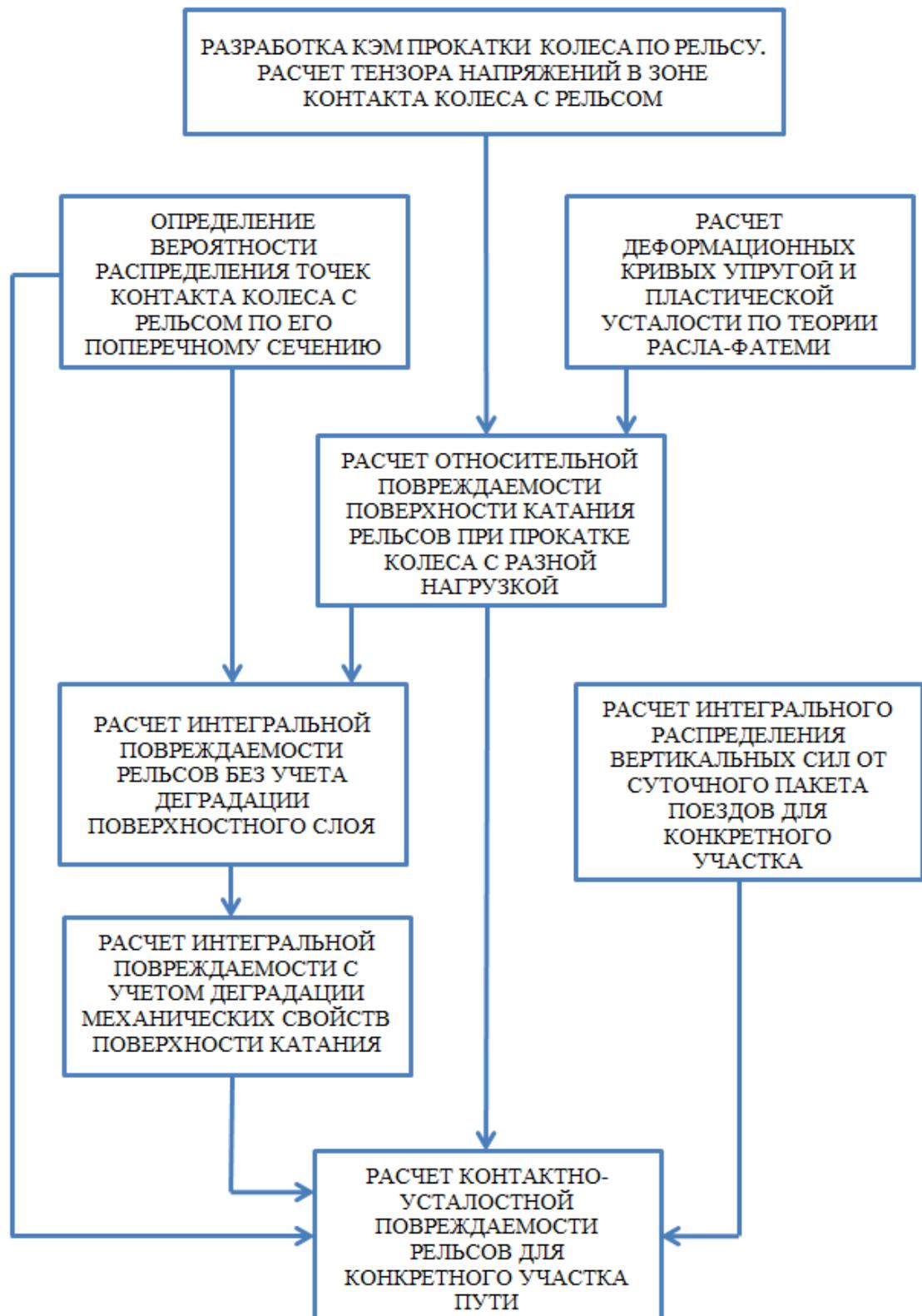


Рисунок 4.1 – Алгоритм определени контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов до образования трещин

4.3 Результаты расчета напряженно-деформированного состояния зоны контакта колеса с рельсом

Для оценки контактно-усталостной повреждаемости рельсов рассмотрим более подробно напряженно-деформированное состояние зоны контакта колеса с рельсом. Напряженное состояние наиболее нагруженной точки определялось путем расчета тензора компонент напряжений: трех нормальных напряжений σ_x , σ_y , σ_z и трех компонент касательных напряжений τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} . На конечно-элементной модели «рельс – колесо» определялась критическая точка, в которой действуют максимальные нормальные и касательные напряжения, а также положение плоскости, в которой расположены компоненты напряжений, с учетом возникновения многоосного нагружения при прокатке колеса по рельсу.

Расчет НДС в зоне контакта катящегося колеса и рельса выполнялся с использованием подробных трехмерных конечно-элементных моделей колеса и рельса в программном комплексе MSC.Marc (рисунок 4.2) [207,208].

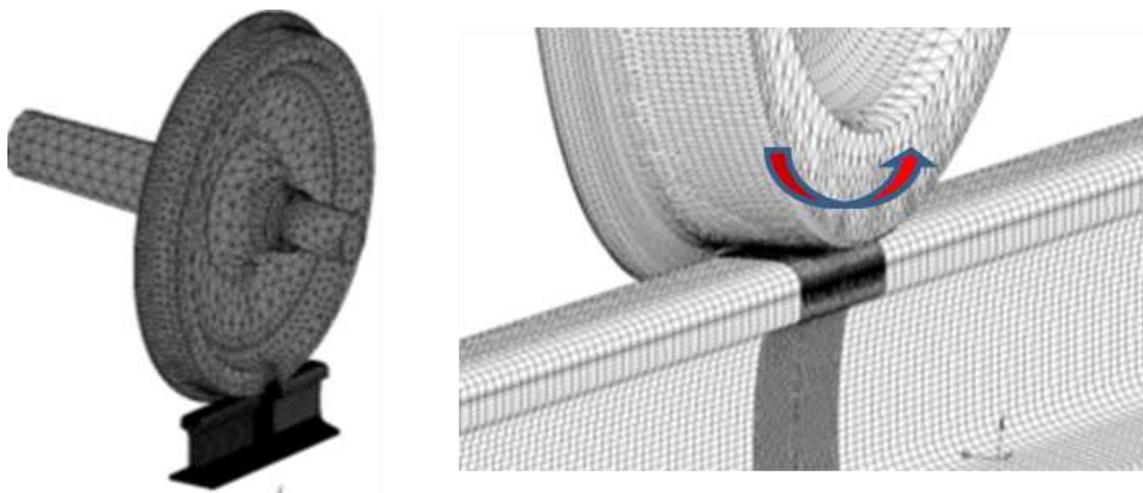


Рисунок 4.2 – Конечно-элементная модель взаимодействия в системе «колесо-рельс» для расчета напряженно-деформированного состояния в зоне контакта

В расчете конечно-элементная модель вагонного колеса диаметром 957 мм прокатывалась по конечно-элементной модели отрезка рельса Р65 длиной 500 мм при разных значениях вертикальной нагрузки на колесо в диапазоне 50...200 кН.

При этом колесо находилось в среднем поперечном положении по отношению к рельсу при номинальном значении ширины колеи 1520 мм и подуклонке рельса 1/20 [190]. Узлы в концевых сечениях конечно-элементной модели рельса фиксировались по всем направлениям.

Для более точного расчета НДС в зоне контакта выполнены необходимые сгущения конечно-элементных сеток колеса и рельса до межузлового расстояния 1 мм на поверхности контакта и на глубину 20 мм. В итоге расчетная конечно-элементная модель «колесо – рельс» состояла из 766 654 элементов и 368 208 узлов.

Между контактирующими поверхностями колеса и рельса использовалась модель сухого трения с коэффициентом трения $\mu = 0,3$. Механические свойства сталей, из которых изготовлены колесо и рельс [10, 210], представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Механические свойства сталей колеса и рельса

Показатель	Колесо	Рельс
Модуль Юнга E , ГПа	210	210
Коэффициент Пуассона ν	0,3	0,3
Временное сопротивление σ_B , МПа	1100	1290
Предел текучести σ_T , МПа	800	850

Результаты расчета НДС от статической нагрузки на колесо 120 кН в контакте «колесо – рельс» при неподвижном положении колеса показаны на рисунке 4.3.

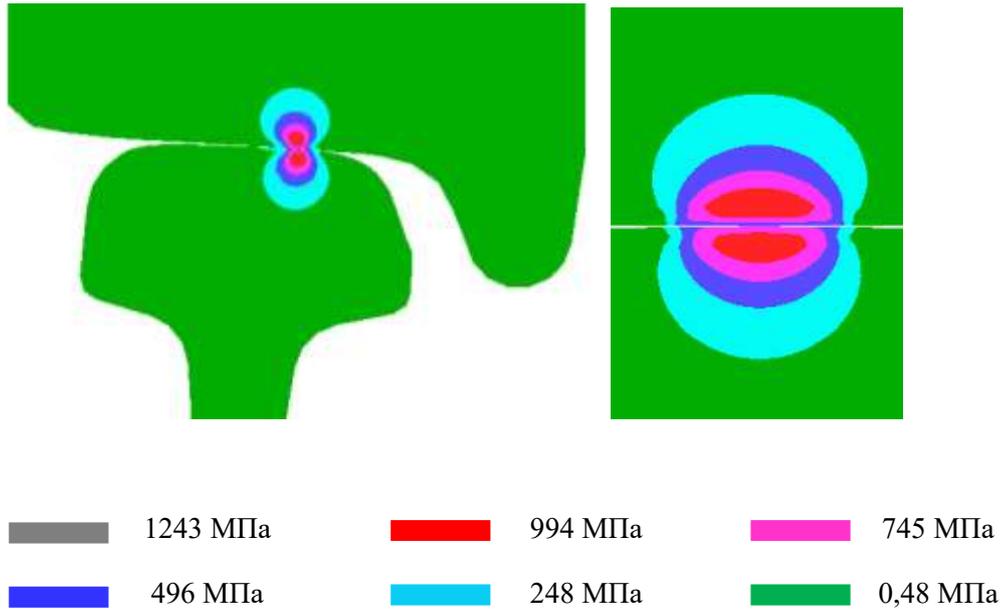


Рисунок 4.3– Напряженно-деформированное состояние зоны контакта колеса с рельсом при вертикальной нагрузке 120 кН

Из рисунка 4.3 видно, что максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения в материале рельса расположены на глубине примерно 5 мм под поверхностью головки рельса. С увеличением глубины эти напряжения быстро уменьшаются.

На рисунке 4.4 представлены распределения касательных напряжений в зоне контакта колеса с рельсом. Установлено, что значительные касательные напряжения возникают лишь в пределах небольшой зоны вблизи контакта. Касательные напряжения в других частях модели близки к нулю.

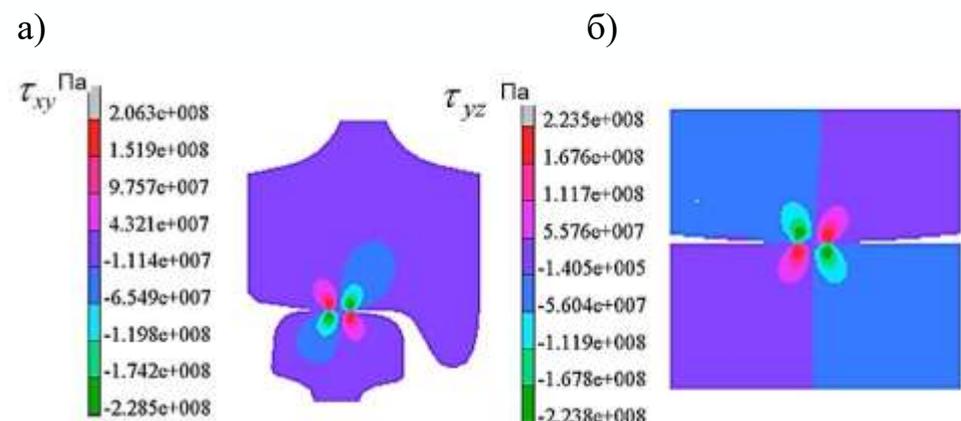


Рисунок 4.4 – Распределение касательных напряжений в контакте «колесо – рельс»: а) сечение в поперечном направлении рельса; б) сечение в продольном направлении рельса

Из изложенного следует, что при расчете НДС в рельсе от катящегося колеса достаточно смоделировать его прокатку на небольшую глубину, поскольку на незначительном удалении от места контакта напряжения становятся пренебрежимо малы. Длина прокатки была принята равной 80 мм.

Изменение компонент тензора напряжений в одной из точек поверхности катания рельса, лежащей на пути прокатки колеса при нагрузке на колесо 120 кН, представлено на рисунке 4.5. По оси абсцисс откладывается условное время счета (время движения колеса по рельсу), по оси ординат – значения компонент тензора напряжений.

Из рисунка 4.5 видно, что максимальное нормальное σ_{yy} и максимальное касательное τ_{yz} напряжения на поверхности катания рельса не возникают одновременно, их максимумы сдвинуты во времени.

Компоненты тензора напряжений, вычисленные для группы поверхностных и внутренних узлов конечно-элементной модели рельса, расположенных в зоне концентрации контактных напряжений при прокатке колеса под разной вертикальной нагрузкой, использовались для расчета максимальных напряжений в критической точке.

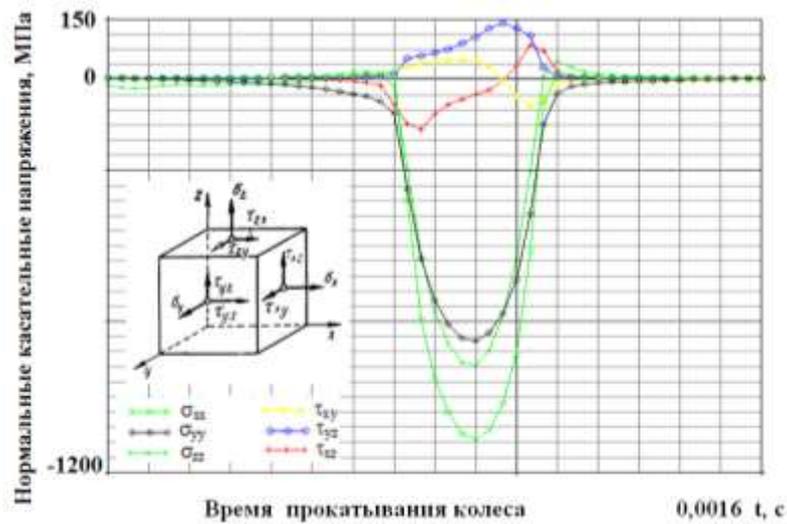


Рисунок 4.5– Изменение компонент тензора напряжений в точке поверхности катания рельса при прокатывании колеса: σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} – нормальные напряжения тензора вдоль осей XX , YY , ZZ ; τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} – касательные напряжения на площадках нормальных к осям XX , YY , ZZ

Используя расчетные компоненты нормальных σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} и касательных τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} напряжений, учитывая условия равновесия, определяем напряженное состояние на площадке, проходящей q_2 через критическую точку, на которой действуют максимальные эквивалентные напряжения. Считая, что в рассматриваемой точке трехмерное напряженное состояние, главные нормальные напряжения определяются из кубического уравнения [211]:

$$\sigma^3 - \sigma^2(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) + \sigma(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{yz}^2) - (\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2) = 0 \quad (4.1)$$

Так как для любой уравновешенной системы главные напряжения и главные площадки определяются единственным образом, коэффициенты в уравнении постоянны или инвариантны. Эти коэффициенты представляют первым, вторым и третьим инвариантом напряжений:

$$\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \text{const} - \text{первый инвариант}; \quad (4.2)$$

$$\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{yz}^2 = \text{const} - \text{второй инвариант};$$

$$\sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2 = \text{const} - \text{третий инвариант}.$$

Для определения касательных напряжений на любой проходящий через критическую точку площадке по главному нормальному напряжению и направляющими косинуса воспользуемся выражением [211]:

$$\tau^2 = \ell^2 \sigma_1^2 + m^2 \sigma_2^2 + n^2 \sigma_3^2 - (\ell^2 \sigma_1^2 + m^2 \sigma_2^2 + n^2 \sigma_3^2), \quad (4.3)$$

где $\cos \alpha = \ell$; $\cos \beta = m$; $\cos j = n$ – направляющие косинусы.

Согласно [211], максимальное значение полного касательного напряжения τ определяют набором значений направляющих косинусов:

$$\begin{array}{lll} \ell = 0; & \ell = 0; & \ell = \pm\sqrt{1/2}; \\ m = 0; & m = \pm\sqrt{1/2}; & m = 0; \\ n = \ell; & n = \pm\sqrt{1/2}; & n = \pm\sqrt{1/2}. \end{array} \quad (4.4)$$

Каждый из трех наборов чисел определяет направление площадок, на которой касательные напряжения τ будут иметь экстремальные значения.

Первая колонка соответствует главным площадкам, на которой касательные напряжения равны 0. Вторая и третья колонки определяют площадки, на которых касательные напряжения достигают наибольших значений.

Если направляющие косинусы подставить из второй колонки в выражение (4.3), но можно найти:

$$\tau_1 = \pm \frac{1}{2} (\sigma_2 - \sigma_3). \quad (4.5)$$

Используя вторую и третью колонки, получим выражение для τ_2 и τ_3 в виде:

$$\tau_2 = \pm \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3), \quad (4.6)$$

$$\tau_3 = \pm \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2). \quad (4.7)$$

Из полученных выражений следует, что наибольшее касательное напряжение равно половине разности между наибольшим и наименьшими главными нормальными напряжениями, а площадка, на которой действует наибольшее касательное напряжение, делит пополам угол между векторами наибольшего и наименьшего главных нормальных напряжений.

Наибольшее из трех главных касательных напряжений является наиболь-

шим касательным напряжением, которое может действовать на любой из проходящих через точку главных площадок сдвигов.

Анализ напряженно-деформированного состояния в зонах контакта колеса с рельсом показали, что чем больше величина нагрузки и выше контактное давление, тем на большую глубину от поверхности смещается фокус наибольших напряжений. Этот факт определяет, что для условий тяжеловесного движения характерно зарождение усталостных трещин на большей глубине.

Расчетные максимальные напряжения передавались в качестве входных данных в программный комплекс MSC.Fatigue [209], в котором рассчитывалась относительная повреждаемость в рельсе за один цикл прокатки колеса. Для проведения расчетов потребовалось выполнить расчеты деформационных кривых для рельсовых сталей. Результаты расчета представлены ниже.

4.4 Расчет деформационных кривых усталости рельсов

Характерной особенностью поверхности катания головки рельса является работа в упругопластической зоне, о чем свидетельствуют наклеп на поверхности катания рельсов, расплющивание головки рельсов на внутренних нитках в кривых участках пути, в зонах сварных стыков. В этом случае для определения контактно-усталостной повреждаемости принято использовать деформационный подход. Деформационная кривая усталости, представляющая собой зависимость амплитуды полной деформации от числа полуциклов до разрушения. Зависимость амплитуды деформации ε_a от числа циклов до зарождения усталостной трещины (усталостного разрушения) N_p имеет следующий вид [212, 213]:

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (N_p)^b + \varepsilon'_f (N_p)^c, \quad (4.8)$$

где σ'_f – коэффициент усталостной прочности;

E – модуль упругости рельсовой стали;

b – экспонента усталостной прочности (экспонента Басквина);

ε'_f – коэффициент усталостной пластичности (вязкости);

c – экспонента усталостной пластичности (экспонента Мэнсона – Коффина).

Уравнение (4.8) получило название уравнения Басквина – Мэнсона – Коффина [212 –214].

В выражении (4.8) при циклическом нагружении амплитуда полной деформации ε_a может быть представлена как сумма амплитуд упругой ε_{ae} и пластической ε_{ap} составляющих деформации:

$$\text{- амплитуда упругой деформации: } \varepsilon_{ae} = \frac{\sigma'_f}{E} (N_p)^b \quad (4.9);$$

$$\text{- амплитуда пластической деформации: } \varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f (N_p)^c \quad (4.10).$$

Важной характеристикой свойств материала при циклическом нагружении является кривая циклического деформирования, описывающая зависимость амплитуды напряжения от амплитуды деформации при циклическом нагружении, так называемая диаграмма Рамберга – Остуда [215]:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{1/n'} \quad (4,11)$$

где K' – коэффициент циклической прочности;

n' – коэффициент циклического деформационного упрочнения.

Как показывают данные исследований [216,217] между коэффициентом усталостной прочности σ'_f и коэффициент усталостной пластичности ε'_f уравнений (4.8), (4.9) и (4.10) имеют место следующие зависимости:

$$\sigma'_f = K' (\varepsilon_f)^{n'} \quad (4.12)$$

$$n' = b / c, \quad (4.13)$$

которые, несмотря на хорошее качественное соответствие с экспериментальными результатами, могут найти практическое использование только в случае

правильного выбора входящих в них параметров [216].

Эмпирические параметры σ'_f , ε'_f , b , c в уравнении (4.8) являются основой для построения кривых усталости в координатах $\lg \varepsilon_a - \lg N_p$, которые, как показывают данные литературных источников, могут быть найдены с использованием характеристик механических свойств металлов и сплавов. При этом важно установить корреляционную зависимость между указанными параметрами и характеристиками прочности и пластичности рельсовой стали при циклическом нагружении.

Предложено много различных методов оценки параметров уравнения Басквина – Мэнсона – Коффина [212,213]. В работе В.А. Трощенко [216] проанализированы методы определения оценочных значений параметров σ'_f , ε'_f , b , c уравнения Басквина – Мэнсона – Коффина и для сталей рекомендовано использовать модифицированный метод твердости Расла – Фатемиди. Определим величины коэффициентов усталостной пластичности ε'_f и упругой усталости σ'_f [216, 218]:

$$\sigma'_f = 4,5HB + 225, \quad (4.14)$$

$$\varepsilon'_f = (0,32HB^2 - 487HB + 191000) / E. \quad (4.15)$$

На площадке АО «ВНИКТИ» экспериментально определена твердость темплетов рельсов категорий ДТ350, производства АО «Евраз ЗСМК и ПАО «ЧМК», объемно-закаленных рельсов Т1 производства АО «Евраз ЗСМК в соответствии с ГОСТ Р 51685-2013 [10] (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 – Темплет рельса с вмятинами от шарика для определения твердости по поперечному сечению рельса

Результаты измерения твердости объемно-закаленных рельсов Т1, дифференцированно-термоупрочненных рельсов ДТ350 представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты измерения твердости объемно-закаленных рельсов Т1 дифференцированно-термоупрочненных рельсов ДТ350

Элемент	Категория рельса		
	Т1	ДТ350 (ПАО «ЧМК»)	ДТ350 (АО «Евраз ЗСМК»)
Головка рельса	363; 363; 363; 363; 363; 363; 363; 352; 352; 352; 352; 363; 363; 363; 363; 341; 341; 363; 363; 363; 363; 363	363; 363; 363; 363; 363; 363; 363; 352; 352; 352; 352; 363; 363; 352; 352; 341; 341; 352; 352; 341; 341; 341	373; 371; 369; 369; 359; 369; 363; 362; 363; 353; 353; 353; 352; 352; 362; 347; 345; 348; 341; 341; 342
Шейка рельса	352; 341	302; 302	307; 302
Подошва рельса	341; 341; 341	302; 302; 302	306; 306; 306

С использованием данных о твердости рельсовых сталей, полученных специалистами АО «ВНИКТИ» и представленных в таблице 4.2, рассчитаны значения параметров σ'_f , ϵ'_f , b , c уравнения Басквина – Мэнсона – Коффина.

В модифицированном методе твердости Расла – Фатеми [216, 218] коэффициенты наклона деформационных кривых усталости b и c считаются постоянными и для сталей рекомендованы значения $b = -0,09$, $c = -0,56$.

Величины упругой ϵ_{ae} , пластической ϵ_{ap} а также суммарной ϵ_a деформаций рассчитаны от количества циклов до разрушения N_p при циклическом нагружении.

Амплитуда упругой деформации ϵ_{ae} от числа циклов до разрушения определялась согласно выражению (4.9), амплитуда пластической деформации ϵ_{ap} – от числа циклов в соответствии с выражением (4.10).

Суммарная деформация от числа циклов до зарождения усталостной трещины определялась как сумма упругой и пластической деформаций. Результаты

расчета упругой, пластической и суммарной деформаций от числа циклов N_p представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Расчетные значения упругих, пластических и суммарных деформаций кривых для рельсовой стали при $HB = 360$

n	N_p	$\varepsilon_{ae} = \frac{\sigma'_f}{E} (N_p)^b$	$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f (N_p)^c$	$\varepsilon_a = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap}$
1	0	0,0088	0,272	0,2808
2	10	0,0071	0,075	0,0821
3	10^2	0,0058	0,0206	0,0264
4	10^3	0,00472	0,00568	0,0104
5	10^4	0,00384	0,00156	0,0054
6	10^5	0,0031	0,00043	0,00353
7	10^6	0,00253	0,000118	0,00218
8	10^7	0,00206	0,000033	0,002093
10	10^8	0,00167	0,000009	0,00168

Для удобства представления деформационных кривых усталости для рельсовой стали расчетные данные ε_{ae} , ε_{ap} , ε_a для разных N_p пересчитаны для системы координат: $\lg \varepsilon_a - \lg N_p$.

Результаты расчета представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Значения параметров деформационных кривых усталости рельсовой стали при $HB = 360$ в логарифмических координатах $\lg \varepsilon_a - \lg N_p$

n	$\lg N_p$	$\lg \varepsilon_{ae}$	$\lg \varepsilon_{ap}$	$\lg \varepsilon_a$
1	2	3	4	5
1	0	-2,05	-0,565	-0,54
2	1	-2,148	-1,125	-1,086
3	2	-2,236	-1,686	-1,58
4	3	-2,326	-2,25	-1,982
5	4	-2,41	-2,81	-2,27

1	2	3	4	5
6	5	-2,5	-3,37	-2,45
7	6	-2,68	-3,93	-2,66
8	7	-2,69	-4,43	-2,68
9	8	-2,77	-5,04	-2,74

На рисунке 4.7 в логарифмических координатах представлены деформационные кривые усталости в соответствии с зависимостями (4.8), (4.9), (4.10). Эмпирические параметры σ'_f , ε'_f , b , c в уравнении (4.8) являются основой для построения кривых усталости в координатах $\lg \varepsilon_a - \lg N_p$ и найдены с использованием характеристик механических свойств рельсовой стали.

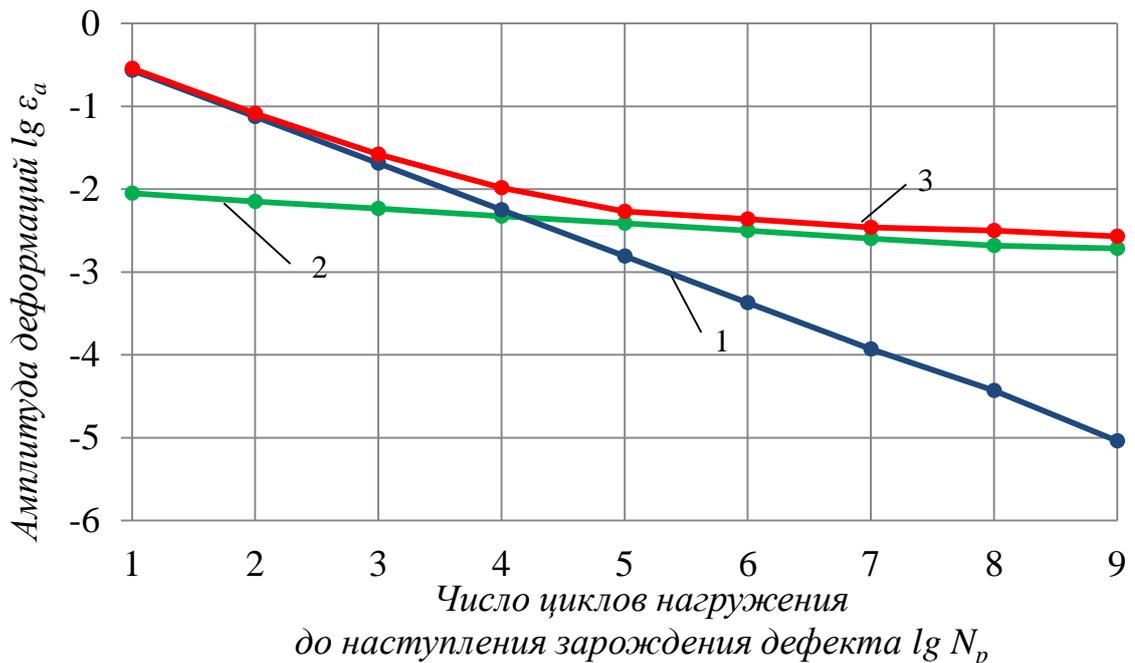


Рисунок 4.7 – Деформационные кривые усталости для рельсовой стали: синий(1) – кривая пластической усталости; зеленый(2)– кривая упругой усталости; красный(3) – кривая суммарной усталости.

В зависимости от технологии изготовления и обработки рельсов эти параметры могут изменяться .

4.5 Выбор модели для расчета контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов

Характерной особенностью работы поверхности головки рельса является работа при многоосном нагружении. В качестве деформационных моделей усталостного разрушения известны несколько моделей, обобщающих классическое соотношение Коффина – Мэнсона [212, 213] на случай многоосного усталостного разрушения: модель Брауна – Миллера [219], модель Фатеми – Соси [220] и модель Смита – Ватсона – Топпера [221]. Механизмы разрушения, соответствующие вышеперечисленным моделям, представлены на рисунке 4.8.

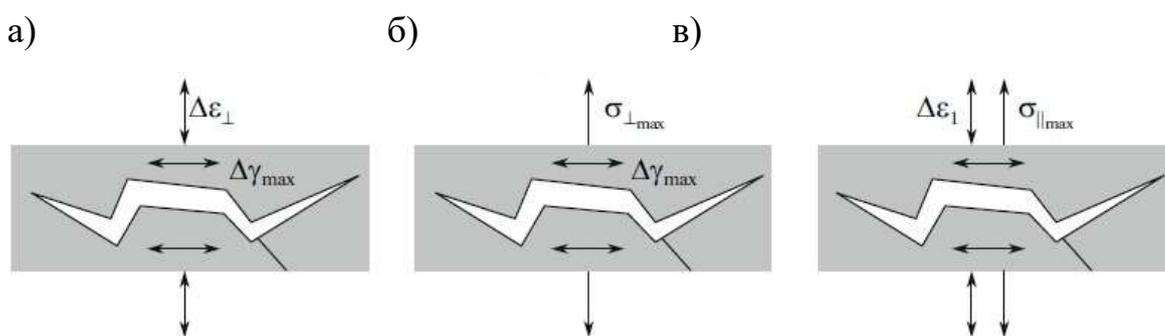


Рисунок 4.8 – Механизмы разрушения, соответствующий моделям:

а) Брауна – Миллера; б) Фатеми – Соси; в) Смита – Ватсона – Топпера [222]

Сравнивая механизмы разрушения, соответствующие вышеперечисленным моделям, с учетом характерной особенности работы поверхности головки рельса в упругопластической зоне при многоосном циклическом нагружении, включающем деформации растяжения-сжатия, нормальные к площадке максимальных сдвиговых деформаций в зоне контакта колеса с рельсом, для расчета контактно-усталостной долговечности рельсов выбрана модель Брауна – Миллера.

В модели Брауна – Миллера [219] случай многоосного усталостного разрушения описывается уравнением:

$$\varepsilon_a \cong \frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} + \alpha_{bm}\Delta\varepsilon_{\perp} = \beta_1 \frac{\sigma'_f - 2\sigma_{\perp\text{mean}}}{E} (2N_p)^b + \beta_2 \varepsilon'_f (2N_p)^c \quad (4.16)$$

где $\Delta\gamma_{\max} / 2$ – амплитуда максимальных сдвиговых деформаций, достигаемых на некоторой площадке в зоне контакта;

$\Delta\varepsilon_{\perp}$ – размах нормальных деформаций на этой площадке;

$\sigma_{\perp\text{mean}}$ – среднее за цикл нормальное напряжение на этой площадке;

$\alpha_{bm}, \beta_1, \beta_2$ – коэффициенты, $\alpha_{bm} = 0,3$; $\beta_1 = (1 + \nu) + (1 - \nu)\alpha_{bm}$; $\beta_2 = 1,5 + 0,5 \alpha_{bm}$;

ν, E – коэффициент Пуассона и модуль Юнга рельсовой стали;

$\sigma'_f, \varepsilon'_f$ – коэффициенты усталостной прочности (упругой и пластической).

Анализ повреждаемости головки рельса проводился на основе расчетных компонент тензора напряжений, алгоритма Брауна – Миллера и многоосной пластической коррекции по Нейберу [211] на циклическую диаграмму деформирования для оценки усталостной прочности рельса. Расчеты проводились при 95-процентной вероятности неразрушения.

Расчет выполнен в предположении, что накопление усталостных повреждений материала головки рельса происходит в результате многократно повторяющихся нагружений, вызываемых катящимся колесом и определяющих повышение напряжений (деформаций) в зоне механического контакта с рельсом. Одна из особенностей расчета контактно-усталостной прочности заключается в том, что компоненты тензора напряжений на поверхности рельса находятся в непропорциональном многоосном напряженном состоянии, для описания которого и прогнозирования разрушения необходимо использовать теорию многоосной усталости [219–221]. Другая особенность определяет необходимость в зоне контакта катящегося колеса по рельсу сгущать сетку конечно-элементной модели, применяемой для расчета НДС.

Для определения повреждающего действия нагрузки от прокатывания колеса по рельсу принято понятие относительного повреждения за цикл прокатки [204]. Относительная повреждаемость – величина, обратная числу циклов до об-

разования контактно-усталостной трещины при заданной величине осевой нагрузки. Для расчета относительной повреждаемости в рельсах при разных значениях вертикальной нагрузки на колесо максимальные расчетные напряжения, полученные от разных величин колесных нагрузок, параметры деформационных кривых для рельсовой стали принимались по данным раздела 4.3 и передавались в качестве входных данных в программный комплекс MSC.Fatigue [209]. Проводились расчеты относительной повреждаемости в рельсах за один цикл прокатки колеса. Результаты расчетов показаны на рисунке 4.9.

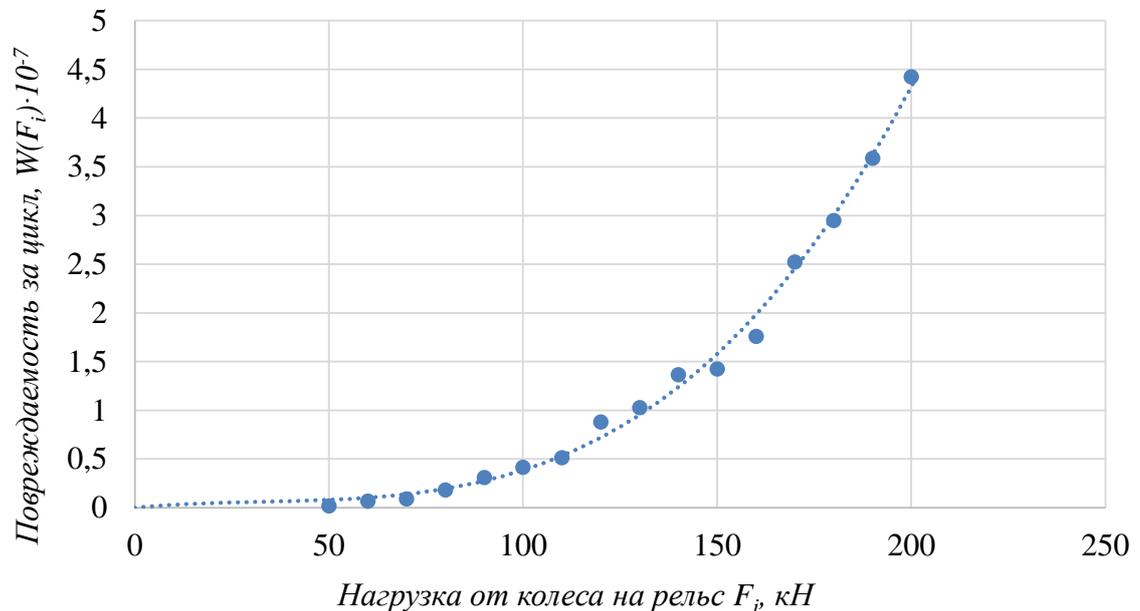


Рисунок 4.9 – Относительная повреждаемость за один цикл проката колеса при разных нагрузках от колеса

Выполненная аппроксимация точек относительной повреждаемости рельсов при прокатывании колеса с разной величиной нагрузки позволила получить теоретическую зависимость от вертикальной силы в виде полинома [203]:

$$W(F_i) = 9,15 \cdot 10^{-7} F_i^3 - 7,65 \cdot 10^{-5} F_i^2 + 0,00289 F_i. \quad (4.17)$$

Полученные результаты относительной повреждаемости при прокатывании колеса по поверхности катания рельса от величин колесных нагрузок являлись основой для проведения расчетов по повреждаемости рельсов до образования

контактно-усталостных трещин на поверхности катания.

4.6 Исследование вероятности распределения контакта колеса с рельсом по поперечному сечению поверхности катания рельса

В процессе движения колесная пара подвижного состава движется по извилистой траектории из-за конической формы поверхностей катания [223]. Для определения статистического положения точки контакта колеса с рельсом использован метод измерения горизонтального зазора между рельсом и гребнем колеса в движении. Для этого разработано устройство, состоящее из кронштейна, закрепленного на буксе колесной пары, и система технического зрения, которая включает лазерные датчики и видеокамеру с подсветкой [223]. Схема устройства для измерения поперечного перемещения колеса относительно рельса показана на рисунке 4.10.

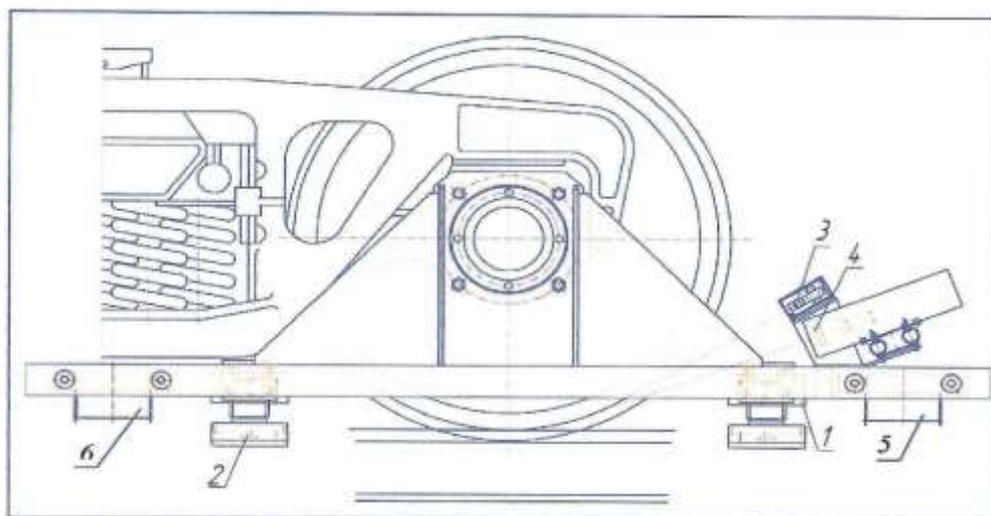


Рисунок 4.10 – Схема устройства для измерения поперечных перемещений колеса относительно рельса: 1 – кронштейн, закрепленный на буксе тележки вагона; 2 – лазерные датчики для измерения расстояния до головки рельса; 3 – лазерная подсветка; 4 – высокоточная видеокамера [223]

Величины горизонтальных смещений колеса относительно рельса регистрируются посредством лазерной подсветки и цифровой видеокамеры [223]. Предварительно система тарировалась. С этой целью на головку рельса на протяжении 1000 мм наносилась краска. При прокатке колеса, оборудованного измерительной системой, производилась регистрация зазора между гребнем колеса и головкой рельса и расстояние от внутренней грани рельса до следа от прокатки колеса. Совмещение траекторий изменения зазора и расстояния от боковой поверхности головки рельса до следа колеса позволило увязать величину зазора и точку контакта колеса с рельсом при его движении вдоль рельса.

Лазерные датчики и цифровая видеокамера вместе с источниками лазерной подсветки обеспечивают непрерывную регистрацию расстояний между колесом и рельсом в горизонтальной плоскости.

Луч лазерной подсветки развернут таким образом, чтобы он охватывал поверхность рельса и внутреннюю часть гребня колеса.

Видеокамера размещена на кронштейне так, что в кадре регистрируется зона между гребнем колеса с боковой поверхностью рельса, подсвеченная лазерным лучом (рисунок 4.11).

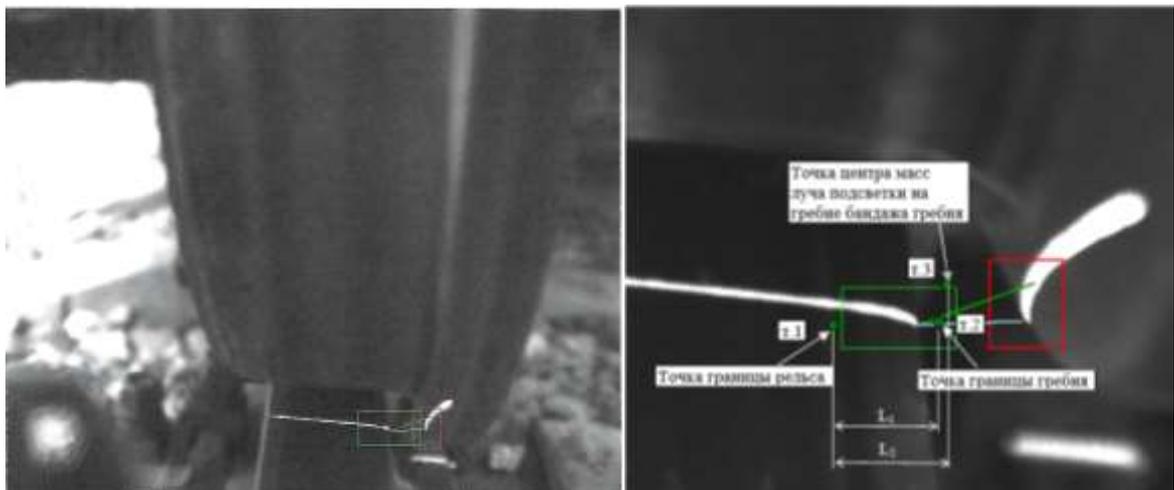


Рисунок 4.11 – Фрагмент регистрации зазора (а) и видеокадр (б) с подсвеченной зоной между гребнем колеса и боковой поверхностью рельса [223]

Горизонтальный зазор между гребнем колеса и рельсом L определяется как

разность координат по оси OX между точками 1–2 или 1–3 (рисунок (4.11)):

$$L_1 = |x_1 - x_2|, \quad (4.18)$$

$$L_2 = |x_1 - x_3|, \quad (4.19)$$

где т.1 $(x_1; y_1)$ – правая граница подсветки рельса лазерным лучом;

т.2 $(x_2; y_2)$ – точка границы подсветки гребня колеса;

т.3 $(x_3; y_3)$ – точка центра масс области луча подсветки гребня колеса.

Область гребня колеса с подсветкой лучом лазера (область 1) выделена красным цветом. Область подсветки лазером поверхности рельса (область 2) ограничена зеленым цветом. Область 1 считаем неподвижной в связи с жестким креплением кронштейна с видеокамерой на буксе колесной пары. Область 2 выделяется с учетом возможного смещения в поперечном направлении гребня колеса относительно рельса. При этом возможно перекрытие областей 1 и 2.

Области на кадре выбираются один раз для каждого *.avi-файла. В процессе обработки при необходимости можно изменить размер и положение области.

В каждом выделенном участке определяются области с наибольшей интенсивностью подсветки лазерным лучом.

В зоне 1 среди найденных областей с заданными порогами интенсивности выбирается область, вертикально ориентированная, для того чтобы определить именно подсветку гребня колеса и исключить помехи в виде ярких засветок или луч подсветки лазера на поверхности рельса.

В области 2 определения луча подсветки на поверхности рельса применяем следующий алгоритм:

1 Находим на ограниченном участке кадра все области с заданными порогами интенсивностей.

2 Области, размер которых меньше заданной величины, считаем помехами и исключаем их из дальнейшего анализа.

3 Анализируем найденные области на предмет принадлежности их лучу подсветки лазера на поверхности рельса.

Луч лазерной подсветки в некоторых условиях может быть неярым, нечет-

ким, размытым, он может быть не единым, а прерывистым на поверхности. В этих случаях получаем несколько отдельных областей. Пример такого кадра представлен на рисунке 4.12.

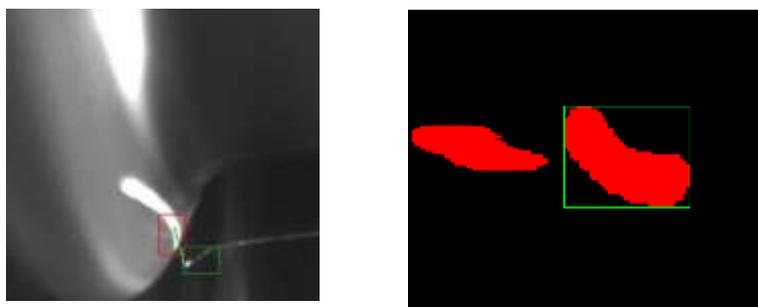


Рисунок 4.12– Пример кадра с нечетким лучом подсветки на поверхности рельса [223]

При анализе области 2 (выделена зелеными границами) получим луч прерванный, состоящий из нескольких отдельных областей, так как местами интенсивность его слабая. Каждую область условно можно вписать в прямоугольник (рисунок 4.13).

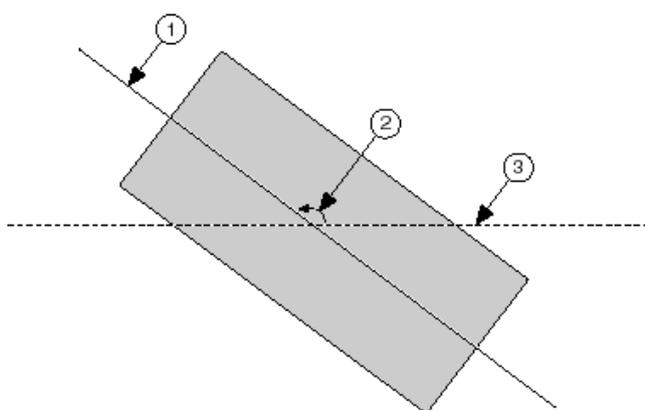


Рисунок 4.13 – Ориентация частицы: 1 – линия, проходящая через точку центра масс; 2 – угол линии ориентации; 3 – горизонтальная ось [223]

Из набора областей выбираем сначала те, которые имеют угол наклона от 0°

до 25° (горизонтальные участки луча) или от 135° до 180° .

Ориентацию выделенной частицы определяем как угол линии, которая проходит через центр масс частицы, относительно которого частица имеет самый низкий момент инерции:

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{atan} \left(\frac{2\Sigma xy}{\Sigma yy - \Sigma xx} \right) \quad (4.20)$$

Данной процедурой исключаем из дальнейшего анализа луч подсветки на гребне колеса, который ориентирован не горизонтально. Среди установленных областей луча находим область, которая расположена правее других и тем самым определяем границу рельсовой нити – предельного положения луча подсветки на поверхности рельса.

За точку 1 для измерения горизонтального зазора между рельсом и гребнем колеса принимаем нижнюю правую точку прямоугольника, в который условно вписана найденная ранее область.

Точку 2 выбираем как нижнюю левую точку прямоугольника, в который условно вписана область луча подсветки на гребне колеса, найденная в первой выделенной части кадра.

Точку 3 определяем как точку центра масс области луча подсветки на гребне. Координаты $(X_{\text{ЦМ}}; Y_{\text{ЦМ}})$ точки центра масс определяем следующим образом:

$$X_{\text{ЦМ}} = \frac{\Sigma x}{A} \quad (4.21)$$

$$Y_{\text{ЦМ}} = \frac{\Sigma y}{A} \quad (4.22)$$

где A – площадь прямоугольника, в который условно вписана найденная при анализе изображения область.

Результаты измерений поперечного перемещения колесной пары груженого полувагона относительно рельса при движении со скоростями 40 км/ч [224] представлены на рисунке 4.14.

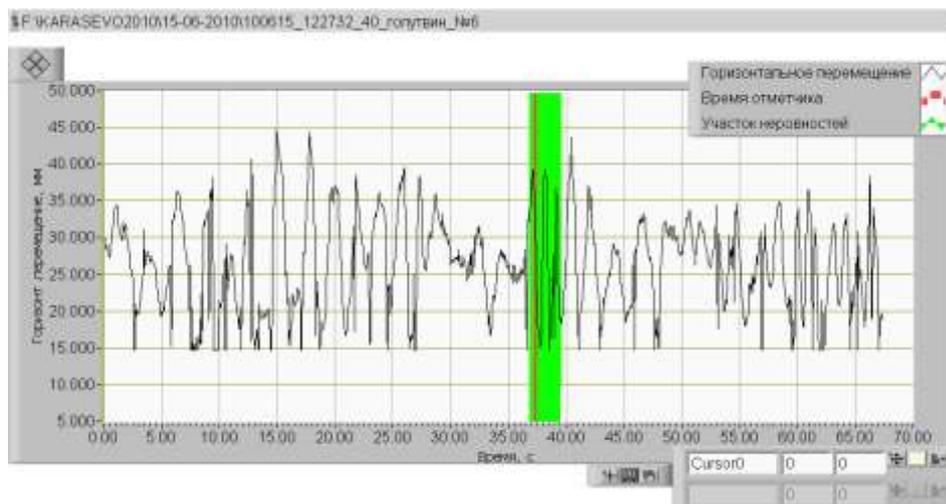


Рисунок 4.14 – Характер поперечного перемещения колесной пары относительно рельсовой колеи при проезде вагона со скоростью движения $v = 40$ км/ч

По результатам измерений определены статистические характеристики поперечных перемещений колесных пар груженных грузовых вагонов. Установлено, что для порожних вагонов размахи поперечных перемещений колесных пар имеют величины до 37 мм и распределены равномерно по поверхности катания рельса. С увеличением загрузки вагонов интенсивность влияния снижалась, максимальные амплитуды поперечных перемещений достигали величин до 35 мм. При этом доминировали перемещения с размахами 15...30 мм от рабочей внутренней грани рельсов. Пример распределения поперечных смещений колесной пары относительно рельса представлен на рисунке 4.15.



Рисунок 4.15 – Распределение поперечных перемещений колесной пары в рельсовой колее от внутренней боковой поверхности рельса

Полученное экспериментальное распределение позволяет сделать следующие выводы:

- повреждающее действие от колес подвижного состава распределяется по поперечному сечению неравномерно, основная доля приходится на продольные полосы поверхности катания рельса, расположенные на расстоянии 20...25 мм от внутренней боковой грани (~26,4 %) и на расстоянии 25...30 мм (22 %).

Дополнительно выполненные исследования твердости рельсов по поперечному сечению подтвердили, что распределение твердости достаточно хорошо коррелируется с распределениями поперечных перемещений точек контакта колес с рельсами. Установлено, что имеются качественные и количественные различия распределения твердости по поперечному сечению рельсов для участков грузового, пассажирского, смешенного движения, порожнякового хода [225].

Характер распределения твердости на поверхности катания головки рельса, замеренный в прямом участке пути на 64 км, ПК2, I главного пути Непецино – Яганово Московской ДИ, представлен на рисунке 4.16.

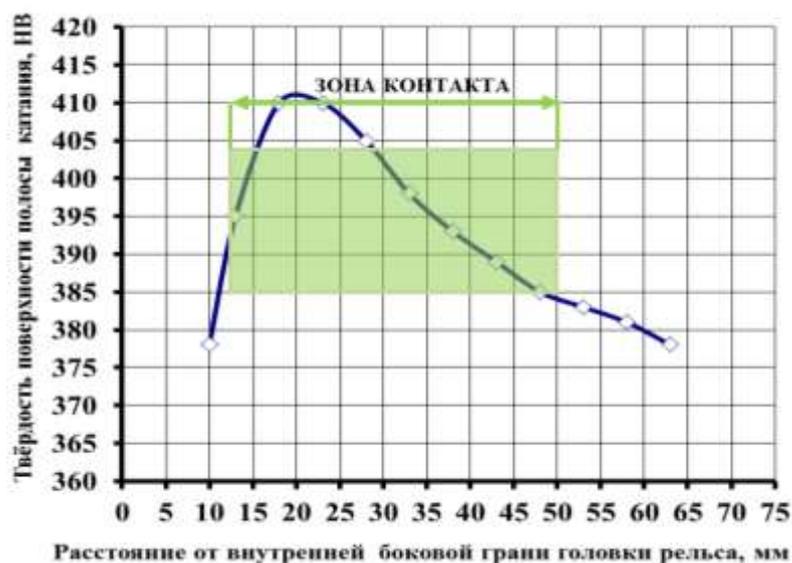


Рисунок 4.16 – Распределение твердости по поперечному сечению межпутного рельсов в прямом участке пути [225]

В прямом участке пути распределение твердости по поперечному сечению полевого и межпутного рельсов имеет симметричный вид, что позволяет ограничиться графиком распределения твердости по одному рельсу.

Представленный на рисунке 4.16 график распределения твердости на поверхности катания рельсов показал, что максимальные значения наблюдаются в зонах, расположенных на расстояниях 20...25 мм от внутренней боковой грани головки рельсов.

Проведенные исследования по распределению твердости по Бринеллю по поверхности катания головки рельсов в условиях эксплуатации показали следующее:

- в зонах наибольшего по времени контактирования колес с рельсом твердость достигает наиболее высоких значений – до 450...460 НВ. Существенное повышение твердости объясняется сильным упрочнением металла из-за пластических деформаций. Развивающиеся процессы упрочнения приводят к охрупчиванию и разрушению материала и, как следствие, к появлению выщербин на поверхности катания. Наиболее интенсивно указанные процессы развиваются на

участках тяжеловесного движения;

– в прямых участках пути наибольшие значения твердости сосредоточены в зоне внутренней выкружки рельсов на расстоянии 15...25 мм от боковой поверхности;

– на участках грузового движения при пропущенном тоннаже 180 млн т брутто максимальные значения твердости на поверхности головки рельсов достигали 406...410 НВ. При пропущенном тоннаже 840 млн т брутто значения твердости в этих зонах повышались до 450...460 НВ и наблюдались выщербины и отслоение металла.

Для учета вероятности распределения точек контакта колес по поперечному сечению рельса для расчета контактно-усталостной повреждаемости были определены весовые коэффициенты их распределения:

$$\gamma = \frac{h_i \Delta t_i}{S_{\text{ср}}}, \quad (4.23)$$

где Δt_i – ширина i -го интервала;

h_i – величина i -го параметра пропорционального величине твердости;

$S_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n h_i \Delta t_i$ – площадь фигуры, ограниченная сверху кривой изменения твердости в поперечном сечении головки рельса.

Таким образом, двумя независимыми способами получены распределения положения точек контакта колес с рельсами по поперечному сечению. Установлено, что с наибольшей долей вероятностей колеса оказывают повреждающее действие на продольную полосу, расположенную на расстоянии 20...25 мм от внутренней боковой грани рельса. Данная зона принята как критическая для определения контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельса.

Выводы по главе 4

1 Разработан алгоритм определения контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов. В соответствии с предложенным алгоритмом проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований для разработки методики расчета контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов от величин осевых нагрузок и их статистических распределений.

2 Разработана конечно-элементная модель прокатки вагонного колеса по рельсу, которая позволила установить, что компоненты тензора напряжений на поверхности рельса находятся в непропорциональном многоосном напряженном состоянии. Максимальное нормальное σ_y и максимальное касательное τ_{yz} напряжения на поверхности катания рельса не возникают одновременно, их максимумы сдвинуты во времени. Значительные касательные напряжения возникают лишь в пределах небольшой зоны вблизи контакта.

3 На основании многоосного напряженного состояния зоны контакта колеса с рельсом для определения контактно-усталостной долговечности предложена модель Брауна – Миллера. С использованием модифицированного метода твердости Расла – Фатемиде для рельсов определены параметры деформационных кривых усталости. При принятии усредненных характеристик показателей степени усталостной прочности и пластичности рельсовой стали и расчетных напряжений в зоне контакта «колесо – рельс» с учетом пластической коррекции по Нейберу в программном комплексе Fatigue проведены расчеты относительной повреждаемости поверхности катания рельсов. Получена полиномиальная зависимость относительной повреждаемости поверхности катания рельсов от вертикальной силы F_i .

4 Для измерения поперечного перемещения колесной пары в рельсовой колее с учетом извилистой траектории движения разработано устройство на основе системы технического зрения и предложен алгоритм обработки видеосигнала.

Установлено, что повреждающее действие от колес подвижного состава распределяется по поперечному сечению неравномерно, основная доля приходится на продольные полосы поверхности катания рельса, расположенные на расстоянии 20...25 мм от внутренней боковой грани (~26,4 %) и на расстоянии 25...30 мм (22 %).

ГЛАВА 5

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СИЛ ОТ РАЗНЫХ ТИПОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И СОСТОЯНИЯ ПУТИ

5.1 Задачи, условия и методы проведения испытаний по воздействию подвижного состава на рельсы

Для получения фактических данных по силовой нагруженности рельсов в условиях рядовой эксплуатации и влиянию ее на контактно-усталостную повреждаемость и ресурс проведены исследования по определению вертикальных сил, действующих на рельсы со стороны грузовых и пассажирских вагонов, в том числе с повышенными нагрузками 245 и 265 кН/ось [226 -231]. Выполнен статистический анализ распределений нагрузок, разработана методика [232] определения интегрального распределения вертикальных сил с учетом структуры поездопотока, доли грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками, состояния пути, климатических условий.

Результаты исследований по влиянию состояния пути на нагруженность рельсов, приводящего к снижению их контактно-усталостной долговечности приведены в работах [233-252].

Экспериментально полученные величины вертикальных сил позволят уточнить расчеты контактно-усталостной повреждаемости рельсов до образования трещин на поверхности катания и в конечном счете их долговечности и периодичности производства работ по текущему обслуживанию и ремонтам пути.

Условия испытаний по воздействию на путь грузовых вагонов на рельсы с осевыми нагрузками 245 кН

Для оценки силового воздействия на путь грузовых вагонов с нагрузками 245 кН/ось с разными моделями тележек на Западно-Сибирской ДИ проведены испытания по воздействию на путь поездов из полувагонов с пробегом до 150 тыс. км [229].

Для проведения комплексных испытаний по воздействию на путь были сформированы опытные поезда, состоящие из полувагонов с пробегом не менее 100 тыс. км без обточки колесных пар перед проведением испытаний:

- 68 полувагонов с нагрузкой 230 кН/ось на тележках модели 18-100 в изношенном состоянии;

- 71 полувагона модели 12-196-01 на тележках 18-194-1 производства АО «НПК Уралвагонзавод» в изношенном состоянии;

- 71 полувагона модели 12-9853 на тележках 18-9855 производства ЗАО «ТВСЗ» в изношенном состоянии ;

- 71 полувагона модели 12-2142 на тележках модели 18-194-1 производства АО «Алтайвагон» в изношенном состоянии.

В состав каждого опытного поезда сразу за тяговым локомотивом была включена тягово-энергетическая лаборатория (ТЭЛ).

Типовая схема опытных поездов, сформированных из грузовых вагонов с разными моделями тележек, представлена на рисунке 5.1.

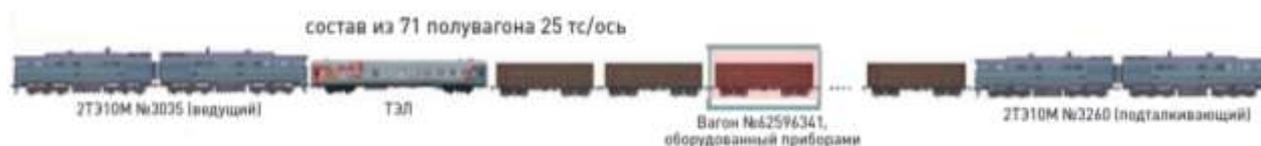


Рисунок 5.1 – Типовая схема опытных поездов, сформированных из грузовых вагонов с разными моделями тележек [229]

При прохождении грузовых вагонов по измерительным участкам, расположенным в кривых радиусом 300 и 600 м и прямой, регистрировались вертикальные силы от колес на рельсы на наружном и внутреннем рельсах в одном сечении. Исследования проводились при разных скоростях движения.

Все полувагоны были загружены углем. По результатам взвешиваний полувагонов, проведенных на станциях Виноградовская, Промугольсервис, Алтайская, Барнаул, вес полувагонов на тележках с нагрузкой 245 кН/ось находился в пределах 982...994 кН, вес полувагонов на тележках с нагрузкой 230 кН/ось в пределах 905...936 кН.

Колесные пары не имели ползунов, толщина гребней колес была в пределах 27...28 мм, прокат составлял 1,5...2,0 мм.

Условия испытаний по воздействию на путь грузовых вагонов на рельсы с осевыми нагрузками 265 кН

Исследования по воздействию на путь грузовых вагонов с нагрузками 265 кН/ось проводились на перегонах Ковдор-Мурманск Октябрьской ДИ [226, 227] и Качканар – Смычка Свердловской ДИ при их подконтрольной эксплуатации [231]. В исследованиях использовались универсальные полувагоны модели 12-9548-01, изготовленные АО «Тихвинский вагоностроительный завод» (АО «ТВСЗ»), на тележках модели 18-6863. Полувагоны загружены известняком до нагрузки 265 кН/ось.

Опытные поезда были сформированы из трех секций электровоза ВЛ80 в голове состава, ТЭЛ, 37 грузовых полувагонов модели 12-9548-01 с нагрузкой 265 кН/ось и трех секций электровоза ВЛ80 в хвосте состава (для организации движения в обоих направлениях).

Для проведения испытаний формировался опытный поезд. Схема формирования опытного состава приведена на рисунке 5.2.

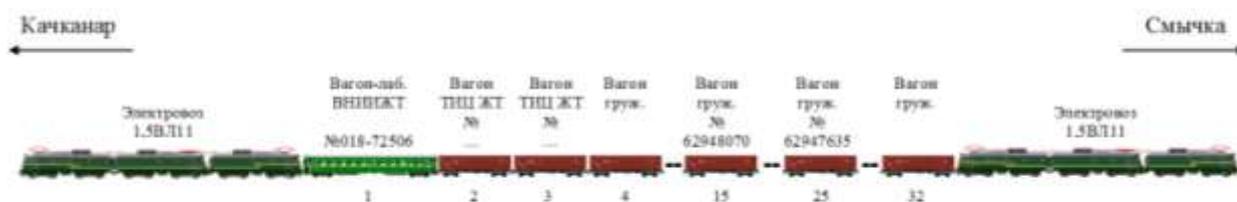


Рисунок 5.2 – Схема формирования опытного состава [231]

Вертикальные силы регистрировались от прохода по измерительному участку поезда, сформированного из 35 инновационных вагонов с нагрузкой 265 кН/ось, и поезда, сформированного из 42 вагонов-окатышевозов с нагрузкой 230 кН/ось.

При движении опытных поездов по измерительным участкам пути производилась регистрация показателей воздействия на путь.

Для измерения вертикальных сил по наружному и внутреннему рельсам было подготовлено по два сечения на каждом рельсе.

Регистрация вертикальных сил выполнялась при скоростях движения от 40 до 80 км/ч в прямых и кривых $R = 600$ м и $R = 300$ м.

Испытания проводились при движении опытных поездов передним и задним ходом на трех опытных участках.

Условия испытаний по воздействию на путь грузовых вагонов на рельсы в зонах выплесков

Для оценки влияния влажного [233] и сухого [234] выплеска на силы взаимодействия колес подвижного состава и рельсов были заложены опытные участки пути, на которых устанавливались измерительные приборы: на шейку рельса наклеивались измерительные тензорезисторы, регистрирующие вертикальные силы, и синхронно размещались прогибомеры для регистрации вертикальных перемещений рельсов. На расстоянии около 10 м от выплеска закладывался эталонный участок, на котором устанавливались аналогичные измерительные приборы для

регистрации вертикальных сил и перемещений, что позволяло сопоставлять уровни сил и перемещений от одинакового подвижного состава, движущегося с одинаковыми скоростями.

5.2 Результаты экспериментальных исследований вертикальных сил от воздействия грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками

При изучении вопросов воздействия экипажа на путь одним из первичных является вопрос формализации понятий, описывающих это воздействие. С точки зрения пути основными первичными факторами, которые приводят к деградациям и разрушениям элементов путевой инфраструктуры, являются силы, возникающие в контакте пары «колесо – рельс». Так как в настоящей работе исследуются вопросы контактно-усталостной прочности рельсов, то необходимо формализовать понятия вертикальных сил как случайного процесса.

Для исследования случайных процессов изменения вертикальных сил от воздействия подвижного состава рассмотрим их основные характеристики [235], к которым относятся математическое ожидание (среднее значение) $\bar{m}_{F_i}(t)$, дисперсия $D_{F_i}(t)$, автокорреляционные функции $R_{F_i}(t_1, t_2)$ и функции спектральной плотности G_{F_i} .

Динамические силы взаимодействия колес подвижного состава и рельсов, возникающие при движении, имеют немонотонный характер. В этих процессах наглядно видны колебания с различными амплитудами, как правило наиболее высокими от вторых колесных пар после набегающих, в их значениях отсутствует какая-либо периодичность. Анализ динамических процессов вертикальных сил показал, что до наезда первого колеса поезда на измерительный участок и съезда последнего в рельсах на расстоянии 40...50 м до и после измерительного сечения

рельса развиваются колебания, связанные с формированием его линии изгиба от приближающегося и удаляющегося поезда. Кроме того, при прохождении поезда по измерительному участку в отдельных случаях в пределах базы вагонов возникают вертикальные силы обратного знака, связанные с изгибающимися процессами в рельсах. С учетом того, что вышеперечисленные процессы не оказывают влияния на контактно-усталостную прочность рельсов, последние были исключены из рассмотрения путем усечения сигналов вдоль продольной оси пути.

Характерной особенностью процесса изменения вертикальных сил являются их более высокие значения от второй по ходу движения колесной пары, причем разница в уровнях сил может достигать 1,5...1,8 раза. Данная закономерность имеет место для грузовых вагонов с нагрузками 230, 245, 265 кН/ось и при изменении скоростей в пределах 40...80 км/ч. Характер вертикальных сил имеет импульсное нагружение при наезде колеса на измерительное сечение.

Выполним анализ на стационарность и эргодичность случайных процессов изменения вертикальных сил. Всю совокупность n измеренных значений случайных величин вертикальных сил F_i при $i = 1, 2, \dots, n$ представим в виде вариационного ряда. Определим статистические характеристики случайных процессов для разных интервалов времени. К этим характеристикам относятся среднее значение \bar{F}_i , дисперсия D_{F_i} , среднеквадратическое отклонение $\bar{\sigma}_{F_i} = \sqrt{D_{F_i}}$. Рассмотрим также центральные моменты третьего и четвертого порядков [228]. На практике используют нормированные (безразмерные) центральные моменты третьего и четвертого порядков – асимметрию SF_i (характеризует скошенность распределения и для симметричных распределений равна нулю) и эксцесс EF_i (характеризует крутость распределения) [235].

Значения моментов первого, второго, третьего и четвертого порядков для реализации $T = 43$ с от воздействия колес грузового поезда, сформированного из полувагонов с нагрузками 265 кН/ось, скоростью движения $v = 40$ км/ч, для разных интервалов времени представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Характеристики случайного процесса изменения вертикальных сил для разных интервалов времени

Параметр	Интервал времени, с				
	13...56	15...43	20...48	30...56	13...36
\bar{F}_l , кН	112	108	108	114	109
$\bar{\sigma}_{F_i}$, кН	20,9	20,8	20,8	21,46	20,7
D_{F_i} , кН ²	437	434,9	434	468	432
SF_i	4,52	4,66	4,63	4,49	4,68
EF_i	26,02	26,9	26,5	25,5	27,3

Анализ данных значений центральных моментов статистических распределений вертикальных сил показал, что все характеристики практически не зависят от начала отсчета времени. Это позволяет сделать вывод о стационарности рассматриваемого случайного процесса.

Расчеты характеристик статистических распределений вертикальных сил выполнены для движения грузовых поездов с разными скоростями (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Характеристики (центральные моменты) статистических распределений вертикальных сил при разных скоростях движения грузового поезда на участке № 2, $F_{Os} = 265$ кН/ось

Параметр	Скорость движения, км/ч					
	40	40	60	60	75	75
\bar{F}_l , кН	139	135	146	146	155	152
1	2	3	4	5	6	7
$\bar{\sigma}_{F_i}$, кН	20,9	21,1	20,6	20,7	18,7	19,33
D_{F_i} , кН ²	437,5	449	424	427	350	373
SF_i	4,56	4,47	4,2	4,1	4,5	4,1
EF_i	26,6	26,01	24,2	26,1	28,4	27,9

Анализ статистических характеристик показал, что с увеличением скорости:

- имеется тенденция к росту средних значений вертикальных сил;
- дисперсия процесса, характеризующая разброс значений, имела тенденцию к снижению;

– асимметрия, характеризующая скошенность распределения, и эксцесс, характеризующий крутость распределения, практически не зависят от скорости движения.

Для оценки распределения энергии сигнала по гармоническим составляющим процесса взаимодействия колес с рельсом выполнен спектральный анализ.

В спектре плотности мощности при скорости движения 40 км/ч основная энергия процесса взаимодействия колес с рельсами распределена в диапазоне частот до 30 Гц. Наиболее значимые величины энергии сосредоточены на частотах 6,27; 12,54; 16,44 Гц.

При увеличении скорости до 75...78 км/ч распределение значимых значений энергии в спектре плотности мощности процесса взаимодействия смещается в сторону более высоких частот – до 60 Гц. В спектре вертикальных сил всплески наибольшей мощности сосредоточены на частотах: 3,14; 12,8; 20,5; 25,3; 33,2; 45,6; 58,4 Гц.

Анализ случайных процессов изменения вертикальных сил [229] от воздействия однородных грузовых вагонов с близкими осевыми нагрузками при движении с постоянными скоростями показал:

– основные статистические характеристики процессов изменения вертикальных сил не зависят от начала отсчета времени, что подтверждает их стационарность и эргодичность;

– значения двух первых центральных моментов (среднего значения вертикальной силы и дисперсии) изменяются с изменением скорости движения, геометрии рельсовой колеи и величины осевой нагрузки.

– нормированные (безразмерные) центральные моменты третьего – симметрия и четвертого – эксцесс практически не изменялись от скорости движения, состояния пути и конструкции экипажных частей подвижного состава. На всех полученных экспериментальных распределениях медиана и среднее значение близки друг к другу, асимметричность имеет малую величину, что показывает возможность наиболее точного описания распределений вертикальных сил нормаль-

ным законом распределения.

Выполненные экспериментальные исследования по воздействию на путь грузовых вагонов с нагрузками 230 и 245 кН/ось на разных моделях тележек со средним пробегом 150 тыс. км [229] показали:

- при низких скоростях движения (до 40 км/ч) в зависимости от конструкции экипажных частей средние значения вертикальных сил от грузовых вагонов с нагрузками 245 кН/ось выше, чем от полувагонов на тележках 18-100 с нагрузками 230 кН/ось на 4,1– 10 %;

- с увеличением скорости движения разница в уровнях средних значений F_i снижается и при скорости 80 км/ч составила 3,5 – 8,3 %;

- вертикальные силы от грузовых поездов, сформированных из однородных вагонов, хорошо аппроксимируются нормальным законом распределения по критерию согласования Колмогорова – Смирнова.

Выполненные экспериментальные исследования по воздействию на путь полувагонов модели 12-9548-01 на тележках 18-6863 с осевыми нагрузками 265 кН/ось производства АО «ТВСЗ» и полувагонов на тележках 18-100 с нагрузками 230 кН/ось [231] показали:

- средние значения изменяются с изменением скорости, при этом имеет место тенденция к сближению средних и максимальных вероятных значений вертикальных сил с повышением скорости движения. При скорости движения 40 км/ч средние значения вертикальных сил от грузовых вагонов с $F_{OS} = 265$ кН/ось на 11...11,8 % выше, чем от грузовых вагонов с $F_{OS} = 230$ кН/ось, максимальные вероятные – на 7,9...8,3 %. С повышением скорости движения до 80 км/ч средние значения вертикальных сил от грузовых вагонов с $F_{OS} = 265$ кН/ось стали выше на 6,9...8,7 %, а максимальные вероятные – не более чем на 4,3 %;

- средние значения вертикальных сил от грузовых вагонов с $F_{OS} = 265$ кН/ось достигали 140...145 кН, от вагонов с $F_{OS} = 230$ кН/ось – 125 кН. При увеличении скорости средние значения вертикальных сил на внутреннем рельсе

снижались до 116...120 кН для вагонов с $F_{OS} = 265$ кН/ось и до 98...102 кН для вагонов с $F_{OS} = 230$ кН/ось. Такая же тенденция имела место и для максимальных вероятных значений вертикальных сил: для $F_{OS} = 265$ кН/ось F_i^{\max} снижались с 165...170 до 135...142 кН. На наружном рельсе характер изменения вертикальных сил имел обратный характер – с повышением скорости средние значения повышались для $F_{OS} = 230$ кН с 112 до 138 кН, для $F_{OS} = 265$ кН/ось с 135 до 160 кН. Максимальные вероятные значения также имели тенденцию к повышению : для вагонов с $F_{OS} = 265$ кН/ось – с 165 до 190...210 кН и для $F_{OS} = 230$ кН/ось – с 145...158 до 170...175 кН.

По результатам испытаний были обработаны массивы полученных данных по вертикальным силам, построены гистограммы вертикальных сил в зависимости от участка и скорости движения грузовых поездов [231]. На основе этих данных были определены функции плотности вероятности распределения вертикальных сил.

Вертикальные силы от грузовых поездов, сформированных из вагонов с $F_{OS} = 265$ кН/ось, хорошо аппроксимируются нормальным законом распределения по критерию согласования Колмогорова – Смирнова.

5.3 Экспериментальное исследования влияния выплесков на силовое воздействие подвижного состава на рельсы

Одним из мест резкого изменения жесткости железнодорожного пути являются зоны локальных выплесков. Физико-механические параметры балласта изменяются во времени по мере увеличения пропущенного тоннажа. В порах щебня возникают зоны повышенной влажности до 15 % по весу, с содержанием частиц грунта размерами частиц 0,100...0,005 мм [236–239]. Наиболее частое их появле-

ние отмечается летом и осенью в дождливую погоду. Исследованиями Е.С. Варызгина [236], С.Н. Попова [237] и других установлено количественное соотношение влияния повышенной влажности балластного слоя на уменьшение несущей способности, снижение упругих свойств и интенсивного накопления остаточных деформаций [238, 239]. Е.С. Ашпизом [238] установлено, что выплески уменьшают модуль деформации щебня до 80 МПа и менее по сравнению с нормальным состоянием 90 МПа и более. Для измерения сил в зоне контакта колеса с рельсом разработаны и изготовлены тензометрические колесные пары (ТКП) [240 –244]. Для восстановления непрерывной форму сигнала по дискретным данным с ТКП разработана методика [245]. С использованием нейронных сетей [246] разработана программа в программном комплексе MATLAB для прогнозирования сил в зоне контакта колеса с рельсом. В составе диагностического поезда с использованием ТКП приведены исследования влияния состояния пути на уровни силового воздействия в зоне контакта колеса с рельсом. Установлено, что в местах влажных и сухих выплесков наблюдался значительный рост сил взаимодействия в системе « колесо – рельс» [247– 251]. Для определения количественных значений вертикальных сил рельсов на участках с влажным выплеском и на смежном участке без выплеска в осенних условиях [233].

На рисунке 5.3 представлена гистограмма распределения вертикальных сил при движении колес пассажирских вагонов по влажному выплеску и эталонному пути.

На рисунке 5.4 представлена точечная диаграмма прогибов рельсов при движении колес пассажирских вагонов по влажному «выплеску» и эталонному участку пути. Установлено, что от колес пассажирских вагонов на эталонном участке вертикальные перемещения имеют тренд к незначительным повышениям прогибов с 0,5 до 0,7 мм при изменении вертикальных сил от 45 до 140 кН. При проезде зоны влажного «выплеска» вертикальные прогибы изменялись в диапазоне 4,8...6,2 мм с изменением величин вертикальных сил от 109 до 214 кН.

Описательная статистика по вертикальным силам и прогибам рельсов от

воздействия колес пассажирских вагонов при движении по влажному выплеску и по эталонному участку пути представлена в таблице 5.3.

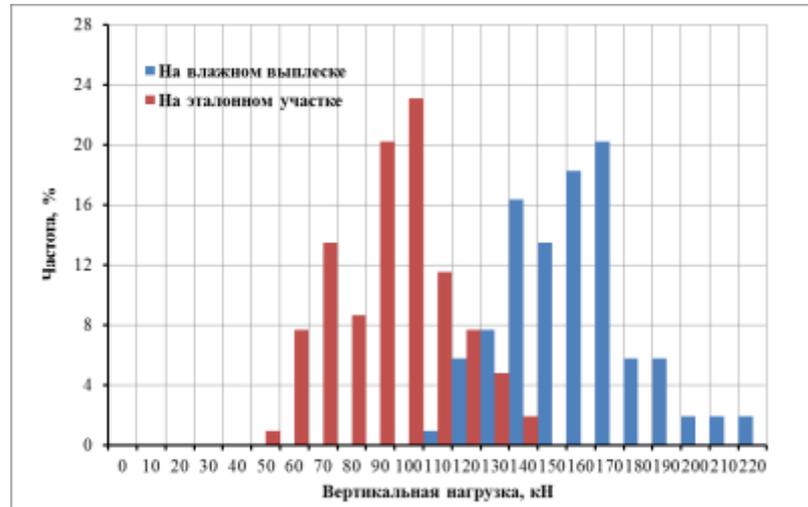


Рисунок 5.3 – Гистограмма вертикальных сил, действующих на рельс от колес пассажирских поездов в зоне влажного выплеска и без

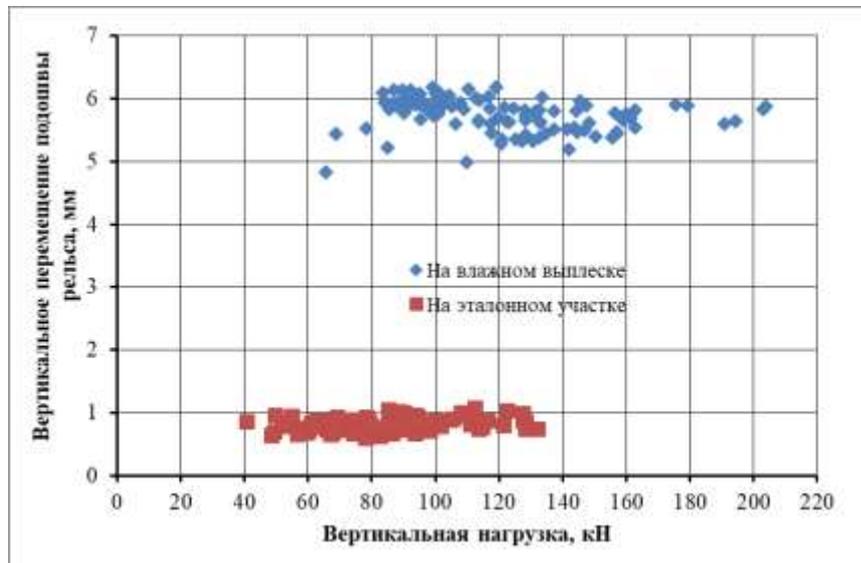


Рисунок 5.4 – Зависимости вертикального перемещения подошвы рельса от вертикальных сил, вызванных колесами пассажирских поездов при движении по зоне выплеска (синий) и по эталонному участку (красный)

Таблица 5.3 – Статистическое описание воздействия на рельс колес пассажирских поездов

Показатель	Вертикальная нагрузка, кН		Вертикальное перемещение подошвы рельса, мм	
	На влажном выплеске	На эталонном участке	На влажном выплеске	На эталонном участке
Среднее значение	153,4	88,4	5,78	0,52
Стандартное отклонение	22,3	20,1	0,25	0,10
Дисперсия выборки	496,5	402,0	0,065	0,01
Минимум	108,9	48,6	4,99	0,30
Максимум	214,3	139,1	6,18	0,75

Анализ экспериментальных данных показал:

- при движении по влажному выплеску из-за снижения модуля деформаций средние вертикальные перемещения возросли с 0,52 до 5,76 мм (в 11 раз), при этом максимальные величины прогибов достигали на выплеске 6,18 мм, на эталонном участке 0,75 мм. Величины среднеквадратических отклонений на «выплеске» также имели более широкий диапазон $\bar{\sigma}_{F_i} = \pm 0,25$ мм, чем на эталонном участке $\bar{\sigma}_{F_i} = \pm 0,10$ мм;

- повышенные просадки рельсошпальной решетки в зоне выплесков определили более высокие уровни средних и максимальных значений вертикальных сил. Соответственно, средние величины вертикальных сил на влажном выплеске достигали $\bar{F}_i = 153$ кН против $\bar{F}_i = 88$ кН на эталонном участке, или больше в 1,73 раза. Максимальные величины вертикальных сил на влажном выплеске достигали $P_{\text{в}}^{\text{max}} = 214$ кН против $P_{\text{в}}^{\text{max}} = 139$ кН на эталонном участке. Для выплесков характерно повышение дисперсии вертикальных сил до $D_{F_i} = 496$ кН² против $D_{F_i} = 402$ кН² для эталонного участка, что определяло несколько более высокие величины среднеквадратических отклонений вертикальных сил в зоне выплеска $\bar{\sigma}_{F_i} = \pm 22,2$ кН против $\bar{\sigma}_{F_i} = \pm 20,1$ кН на эталонном участке;

- от грузовых поездов, содержащих в своем составе груженные и порожние вагоны, характер изменения вертикальных сил и прогибов имел существенное различие, которое определялось различием в величинах осевых нагрузок. Типичное распределение представлено на рисунке 5.5.

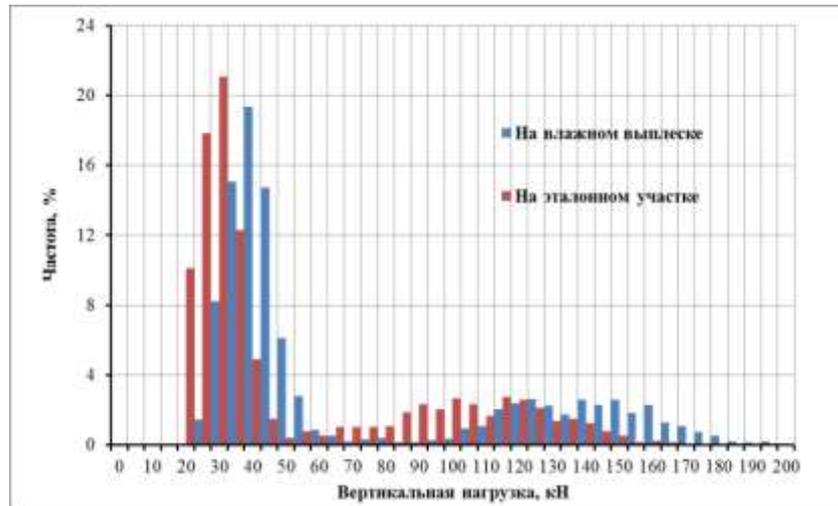


Рисунок 5.5 – Гистограмма распределения вертикальных сил, действующих на рельс от колес грузового состава в зоне влажного выплеска и на эталонном участке

Как для эталонного участка пути, так и для зоны выплеска характерна двух- или полимодальная гистограмма с разделением распределений вертикальных сил по уровням осевых нагрузок.

Для эталонного участка характерно двухмодальное распределение с разделением средних значений вертикальных сил. Для рассматриваемого случая величины средних значений для груженных вагонов имели значение 105 кН, для порожних – 27,2 кН. Для груженных вагонов в связи с разбросом степени их загрузки характерен широкий диапазон среднеквадратических отклонений ($\pm 22,9$ кН), что почти в три раза больше, чем для порожних вагонов ($\pm 7,2$ кН). Для распределений вертикальных сил как от порожних вагонов, так и груженных вагонов для аппроксимации опытных данных может быть использован нормальный закон по критерию согласования Колмогорова – Смирнова. При движении по влажному выплеску характер распределений вертикальных сил сохранился со смещением средних

значений в сторону увеличения. При этом средние значения от воздействия груженых вагонов достигли величины 135,2 кН, что больше в 1,28 раз, чем на эталонном участке пути. От воздействия на рельсы колес порожних вагонов средние значения также увеличились до 38 кН, что выше по отношению к эталонному участку в 1,39 раза. При этом дисперсия и среднеквадратические отклонения практически не изменились.

На рисунке 5.6 показаны точечные диаграммы распределения прогибов рельса при проезде грузового поезда через зоны влажного выплеска и эталонного участка.

Описательная статистика по вертикальным силам и прогибам рельсов от воздействия колес грузовых вагонов при движении по влажному выплеску и по эталонному участку пути представлена в таблице 5.4.

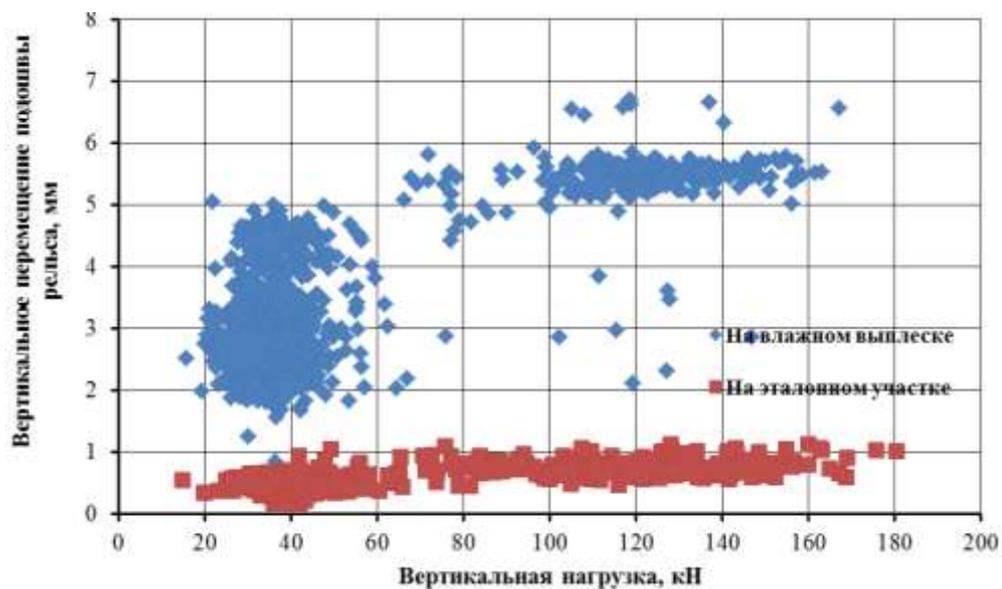


Рисунок 5.6 – Зависимости изменения прогибов рельсов от вертикальных сил при движении грузового поезда через зону выплеска и по эталонному участку

Таблица 5.4 – Статистическое описание воздействия на рельс колес грузовых поездов

Показатель	Вертикальная нагрузка, кН				Вертикальное перемещение подошвы рельса, мм			
	На влажном выплеске		На эталонном участке		На влажном выплеске		На эталонном участке	
	$F_{iB} \leq 60$ кН	$F_{iB} > 60$ кН	$F_{iB} \leq 50$ кН	$F_{iB} > 50$ кН	$F_{iB} \leq 60$ кН	$F_{iB} > 60$ кН	$F_{iB} \leq 50$ кН	$F_{iB} > 50$ кН
Среднее значение	38,0	135,2	27,2	105,5	3,07	5,39	0,49	0,76
Стандартное отклонение	7,5	23,2	7,2	22,9	0,79	0,56	0,09	0,13
Дисперсия выборки	55,8	538,1	51,4	524,0	0,63	0,31	0,01	0,02
Минимум	18,2	70,3	15,9	60,5	0,85	2,10	0,18	0,45
Максимум	67,8	195,6	59,0	180,7	5,51	6,71	1,05	1,13

Из анализа опытных данных установлено, что:

– на влажном выплеске при уровнях вертикальных сил в диапазоне 18...67 кН, характерных для порожних и малогруженных вагонов, вертикальные перемещения рельса изменяются в диапазоне 0,85...5,5 мм. При движении груженых вагонов по участку прогибы возрастают и находятся в диапазоне 2,1...6,71 мм при изменении вертикальных сил в диапазоне 70,3...195,6 кН;

– на эталонном участке средние вертикальные перемещения рельса от воздействия порожних вагонов составили 0,52 мм при среднеквадратических отклонениях $\pm 0,32$ мм и изменялись в пределах 0,1...1,1 мм при изменении вертикальных сил 15,9...59 кН. С увеличением осевых нагрузок имела место тенденция к повышению средних величин прогибов до 0,86 мм при среднеквадратических отклонениях $\pm 0,24$ мм при изменении уровней вертикальных сил в диапазоне 60,5...180,7 кН;

– полученные облака точек показывают, что прогибы рельса при движении подвижного состава по влажному выплеску, так же как и величины вертикальных сил, имеют значительный разброс. Так, в зоне действий вертикальных сил от порожних вагонов величины среднеквадратических отклонений прогибов достигали $\pm 0,79$ мм, от колес груженных вагонов $\pm 0,56$ мм. При этом среднеквадратические отклонения прогибов на эталонном участке не превышали от порожних вагонов $\pm 0,09$ мм, от колес груженных вагонов $\pm 0,13$ мм.

Выполненные исследования нагруженности рельсов при движении грузовых и пассажирских поездов через зону влажного выплеска позволили установить:

– при движении подвижного состава по влажному выплеску из-за снижения модуля деформаций балластного слоя средние значения вертикальных сил повышаются в 1,35...1,8 раза, средние вертикальные перемещения возросли в 6...11 раз. Величины среднеквадратических отклонений силовых и кинематических параметров имеют диапазон в 2...3 раза шире, чем на эталонном участке;

– от воздействия грузовых поездов, сформированных из грузовых вагонов с разной степенью загрузки и, соответственно, с разными осевыми нагрузками, при движении как по эталонному участку пути, так и по влажному выплеску формируется двух- или полимодальное распределение вертикальных сил. Каждая из составляющих распределения формируется группами вагонов с близкими осевыми нагрузками и может быть аппроксимирована нормальным законом распределения со своими параметрами – математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением.

В летний период «грязевые мешки» высыхают, превращаясь в монолитное жесткое основание, которое приводит к повышенной жесткости пути [234].

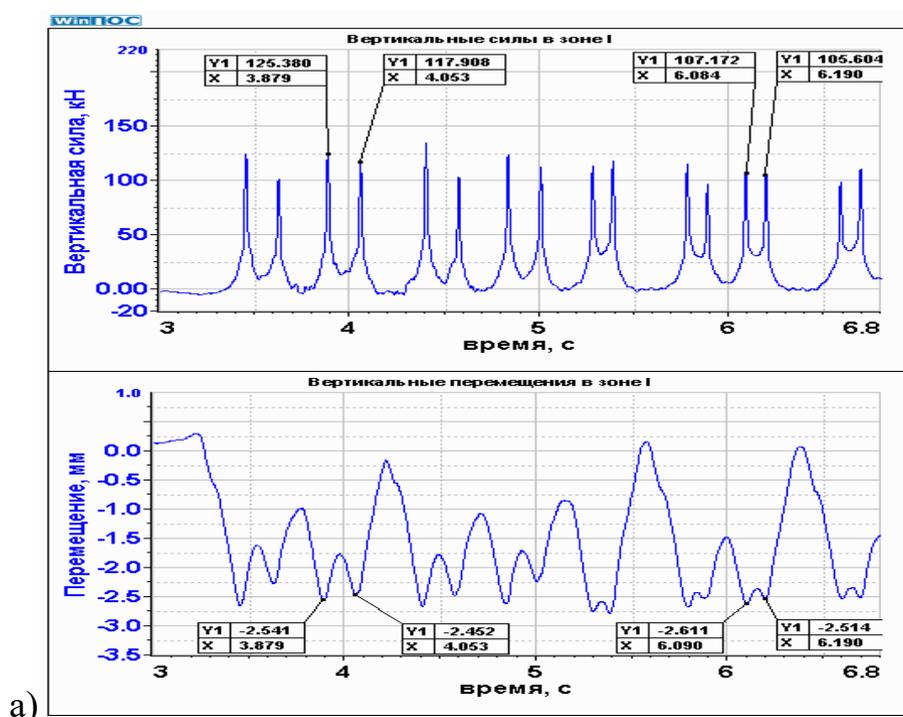
Для оценки влияния выплесков на нагруженность элементов верхнего строения пути выполнены измерения вертикальных сил и перемещений на участках с сухим выплеском и на смежном участке без выплеска в летних

условиях [234]. Рассмотрим результаты испытаний в летний период при высохших «грязевых мешках». Измерительный участок выбран на 134 км ПК7 II главного пути перегона Голутвин – Луховицы направления Москва – Рязань Московской ДИ в кривой $R = 2130$ м. Для измерений был выбран внутренний рельс круговой кривой. Верхнее строение пути включало рельсы Р65 категории ДТ350, производства АО «Евраз 3СМК», шпалы железобетонные, крепления АРС-4, балласт щебеночный.

В двух зонах были установлены измерительные приборы для регистрации вертикальных сил и перемещений:

- на расстоянии 10 м до начала зоны выплеска (зона I);
- в зоне непосредственного выплеска (зона II).

Измерения вертикальных сил и прогибов рельсов выполнялись при движении по ним грузовых и пассажирских поездов с установленными скоростями. Типовые осциллограммы вертикальных сил и перемещений в зонах I и II представлены на рисунке 5.7.



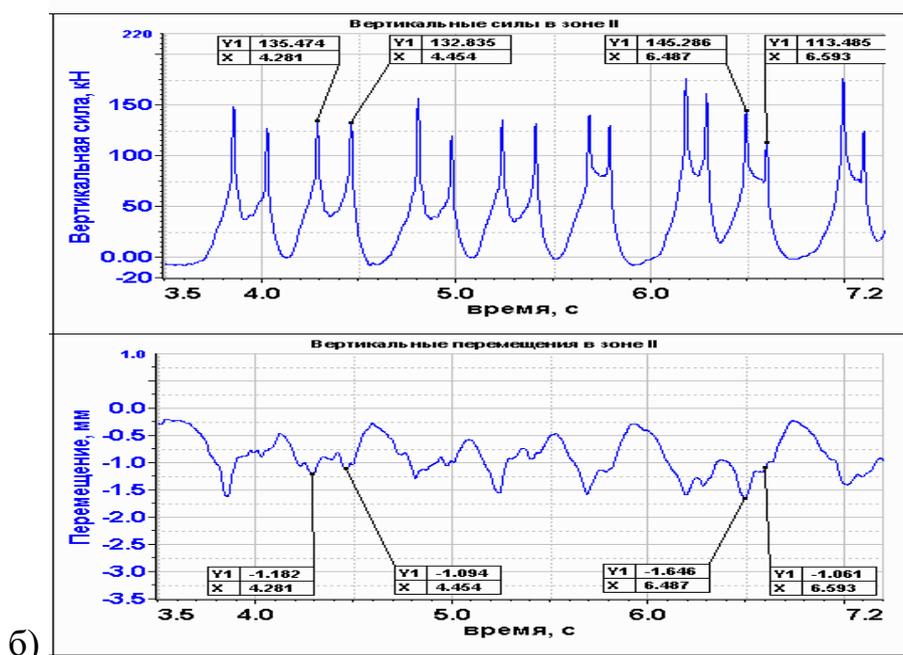


Рисунок 5.7 – Типовые осциллограммы вертикальных сил и перемещений рельса при движении грузового поезда: а) вне зоны выплеска;

б) в зоне выплеска

Анализ экспериментальных данных показал:

– уровни вертикальных сил от колес локомотивов в зоне I (без выплеска) изменялись от 100 до 125 кН, от вагонов от 95 до 118 кН. В базе тележки усилия сохранялись при съезде колес с зоны установки датчиков до 20...40 кН;

– при вхождении колес на выплеск (зона II) характер динамических сил изменился. Во-первых, возросли величины пиков вертикальных сил – от колес локомотива до 130...150 кН, от колес грузовых вагонов до 130...170 кН. В зоне базы тележки при съезде колеса с датчика вертикальные усилия по сравнению с зоной I (вне зоны выплеска) увеличились в 2 раза и составили 50...80 кН и сохранялись в базе тележки. Уровни сил снижались до нулевого значения в ограниченный период в промежутках между тележками одного вагона.

В таблице 5.5 представлена статистика по этим данным. Средние величины вертикальных сил от грузовых поездов в зоне I составили 97,4 кН, в то время, как в зоне II возросли до 133,2 кН, что выше на 36,7%. При этом движение по выплеску характеризуется более высоким СКО вертикальных сил $\bar{\sigma}_{F_i} = \pm 29,3$ кН

против $\bar{\sigma}_{F_i} = \pm 20,8$ кН.

Таблица 5.5 – Описательная статистики вертикальных сил и перемещений рельса от колес грузовых поездов при движении по сухому выплеску и вне его

Статистический параметр	Вне зоны выплеска		Зона выплеска	
	Вертикальная сила, кН	Вертикальное перемещение рельса, мм	Вертикальная сила, кН	Вертикальное перемещение рельса, мм
Среднее	97,362	2,598	133,194	1,529
СКО	20,835	0,149	29,284	0,352
Минимум	25,643	2,001	35,896	0,751
Максимум	153,037	3,011	208,345	2,416

Уровень средних вертикальных перемещений в зоне I составил 2,59 мм, при среднеквадратическом отклонении $\bar{\sigma}_{F_i} = \pm 0,149$ мм. Средние величины вертикальных перемещений при движении поездов в зоне выплеска снизились до 1,53 мм, а среднеквадратические отклонения перемещений рельса возросли до $\bar{\sigma}_{F_i} = \pm 0,352$ мм.

Таким образом, выплески в сухом состоянии повышают жесткость подшпального основания с 37,3 кН/мм до 82,4 кН/мм или 2,3 раза. Это вызвало повышение средних величин вертикальных сил взаимодействия колес и рельсов с 97,4 кН до 133,2 кН или в 1,37 раза (36,7 %).

Выполненные исследования нагруженности рельсов при движении грузовых поездов через зону выплеска при его влажном и сухом состояниях позволили установить:

– при движении по влажному выплеску из-за снижения модуля деформаций средние вертикальные перемещения возросли с 0,82 мм до 5,76 мм (или ~7 раз), при этом максимальные величины прогибов рельсов достигали на выплеске 6,18 мм, на эталонном участке 1,07 мм. Величина среднеквадратического отклонения на выплеске также имела более широкий диапазон $\bar{\sigma}_{F_i} = \pm 0,27$ мм, на эталонном

участке $\bar{\sigma}_{F_i} = \pm 0,10$ мм;

– повышенные просадки рельса в зоне выплесков определяются более высокими уровнями средних и максимальных значений вертикальных сил соответственно $\bar{F}_i = 119$ кН против $\bar{F}_i = 85$ кН на эталонном участке или в 1,4 раза. Максимальные величины вертикальных сил на влажном выплеске достигали $\bar{F}_i = 203$ кН, против $\bar{F}_i = 132$ кН на эталонном участке.

– выплески в сухом состоянии повышают жесткость подшпального основания с 37,3 кН/мм до 82,4 кН/мм или 2,3 раза. Это вызвало повышение средних величин вертикальных сил взаимодействия колес и рельсов с 97,4 кН до 133,2 кН или в 1,37 раза.

5.4 Методика определения интегрального статистического распределения вертикальных сил, действующих на рельсы

Распределение силовых факторов для конкретного участка железнодорожного пути является многофакторным процессом, количественные параметры которого зависят от структуры поездопотока, типа подвижного состава и его доли в суточном пакете поездов проходящему по данному участку, установленной скорости движения, профиля пути (прямая, кривая), технического состояния подвижного состава и элементов верхнего строения пути, состояния поверхности катания рельсов, состояния балласта (наличия выплесков)

Ниже представлен алгоритм определения интегрального распределения вертикальных сил от разного подвижного состава для произвольного участка [232].

5.4.1 Алгоритм определения интегрального закона распределения вертикальных сил

Принимаются следующие допущения:

- суточный пакет поездов принимается одинаковым в течение года;
- климатические условия распределяются на две составляющие – зима и лето. Последние определяют разницу силового воздействия из-за изменения жёсткости пути.

С учётом принятых допущений интегральное распределение вертикальных сил может быть определено по следующей последовательности.

На основании значительного количества экспериментальных исследований [226–231] по воздействию грузовых, пассажирских, высокоскоростных поездов на железнодорожный путь установлены распределения вертикальных сил от воздействий поездов, сформированных из однородных вагонов с близкими осевыми нагрузками, которые достаточно хорошо аппроксимируются нормальным законом распределения по критерию согласования Колмогорова – Смирнова.

Плотность распределения вероятностей вертикальных сил определяется по нормальному закону [141,142] по выражению

$$f(P_{Fi}) = \frac{1}{\sigma_{Fi}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Fi-\bar{m}_{Fi})^2}{2}} \quad (5.1)$$

где

F_i – текущее значение вертикальной силы;

\bar{m}_{Fi} – математическое ожидание вертикальных сил;

σ_{Fi} – среднеквадратическое отклонение вертикальных сил.

При дополнительном учёте вертикальных сил ударного характера от колес с дефектами на поверхности катания колес в виде ползунов, наваров, неравномерного проката распределение вертикальных сил более точно описывается логарифмическим законом.

рифмическим нормальным законом [142].

Плотность распределения случайной величины, логарифм которой распределяется по нормальному закону, описывается соотношением:

$$f(P_{Fi}) = \frac{1}{\sigma_{F_i} F_i \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{\ln(F_i - \bar{m}_{F_i})}{2\sigma_{v_i}^2} \right\}, \quad (5.2)$$

где \bar{m}_{F_i} , σ_{F_i} – математическое ожидание и СКО вертикальных сил F_i – текущее значение вертикальной силы.

При наличии в составе поездов груженых и порожних вагонов распределение представляет суперпозицию нормальных законов со своими математическими ожиданиями и среднеквадратическими отклонениями для груженых вагонов $\bar{m}_{F_i}^{\text{гр}}$ $\sigma_{F_i}^{\text{гр}}$ и порожних $\bar{m}_{F_i}^{\text{пор}}$ $\sigma_{F_i}^{\text{пор}}$.

Выражение для интегральной частоты вертикальной силы F_i от разных типов подвижного состава $k_1, k_2, k_3 \dots k_j$, участвующих в формировании закона распределения частот для сил F_i можно записать в виде:

$$\begin{aligned} F_1 \rightarrow P_1^\Sigma &= \gamma_{k_1} P_{F_1}^{k_1} + \gamma_{k_2} P_{F_2}^{k_2} + \dots \gamma_{k_j} P_{F_1}^{k_j}; \\ F_2 \rightarrow P_2^\Sigma &= \gamma_{k_1} P_{F_2}^{k_1} + \gamma_{k_2} P_{F_2}^{k_2} + \dots \gamma_{k_i} P_{F_2}^{k_j}; \\ F_i \rightarrow P_i^\Sigma &= \gamma_{k_i} P_{F_i}^{k_1} + \gamma_{k_2} P_{F_i}^{k_2} + \dots \gamma_{k_i} P_{F_i}^{k_j}, \end{aligned} \quad (5.3)$$

где

P_i^Σ – интегральная частота вертикальной F_i силы от суточного пакета поездов;
 $P_{F_1}^{k_1}, P_{F_1}^{k_2} \dots P_{F_i}^{k_j}$ – частоты вертикальной силы F_1 от $k_1 \dots k_j$ – типа подвижного состава. Статистические характеристики частот для вертикальных сил должны быть экспериментально установлены отдельно для каждого типа подвижного состава.

k_j – тип подвижного состава, курсирующий на данном участке;

$\gamma_{k_1}, \gamma_{k_2} \dots \gamma_{k_j}$ – доля k_j подвижного состава, курсирующего в суточном пакете поездов;

$F_1, F_2 \dots F_i$ - вертикальные силы в статистическом распределении с шагом Δ

k – тип подвижного состава;

k_1 – локомотивы;

k_2 – грузовые поезда из полногружёных вагонов с нагрузкой до 230 кН/ось на тележках 18-100;

k_3 – грузовые поезда из порожних и малогружёных вагонов на тележках 18-100;

k_4 – грузовые поезда из инновационных вагонов с осевой нагрузкой 245кН/ось ;

k_5 – грузовые поезда инновационных вагонов с нагрузкой 265 кН/ось ;

k_6 – пассажирского поезда;

k_7 – скоростные пассажирские поезда («Невский экспресс» и др.);

k_8 – высокоскоростные поезда («Сапсан»);

k_9 – мотор-вагонный подвижной состав.

Для определения интегрального закона распределения необходимо учитывать фактически установленные скорости движения и климатические условия эксплуатации.

Для случая, когда установленные скорости подвижного состава занимают промежуточное положение между скоростями V_{min} и V_{max} , для которых определены статистические параметры законов распределения, требуется выполнить дополнительный расчет. Определяются \overline{m}_{F_ϕ} и $\overline{\sigma}_{F_\phi}$ для фактически установленной скорости V_ϕ .

Пусть скорости V_{min} соответствуют $\overline{m}_{F_{min}}$ и $\overline{\sigma}_{F_{min}}$, а скорости V_{max} – соответствуют $\overline{m}_{F_{max}}$ и $\overline{\sigma}_{F_{max}}$.

Допуская, что значения математического ожидания и СКО линейно изменяются с повышением скорости. Тогда для фактически установленной скорости движения V_ϕ величина математического ожидания определится как:

$$\overline{m}_{FS_\phi} = m_{FS_{min}} + \Delta \overline{m}_F \cdot \frac{V_\phi - V_{min}}{V_{max} - V_{min}}, \quad (5.4)$$

где $\Delta \overline{m}_F = \overline{m}_{F_{max}} - \overline{m}_{F_{min}}$ – изменение значения математического

ожидания вертикальных сил при повышении скорости с V_{min} до V_{max} .

Величина среднеквадратического отклонения определяется аналогично как:

$$\bar{\sigma}_{F\phi} = \bar{\sigma}_{F_{min}} + \Delta\bar{\sigma}_F \cdot \frac{V_\phi - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \quad (5.5)$$

где $\bar{m}_{FV\phi}$ – математическое ожидание вертикальных сил F_i для фактически установленной скорости на участке – V_ϕ ;

$\sigma_{FV\phi}$ – среднеквадратическое отклонение вертикальных сил для фактически установленной скорости V_ϕ на рассматриваемом участке;

$\Delta\bar{m}_F$ – разница в математических ожиданиях вертикальных сил, соответствующая двум ближайшим скоростям V_{min} ; V_{max} , для которых определены экспериментально статистические параметры;

$\Delta\bar{\sigma}_F$ – разница в среднеквадратических отклонениях, соответствующая двум ближним скоростям V_{max} , V_{min} , для которых определены экспериментально статистические параметры;

$\bar{m}_{FV_{min}}$, $\bar{m}_{FV\phi}$, $\bar{m}_{FV_{max}}$ – математическое ожидание, соответствующее скорости, V_{min} ; V_ϕ ; V_{max} .

Для уточнённых значений $\bar{m}_{FV\phi}$, $\bar{\sigma}_{FV\phi}$ характерных для установленной скорости движения поездов строятся законы распределений вертикальных сил для каждого типа подвижного состава, участвующего в суточном пакете поездов и определяется интегральный закон распределения вертикальных сил для фактической скорости V_ϕ .

Для учёта климатических условий с учётом продолжительностей летнего и зимнего периодов, принимая период эксплуатации участка железнодорожного пути для летних условий – α , для эксплуатации в зимних условиях – β , определяются интегральные частоты вертикальной силы F_i для летнего и зимнего периодов эксплуатации участка: $P_{iл}^\Sigma$, $P_{iз}^\Sigma$.

Тогда для конкретного значения вертикальной силы F_i интегральная частота определяется как $(\alpha P_{iл}^\Sigma + \beta P_{iз}^\Sigma)$

$$P_{i_{л+з}}^{\Sigma} = \alpha P_{i_{л}}^{\Sigma} + \beta P_{i_{з}}^{\Sigma}, \quad (5.6)$$

где $P_{i_{л+з}}^{\Sigma}$ – интегральная частота вертикальной силы F_i от всех типов подвижного состава, проходящего по рассматриваемому участку с учётом установленной скорости движения, с учётом климатических условий «зима-лето».

5.4.2 Расчет интегрального распределения вертикальных сил от суточного пакета поездов на произвольном участке пути

В качестве примера рассчитаем интегральный закон распределения вертикальных сил на прямом участке перегона Голутвин- Подлипки Московской ДИ, 2-й главный путь. По данным технического отдела Голутвинской дистанции пути – путь 1-го класса категории 1/А/1, грузонапряженность по перегону 106,8 млн т брутто, количество пассажирских поездов - 46, грузовых – 78, моторвагонный подвижной состав - 11. На участке установлена скорость движения для грузовых поездов $V^{\text{груз}} = 80$ км/ч, пассажирских $V^{\text{пас.}} = 120$ км/ч.

Рассчитаем долю по типам подвижного состава γ^{K_i} пропорционально количеству колесных пар.

Количество колесных пар определялось исходя из следующих соображений - вес грузовых поездов 3600...4000 тс при весе груженых грузовых вагонов 94 тс.

В грузовом поезде весом 4000 тс в среднем получается 42 вагона или для четырехосных вагонов количество колесных пар в поезде составит 170 шт. Для количества 78-ти грузовых поездов – 13260 колесных пар.

Суммарное количество локомотивов определялось по количеству грузовых и пассажирских поездов $\Sigma_{л} = 78 + 46 = 124$. Для проведения расчетов рассматриваются двухсекционные электровозы с двумя двухосными тележками в каждой

секции, суммарное количество колесных пар в локомотиве принимаем 8 к.п., тогда суммарное количество определится как $8 \times 124 = 992$ к.п.

Количество вагонов в пассажирских поездах принимаем 16 шт., тогда суммарное количество колёсных пар от пассажирских поездов $46 \times 16 \times 4 = 2944$ к.п.

Количество колёсных пар моторвагонного подвижного состава $4 \times 11 \times 12 = 528$ к.п.

Суммарное количество колёсных пар проходящих по рассматриваемому участку за сутки :

$$\Sigma k_j = 13260 + 992 + 2944 + 528 = 17724 \text{ к.п.}$$

При этом набор элементов множества k_j следующий:

$$k_1 = 992, k_2 = 13260, k_3 = 0, k_4 = 0, k_5 = 0, k_6 = 2944, k_7 = 0, k_8 = 0, k_9 = 528.$$

Доля каждого типа подвижного состава в общем поездопотоке составляет:

доля локомотивов

$$\gamma_{11}^{k_1} = \frac{k_1}{k_1 + k_2 + k_5 + k_6 + k_9} = \frac{992}{992 + 13260 + 2944 + 528} = \frac{992}{17724} = 0,056;$$

доля грузовых вагонов

$$\gamma_{12}^{k_2} = \frac{13260}{17724} = 0,747;$$

доля пассажирских вагонов

$$\gamma_{16}^{k_6} = \frac{2944}{17724} = 0,167;$$

доля моторвагонного подвижного состава

$$\gamma_{19}^{k_9} = \frac{528}{17724} = 0,03.$$

Для построения функции распределения плотности вероятности вертикальных сил на данном участке пути определим функции плотности распределения для каждого типа подвижного состава для летних и зимних условий эксплуатации:

$$f(P_i^\Sigma) = \gamma^{K_1} \cdot f(P_{F_i}^{K_1}) + \gamma^{K_2} \cdot f(P_{F_i}^{K_2}) + \gamma^{K_6} \cdot f(P_{F_i}^{K_6}) + \gamma^{K_9} \cdot f(P_{F_i}^{K_9}) \quad (5.7)$$

Для построения функции распределения вертикальных сил на данном участке определим интегральную функцию плотности распределения с учетом

доли каждого типа подвижного состава для летних и зимних условий, принимая распределения и статистические параметры вертикальных сил для грузовых поездов при скоростях движения $V^{\text{груз}} = 80$ км/ч, для пассажирских $V^{\text{пас.}} = 120$ км/ч.

Для построения интегральной функции необходимо для каждой точки по оси абсцисс взять сечение и просуммировать значения изображенных на рисунке функций с учётом коэффициентов k , отображающих долю подвижного состава в общем поездопотоке на этом участке.

Пример суммирования для вертикальной силы $F_i = 100$ кН показан на рисунке 5.8.

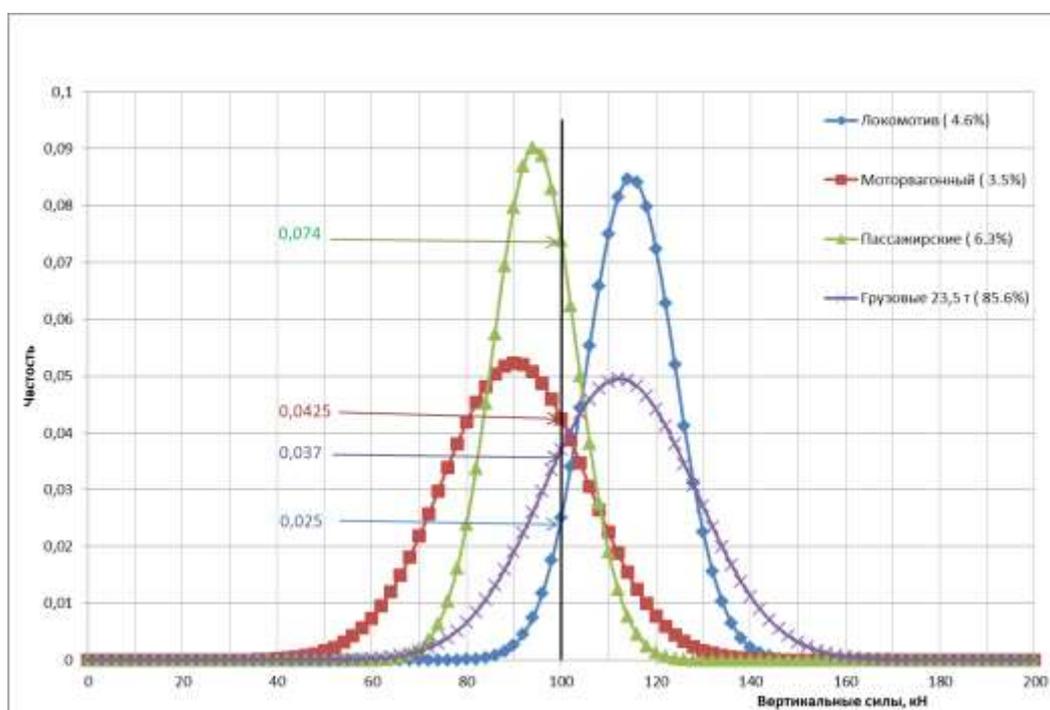


Рисунок 5.8 – Исходные данные для расчёта интегральной частоты для вертикальной силы $F_i = 100$ кН для летних условий

Через точку $F_i = 100$ кН проведем вертикальную линию и в точках пересечения с графиками распределений вертикальных сил для разного подвижного состава определим частоты появления силы $F_i = 100$ кН с учетом доли воздействия на путь разного подвижного состава. Получив исходные данные по каждому типу подвижного состава определим величину интегральной частоты для силы F_i как:

$$P_{ил}^{100} = 0,056 \cdot 0,025 + 0,747 \cdot 0,037 + 0,03 \cdot 0,0425 + 0,167 \cdot 0,074 = 0,042.$$

Аналогичные операции выполняются для каждой вертикальной силы F_i с выбранным шагом. Для автоматизации данного процесса разработана специальная программа. В итоге проведения расчета получится набор интегральных частот для последовательных вертикальных сил, которые используются для построения интегрального закона распределения для зимнего периода (см. рис. 5.9).

По аналогичному алгоритму определяем интегральный закон распределения плотности вероятности вертикальных сил для зимнего периода.

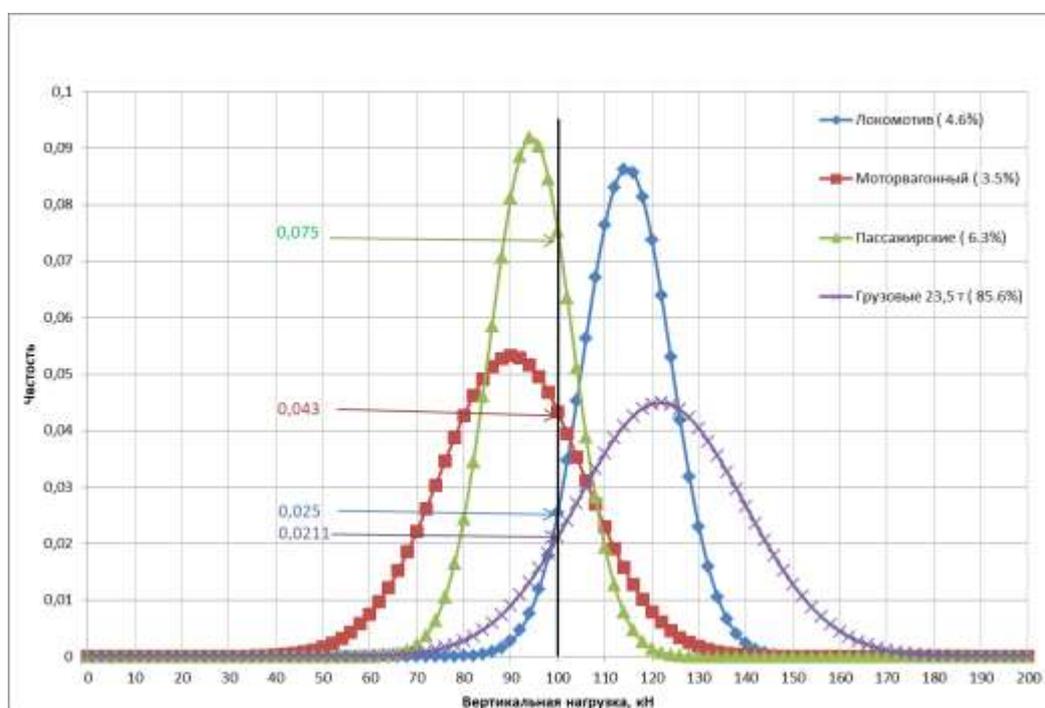


Рисунок 5.9 – Исходные данные для расчёта интегральной частоты для вертикальной силы $F_i = 100$ для зимних условий эксплуатации

Используя исходные данные по каждому типу подвижного состава для зимнего периода эксплуатации определим величину интегральной частоты для силы $F_i = 100$ кН как:

$$P_{ил}^{100} = 0,056 \cdot 0,0255 + 0,747 \cdot 0,0211 + 0,03 \cdot 0,0433 + 0,167 \cdot 0,0752 = 0,031$$

В итоге получится набор значений для построения интегральной функции

для летнего и зимнего периода.

Для полученных наборов значений необходимо выполнить суммирование в соответствии с коэффициентом времени года:

- для летнего периода – 0,6;
- для зимнего – 0,4

Тогда для участка пути интегральные распределения вертикальных сил F_i при эксплуатации рельсов в летний и зимний период определяются как :

$$P_{j_{л+з}}^{\Sigma}(F_i) = \alpha P_{j_{л}}^{\Sigma}(F_i) + \beta P_{j_{з}}^{\Sigma}(F_i) , \quad (5.8)$$

где

$P_{j_{л}}^{\Sigma}(F_i)$, $P_{j_{з}}^{\Sigma}(F_i)$, $P_{j_{л+з}}^{\Sigma}(F_i)$ $P_{i_{л+з}}^{k_j}$ – интегральные частоты от всех k_j – типов подвижного состава, проходящего по рассматриваемому участку в течение суток для летних, зимних климатических условий и суммарная с учетом доли эксплуатации рельсов в летних и зимних условиях.

Суммарная частота для летних и зимних условий для $F_i = 100$ кН определяется как:

$$P_j^{\Sigma}(F_i^{100}) = 0,6 \cdot P_{i_{л}}^{100} + 0,4 \cdot P_{i_{з}}^{100} = 0,6 \cdot 0,042 + 0,4 \cdot 0,031 = 0,0376.$$

В результате расчётов получен интегральный закон распределения вертикальных сил на перегоне, который показан на рисунке 5.10.

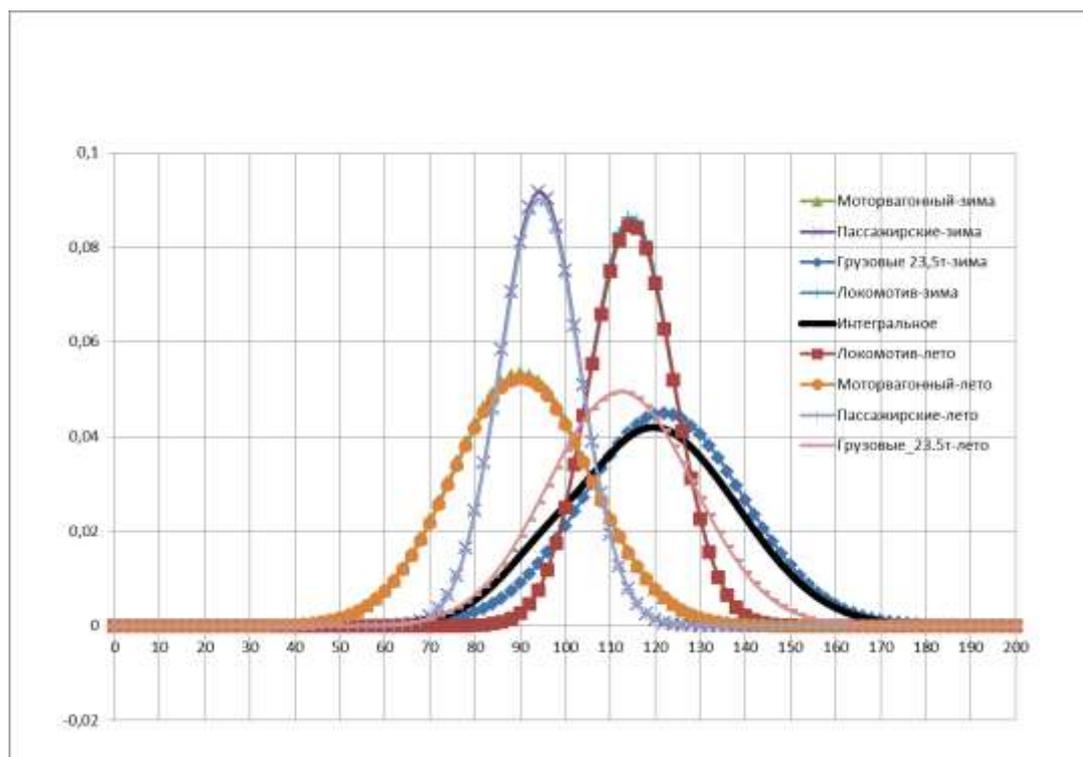


Рисунок 5.10 –Интегральное распределение вертикальных сил, действующих на рельсы от суточного пакета поездов с учётом летнего и зимнего периодов эксплуатации

Для случаев, когда рельсы находятся на участках с выплесками уровни вертикальных сил возрастают, что сказывается на прочности рельсов, в том числе на их контактно-усталостную повреждаемость. В этом случае наблюдается смещение средних значений распределений вертикальных сил в сторону увеличения в соответствии с разд.5.6 главы 5. Для учета состояния пути на выплесках требуется выполнять корректировку плотностей вертикальных сил путем умножения текущих значений вертикальных сил на коэффициенты: для влажных выплесков – $K_{\text{вып.}}^{\text{вл}}=1,28$; для сухих выплесков – $K_{\text{вып.}}^{\text{сух}}=1,37$.

При этом данные коэффициенты учитываются только в летний период, принимая действия коэффициента, $K_{\text{вып.}}^{\text{сух}} = 3$ мес. (три летних месяца), $K_{\text{вып.}}^{\text{вл}}=5$ мес. (осень, весна). В разделе 5.5 настоящей главы установлено, что выплески приводят к увеличению значений вертикальных сил и смещению плотности распределения вертикальных сил в стороны увеличения средних значений.

Выражения для текущих значений вертикальных сил примут вид:

$$F_i^{B.C.} = K_{\text{вып}}^{\text{сух}} \cdot F_i, \quad (5.9)$$

где

$F_i^{B.C.}$ – текущее значение вертикальной силы на сухом выплеске:

$$F_i^{B.B.} = K_{\text{вып}}^{\text{вл}} \cdot F_i, \quad (5.10)$$

где

$F_i^{B.B.}$ - текущее значение вертикальной силы на влажном выплеске .

Выражение для плотности распределения вертикальных сил на выплеске запишется:

на сухом

$$f(P_{F_i}^{B.C.}) = \frac{1}{\sigma_{F_i}^{B.C.} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(F_i^{B.C.} - mF_i^{B.C.})^2}{2}} \quad (5.11)$$

на влажном

$$f(P_{F_i}^{B.B.}) = \frac{1}{\sigma_{F_i}^{B.B.} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(F_i^{B.B.} - mF_i^{B.B.})^2}{2}} \quad (5.12)$$

Интегральные плотности распределения вертикальных сил на выплесках с учетом воздействия k_j – типа подвижного состава примут вид:

на сухом

$$f(P^{\Sigma k_j}(F_i^{B.C.})) = \gamma_{k_1} f(P_{F_i}^{k_1}) + \gamma_{k_2} f(P_{F_i}^{k_2}) + \dots + \gamma_{k_j} f(P_{F_i}^{k_j}) \quad (5.13)$$

на влажном

$$f(P^{\Sigma k_j}(F_i^{B.B.})) = \gamma_{k_1} f(P_{F_i}^{k_1}) + \gamma_{k_2} f(P_{F_i}^{k_2}) + \dots + \gamma_{k_j} f(P_{F_i}^{k_j}) \quad (5.14)$$

Принимая, что выплески в летне – осенний период могут быть в двух состояниях: влажный и сухой. Разбьем работу рельсов, расположенного на выплесках, на три периода: весенне – осенний (влажный), летний(сухой) и зимний (при зимнем периоде различий в уровнях вертикальных сил на выплесках и эталонном пути не установлено).

Выражение для интегральной плотности распределения вертикальных сил для условий эксплуатации рельсов на влажном, сухом выплесках в летний и зимний периоды, запишется:

$$f(P^\Sigma(F_i^\Sigma)) = \alpha_1 f(P^{\Sigma k_j}(F_i^{B.B.})) + \alpha_2 f(P^{\Sigma k_j}(F_i^{B.C.})) + \beta f(P^{\Sigma k_j}(F_i^3)), \quad (5.15)$$

где $\alpha_1 = \frac{t_{\text{ВЛ}}^{\text{ВЛ}}}{T_{\text{Л}}}$; $\alpha_2 = \frac{t_{\text{ВЛ}}^{\text{СУХ}}}{T_{\text{Л}}}$; $\beta = \frac{T_3}{T_{\text{ГОД}}}$ - коэффициенты, учитывающие время

работы рельсов на влажном и сухом выплесках в зимний период;

- $t_{\text{ВЛ}}^{\text{ВЛ}}$, $t_{\text{ВЛ}}^{\text{СУХ}}$, T_3 , $T_{\text{Л}}$ - время работы рельсов на «влажном» и «сухом» выплесках в «зимний» и «летний» периоды;

- $F_i^{B.B.}$, $F_i^{B.C.}$, F_i , F_i^3 - текущее значение вертикальных сил на влажном, сухом выплесках и пути без выплесков в летний и зимний периоды;

- $P_i^{k_j}(F_i)$; $P_i^{k_j}(F_i^{B.B.})$; $P_i^{k_j}(F_i^{B.C.})$ - частоты вертикальных сил F_i , $F_i^{B.B.}$, $F_i^{B.C.}$ от k_j - типа подвижного состава для случаев, когда рельсы уложены соответственно на пути без выплесков, на участках с влажным и сухим выплесками;

- $f(P_i^{k_j}(F_i))$; $f(P_i^{k_j}(F_i^{B.B.}))$; $f(P_i^{k_j}(F_i^{B.C.}))$ - плотности распределения вертикальных сил от k_j - типа подвижного состава для случая, когда рельсы уложены на пути без выплесков, на участках с влажным и сухим выплесками.

Таким образом, разработана методика определения интегрального распределения вертикальных сил от суммарного воздействия разных типов подвижного состава с учетом доли каждого из них, скоростей движения, климатических условий (зима, лето), состояния пути в виде наличия выплесков (влажных, сухих). Разработанная методика позволяет определять суммарное воздействие на рельсы и верхнее строение пути от воздействия всех типов типов подвижного состава, курсирующих по рассматриваемому участку.

Выводы по главе 5

На основании анализа результатов экспериментальных исследований силового воздействия разных типов подвижного состава на рельсы установлено:

1 Распределения вертикальных сил от взаимодействия колес подвижного состава и пути в составе поездов, сформированных из вагонов с близкими осевыми нагрузками, представляют стационарные, эргодичные процессы с незначительными величинами асимметрии (не более 3–3,5 % от средних значений).

2 Спектральный анализ процессов взаимодействия колес с рельсами позволил установить, что спектральные плотности мощности сигнала в зоне контакта колес с рельсами представляет собой случайный процесс с распределением энергии по гармоническим составляющим в диапазоне частот до 30 Гц при скорости до 40 км/ч и смещении энергетических спектров в область более высоких частот до 60 Гц с изменением рабочей скорости до 75–80 км/ч.

3 Экспериментально установлены статистические параметры распределений вертикальных сил от поездов, сформированных из грузовых вагонов на тележках 181–00 с нагрузками 230 кН/ось, из полувагонов 12-9853 на тележках 189–555 производства АО «ТВСЗ», из полувагонов 12-196-1 на тележках модели 18-194-1 производства АО «НПК «Уралвагонзавод», из полувагонов модели 12–2142 на тележках модели 18–194–1 АО «Алтайвагон» с нагрузками 245 кН/ось, а также от поездов, сформированных из полувагонов модели 12-9548–01 на тележках 18–6863 с нагрузками 265 кН/ось производства АО «ТВСЗ».

4 Ансамбли вертикальных сил от воздействия поездов, сформированных из однородных вагонов, хорошо аппроксимируются нормальным законом по критерию согласования Колмогорова – Смирнова. В условиях реальной эксплуатации распределения вертикальных сил от разных поездов имеют различия, определяемые доминированием групп вагонов с разными осевыми нагрузками. Диапазон

изменения осевых нагрузок от вагонов в составе поезда определяет дисперсию вертикальных сил. Наиболее часто встречающимися являются двухмодальные распределения.

5 Уровни нагруженности рельсов определяются не только величинами осевых нагрузок, но и состоянием пути. Выплески во влажном состоянии определяют увеличение средних значений вертикальных сил: от груженых вагонов в 1,28 раза, для порожних в 1,4 раза. На сухих выплесках жесткость пути повышалась, что приводило к повышению средних значений вертикальных сил в 1,37 раза с одновременным увеличением дисперсии процесса.

6 Для более точного учета силового воздействия на рельсы со стороны разных типов подвижного состава, в том числе грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками, разработана методика определения интегрального распределения вертикальных сил, позволяющая учитывать воздействие от разного типа подвижного состава с учетом конструкции ходовых частей и величин осевых нагрузок, скорости движения, жесткости подрельсового основания от сезонности (лето, зима), поперечного профиля пути, состояния пути (наличия выплесков), доли каждого типа подвижного состава в суммарном воздействии на путь.

ГЛАВА 6

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ РЕЛЬСОВ

6.1 Теоретические основы прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости рельсов

Для определения срока службы рельсов по пропущенному тоннажу до образования контактно-усталостной трещин на поверхности катания принимается скорректированная гипотеза линейного суммирования повреждений в соответствии с [59]. Выражение для накопления контактно-усталостных повреждений на поверхности катания рельсов от воздействия одного блока нагружения может быть записано:

$$W_{\Sigma} = \int_{F_{i \min}}^{F_{i \max}} P_i^{\Sigma}(F_i) W_i(F_i) dF_i \quad (6.1)$$

где $W_i(F_i)$ – относительная повреждаемость поверхности рельса от вертикальных сил F_i , рассчитанная с учетом многоосного нагружения по модели Брауна – Миллера [68,219]. с использованием программного комплекса MSC.Fatigue [209].

Согласно 4.17 (глава 4) $W(F_i)$ представляет полиномиальную зависимость

$$W(F_i) = aF_i^3 - bF_i^2 + cF_i \quad (6.2)$$

где $a=9,15 \cdot 10^{-7}$, $b=7,65 \cdot 10^{-5}$, $c=0,00289$ - коэффициенты для новых рельсов (см. главу 4) без деградации поверхностного слоя.

$P_j^{\Sigma}(F_i)$ интегральная частота вертикальной силы от k_j -типов подвижного состава

$$P_j^{\Sigma}(F_i) = \sum_{j=1}^k \gamma_k P_i^{k_j}(F_i) \quad (6.3)$$

где

γ_k – доля k_j – типа подвижного состава в суточном пакете поездов;

F_i – текущее значение вертикальной силы;

$P_j^{k_j}(F_i)$ – частота вертикальной силы F_i от воздействия k_j - типа подвижного состава, участвующих в суточном пакете поездов.

Зная интегральное распределение вертикальных сил, относительную повреждаемость поверхности рельса $W_i(F_i)$ от вертикальных сил F_i определим суммарную относительную повреждаемость W_Σ , характеризующую повреждаемость рельса от одного блока нагружения. При определении интегральной повреждаемости W_Σ относительная повреждаемость $W_i(F_i)$ перемножается на интегральную частоту $P_j^\Sigma(F_i)$ для каждой вертикальной силы F_i и суммируются по всем силам в блоке нагружения в соответствии с выражением (6.1). Количество блоков нагружения до образования трещин на поверхности катания согласно [61] определится как величина обратная интегральной повреждаемости от воздействия одного блока вертикальных нагрузок.

Учитывая, что в процессе движения подвижного состава колесные пары совершают извилистое движение, а повреждения от прокатки колеса происходят на ширину, соизмеримую с шириной пятна контакта. Для расчета контактно-усталостных повреждений введен коэффициент $K_{изв}$, который учитывает вероятность распределения точек контакта колеса с рельсом по поперечному сечению и позволяет уточнить расчет повреждаемости поверхности катания рельсов от извилистого движения колесных пар. Тогда отношение суммарного количества блоков нагружения T_Σ с учетом коэффициента $K_{изв}$ определит количество блоков нагружения $T_{кут}$, которое необходимо пропустить, чтобы на условной продольной полосе поверхности катания образовались контактно-усталостные трещины. На основании исследований проведенных в главе 4 установлено, что точка контакта колеса с рельсом расположена на расстоянии 20-25 мм от внутренней боковой поверхности рельса с наибольшей вероятностью 26,2%. Следовательно, в указанных зонах следует ожидать наибольшей вероятности

сти контактно-усталостных повреждений рельсов, что хорошо согласуется с данными эксплуатации [225].

Для определения контактно-усталостной повреждаемости рельсов до образования трещин на поверхности катания в миллионах тонн брутто пропущенного тоннажа введено понятие эквивалентная нагрузка. Эквивалентная нагрузка $F_i^{\text{ЭКВ}}$ – поездная нагрузка, которая по повреждающему действию эквивалентна одному блоку нагружения.

Учитывая, что процесс изменения вертикальных сил непрерывный, выражение для величины эквивалентной нагрузки $F_i^{\text{ЭКВ}}$ примет вид:

$$F_i^{\text{ЭКВ}} = \int_{F_i^{\text{min}}}^{F_i^{\text{max}}} P_j^{\Sigma}(F_i) \cdot (F_i) d F_i \quad (6.4)$$

Учитывая, что в формуле (6.1) относительная повреждаемость представляет величину умноженную 10^{-7} , данная величина переведена из знаменателя в числитель как 10^7 . Кроме того, выражения (6.1) (6.4) позволяют определить интегральную повреждаемость и величину эквивалентной нагрузки для прогнозирования пропущенного тоннажа до образования контактно-усталостной трещины на поверхности катания рельса для одной рельсовой нити. Суммарный пропущенный тоннаж по пути будет в два раза больше. Тогда с учетом [59], выражений (6.1) (6.4) суммарная пропущенная поездная нагрузка $T_{\text{кут}}^{\Sigma}$ в млн т брутто до образование трещины на поверхности катания определится как:

$$T_{\text{кут}}^{\Sigma} = \frac{2 \cdot 10^7 \cdot F_i^{\text{ЭКВ}}}{W_{\Sigma} K_{\text{изв.}}}, \quad (6.5)$$

где

$T_{\text{кут}}^{\Sigma}$ - величина пропущенного тоннажа по двум рельсовым нитям пути, без учета деградации механических свойств рельсовой стали, до образования трещин на поверхности катания;*

$F_i^{\text{ЭКВ}}$ –вертикальная нагрузка от колеса на рельс, эквивалентная по повреждающему действию одному блоку нагружения;

W_{Σ} – суммарная относительная повреждаемость от прокатки эквивалентной

нагрузки $F_i^{\text{ЭКВ}}$;

$K_{\text{изв.}}$ – коэффициент, учитывающий повреждаемость поверхности рельса с учетом извилистого движения колесной пары.

*- в данном случае образование трещин на поверхности подразумевает образование трещин в поверхностном слое, как на самой поверхности, так и на некоторой глубине до 5 мм от поверхности.

6.2 Прогнозирование контактно-усталостной повреждаемости рельсов с учетом деградацию механических свойств материала рельсов от пропущенного тоннажа

Во многих исследованиях [81, 83–87, 195] отмечено, что контактно-усталостные повреждения возникают в процессе деструкции поверхностного слоя из-за циклического упругопластического деформирования поверхности катания головки рельса от воздействия колес подвижного состава. При этом происходит снижение механических свойств рельсовой стали из-за перенаклепа, что значительно снижает контактно-усталостную прочность поверхностного слоя головки рельсов. Несмотря на значительное количество исследований КУ-прочности зависимостей механических свойств рельсовой стали от пропущенного тоннажа не установлено. В исследованиях [132–135] оценка состояния поверхностного слоя при длительной эксплуатации рельсов носит описательный характер. В работе [195] механические свойства дефектного поверхностного слоя определены для начального и конечного состояний при испытаниях на разрыв плоских образцов толщиной 2 мм, изготовленных из материала объемно-закаленных рельсов максимально близко расположенного к поверхности катания. Установлено, что из-за структурных изменений, вызванных циклической пластической деформацией, ме-

ханические свойства поверхностного слоя металла изменились. Временное сопротивление снизилось в 1,24 раза, относительное удлинение в 4,1 раза [195].

Принимая тот факт, что в модели Брауна – Миллера [219] не учитывается деградация механических свойств материала рельсов на поверхности катания, а количественные зависимости от пропущенного тоннажа отсутствуют, был использован метод экспертных оценок [252]. На основании опыта эксплуатации рельсов разных категорий, в разных условиях эксплуатации и сроков до образования поверхностных трещин, установленных зависимостей относительной повреждаемости от величин колесной нагрузки для новых рельсов без повреждений, предложено изменение интегральной повреждаемости рельсов представить в виде экспоненциальной зависимости.

$$W_{\Sigma}^t = W_{\Sigma}^1 a e^{-bt}, \quad (6.6)$$

где

W_{Σ}^t - интегральная повреждаемость поверхности катания рельсов после пропуска t –тоннажа;

a, b – эмпирические коэффициенты;

t – текущее значение пропущенного тоннажа с начала эксплуатации рельсов;

W_{Σ}^1 – интегральная повреждаемость поверхности катания рельсов для нового рельса (см. главу 4).

Рассмотрим решения задачи определения срока службы рельсов до образования трещин с учетом деградации механических свойств рельсов от пропущенного тоннажа. На первом этапе для случая детерминированного изменения механических свойств срок службы рельсов до образования трещин на поверхности катания разобьем на условные интервалы, каждый из которых характеризуется определенным пропущенным тоннажом и постоянными механическими свойствами рельсовой стали. Тогда для каждого интервала характерны функциональные зависимости относительной повреждаемости от величин колесных нагрузок и интегральная повреждаемость от эквивалентной нагрузки. Условно срок служ-

бы рельсов до образования трещин на поверхности катания был разбит на интервалы по пропущенному тоннажу на которых считалось, что механические свойства постоянны.

По данным раздела 6.1 выражение интегральной повреждаемости с учетом деградации механических свойств для конкретного интервала по пропущенному тоннажу в детерминированном виде может быть записано:

$$W_{\Sigma}^t = \int_{F_{i\min}}^{F_{i\max}} P_i^{\Sigma}(F_i) W_i^t(F_i) dF_i, \quad (6.7)$$

где

$W_i^t(F_i)$ – относительная повреждаемость поверхности катания от вертикальной силы F_i для t -го интервала пропущенного тоннажа;

$P_j^{\Sigma}(F_i)$ – суммарная частота вертикальной силы от k_j -типов подвижного состава (грузовых, пассажирских вагонов, локомотивов и т.д.).

Интегральная повреждаемость, с учетом деградации механических свойств поверхностного слоя рельсов, в детерминированном виде для условных t - интервалов по пропущенному тоннажу может быть определена:

$$W_{\Sigma}^T = \gamma_{t_1} W_{\Sigma}^{t_1} + \gamma_{t_2} W_{\Sigma}^{t_2} + \dots + \gamma_{t_d} W_{\Sigma}^{t_d}, \quad (6.8)$$

где $\gamma_{t_1}, \gamma_{t_2}, \gamma_{t_d}$ – доля интервалов с характерными механическими свойствами.

Для рассматриваемого случая примем $\gamma_{t_1} = \gamma_{t_2} = \dots = \gamma_{t_d} = const$

$$\gamma_{t_d} = \frac{t_d}{T} \quad (6.9)$$

Тогда выражение (6.5) с учетом (6.4), (6.8) для определения пропущенного тоннажа по пути до образования трещин на поверхности катания рельсов с учетом деградации механических свойств запишется в виде:

$$T_{\text{кут}}^{\Sigma} = \frac{2 \cdot 10^7 \cdot F_{\text{ЭКВ}}}{W_{\Sigma}^T \cdot K_{\text{изв}}} \quad (6.10)$$

Таблица 6.1 – Зависимости относительной повреждаемости и величины интегральной повреждаемости объемно-закаленных рельсов для условных интервалов по пропущенному тоннажу и условий нагруженности рельсов характерных для Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ»

№	Ин-тервал, млн т брутто	Зависимость относительной повреждаемости от величины колесной нагрузки, $W(F_i) = f(F_i)$	Интегральная повреждаемость $W_{\Sigma Л}^t$ Лето	Интегральная повреждаемость, $W_{\Sigma З}^t$ Зима
1	0-30	$W(F_i) = 0,0000010686 F_i^3 - 0,0001185704 F_i^2 + 0,0054596564 F_i$	0,69	0,92
2	30-60	$W(F_i) = 0,0000013601 F_i^3 - 0,0001509078 F_i^2 + 0,0069486536 F_i$	0,88	1,18
3	60-90	$W(F_i) = 0,0000015544 F_i^3 - 0,0001724660 F_i^2 + 0,0079413184 F_i$	1,01	1,34
4	90-120	$W(F_i) = 0,0000018458 F_i^3 - 0,0002048034 F_i^2 + 0,0094303156 F_i$	1,19	1,59
5	120-150	$W(F_i) = 0,0000027202 F_i^3 - 0,0003018155 F_i^2 + 0,0138973073 F_i$	1,77	2,35
6	150-180	$W(F_i) = 0,0000033031 F_i^3 - 0,0003664903 F_i^2 + 0,0168753017 F_i$	2,14	2,85
7	180-210	$W(F_i) = 0,0000050518 F_i^3 - 0,0005605145 F_i^2 + 0,0258092849 F_i$	3,28	4,36
8	210-240	$W(F_i) = 0,0000076748 F_i^3 - 0,0008515509 F_i^2 + 0,0392102598 F_i$	4,98	6,63
9	240-270	$W(F_i) = 0,0000094235 F_i^3 - 0,0010455752 F_i^2 + 0,0481442430 F_i$	6,12	7,05
10	270-300	$W(F_i) = 0,0000117551 F_i^3 - 0,0013042742 F_i^2 + 0,0600562207 F_i$	7,63	10,16

С использованием значений интегральной повреждаемости, полученной для новых рельсов, согласно данных главы 4, выражения изменения интегральной повреждаемости рельсов в виде экспоненциальной зависимости (6.6) расчетным путем были определены зависимости относительной повреждаемости поверхностного слоя металла от величин колесной нагрузки для каждого из условных интервалов по пропущенному тоннажу, а также определены значения интегральной повреждаемости для летних и зимних условий Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ». Результаты расчета представлены в табл.6.1.

На рис.6.1 представлены зависимости изменения интегральной повреждаемости от пропущенного тоннажа с учетом деградации механических свойств по-

верхностного слоя для летних и зимних условий эксплуатации объемно-закаленных рельсов на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ».

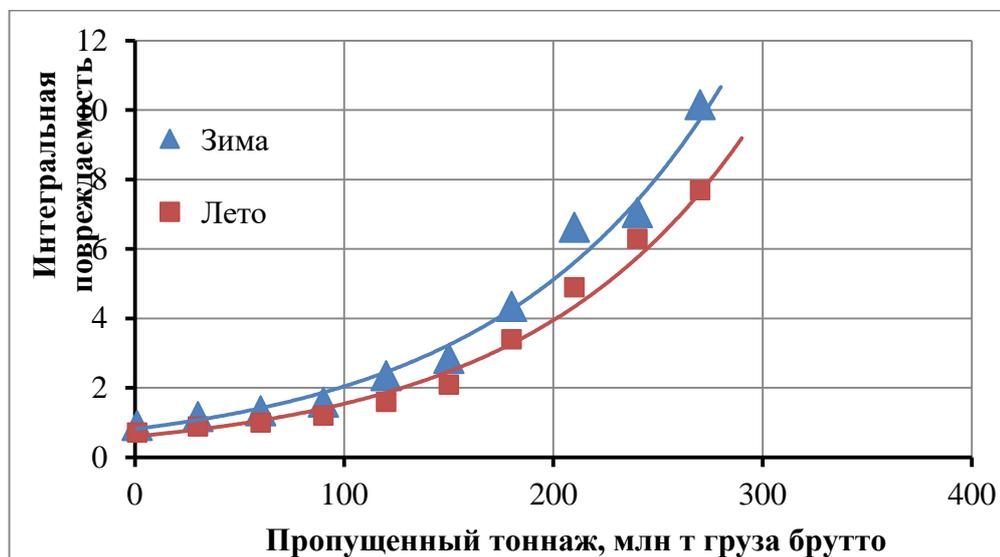


Рисунок 6.1 – Экспоненциальные зависимости интегральной повреждаемости поверхности катания рельсов с учетом деградации механических свойств от пропущенного тоннажа для летних и зимних условий эксплуатации на Экспериментальном кольце ВНИИЖТ

С учетом выражения 6.10 рассчитаем величину пропущенного тоннажа до образования поверхностных трещин для объемно-закаленных рельсов Т1.

Для прямого участка Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ» рассчитаны величины эквивалентной нагрузки и суммарной относительной повреждаемости для летних и зимних условий эксплуатации (см. Приложение 8):

$$- \text{лето } F_i^{\text{ЭКВ}} = 112,6 \text{ кН}; W_{\Sigma} = 0,72 \cdot 10^{-7};$$

$$- \text{зима } F_i^{\text{ЭКВ}} = 117,2 \text{ кН}; W_{\Sigma} = 0,84 \cdot 10^{-7}.$$

С учетом выражений (6.8), (6.9) определены интегральные средние значения повреждаемости для объемно-закаленных рельсов с учетом деградации механических свойств поверхностного слоя рельсов от пропущенного тоннажа.

Приняв $t_d = 30$ млн т брутто, предельный срок до образования поверхностных трещин $T=300$ млн т брутто , $Y_{t1} = Y_{t2} = \dots = Y_{td} = 0,1$

Интегральная повреждаемость для летних условий

$$W_{\Sigma л}^t = 0,1(0,69 + 0,88 + 1,01 + 1,19 + 1,77 + 2,14 + 3,28 + 4,98 + 6,12 + 7,63) \\ = 2,969$$

Интегральная повреждаемость для зимних условий

$$W_{\Sigma з}^t = 0,1(0,92 + 1,18 + 1,34 + 1,59 + 2,35 + 2,85 + 4,36 + 6,63 + 7,65 + 10,16) \\ = 3,9$$

Принимая, что путь на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ» Московской ДИ эксплуатируется 8 месяцев в летних условиях и 4 месяца в зимних, для летних условий $\alpha = 8/12 = 0,67$, для эксплуатации в зимних условиях $\beta = 4/12 = 0,33$.

В соответствии с выражением (6.10) получим следующие числовые значения пропущенного тоннажа по пути до образования контактно-усталостных трещин на поверхности катания рельсов:

$$- \text{лето } T_{\text{кут}}^л = 2/[(2,969 \cdot 0,264) \cdot 10^{-7}] \cdot 11,3 = 289 \text{ млн т брутто};$$

$$- \text{зима } T_{\text{кут}}^з = 2/[(3,9 \cdot 0,264) \cdot 10^{-7}] \cdot 11,7 = 227 \text{ млн т брутто}.$$

С учетом летних и зимних условий эксплуатации получены следующие числовые значения пропущенного тоннажа до образования контактно-усталостных трещин на поверхности катания объемно-закаленных рельсов:

$$T_{\text{кут}}^{\Sigma} = 0,67 \cdot 289 + 0,33 \cdot 227 = 194 + 75 = 269 \text{ млн т брутто}$$

В исследованиях [195] установлено, что глубина выкрашиваний при пропущенном тоннаже 250-300 млн т брутто изменялась от 0,5 до 1 мм. С увеличением пропущенного тоннажа до 450-500 млн т брутто глубина выкрашиваний увеличилась до 1,3 – 4 мм. Таким образом, учитывая стадии развития трещин в поверхностном слое для объемно – закаленных рельсов принимаем окончание первой стадии – формирование на поверхности катания микротрещин - величину пропущенного тоннажа 250–300 млн т брутто. Данный пропущенный тоннаж

принят за базовый для объемно- закаленных рельсов Т1.

Сравнивая результаты полученных расчетных данных и экспериментальных исследований по образованию контактно–усталостных дефектов в объемно- закаленных рельсах на поверхности катания - 250-300 млн брутто можно сделать вывод, что с учетом деградации механических свойств на поверхности катания получена достаточная для практики сходимость расчетных и экспериментальных данных до 10%.

После образования трещин на поверхности катания происходит их развитие и рост, который сопровождается выкрашиванием на поверхности катания либо образованием поперечных трещин по коду 21 в соответствии с [195]. Трещины и отслоения развиваются под действием поездной нагрузки в соответствии с законами линейной механики разрушения [201], достигая критических размеров. В этом случае рельсы переходят в разряд остродефектных и подлежат первоочередной замене [197].

Для установления сроков развития трещин с момента образования до достижения критических размеров проведен сравнительный анализ выхода рельсов по контактно-усталостным дефектам кода 21. Для этого воспользуемся данными работы [253], в которой представлены первичные результаты ОДР с дефектами по коду 21 (в %) к пропущенному тоннажу для полигонов Московской ДИ за 2010–2015 гг. и результаты статистической обработки для объемно- закаленных рельсов Т1. За период с января 2010 г. по май 2015 г. максимальный пропущенный тоннаж в условиях Московской ж. д. по рельсам, на которых был обнаружен ОДР с дефектом 21 изменялся от 1037 до 1196 млн т брутто, минимальный тоннаж – от 32,2 до 231 млн т брутто. Среднее значение пропущенного тоннажа составило $606,4 \pm 173,4$ млн т брутто [253]. В диапазоне изменения пропущенного тоннажа от 500 до 800 млн т брутто происходило 78,8 % выявлений ОДР с дефектом по коду 21.1 [253].

Таким образом, для случая образования остродефектного рельса (ОДР) в виде поперечной трещины по коду 21.1 средние фантические значения по пропу-

ценному тоннажу составляли $606,4 \pm 173,4$ млн т брутто. Это практически в два раза выше пропущенного тоннажа при котором возникали начальные микротрещины. То есть после образования на поверхности катания микротрещин происходило развитие их от поверхности катания под углом вглубь головки рельса; поворот и дальнейшее развитие в плоскости параллельной поверхности катания; поворот и дальнейшее развитие вниз поперечной усталостной трещины [195] до критического размера по коду 21.1 в соответствии с [197] за пропущенный тоннаж 250–500 млн.т брутто. Для определения долговечности рельсов по критерию достижения предельного состояния необходимо разработать методику роста трещин под поездной нагрузкой, базирующуюся на линейной механике разрушения [201].

6.3 Контактно –усталостная прочность дифференцированно –термоупрочненных рельсов

В настоящее время на российских железных дорогах применяются дифференцированно-термоупрочненные с тепла прокатного нагрева рельсы [10]: общего назначения ДТ350, производства ЕВРАЗ ЗСМК, ПАО ЧМК, АРБЗ (Казахстан, Актюбинский рельсобалочный завод), рельсы специального назначения ДТ370ИК, ДТ350НН, ДТ400ИК, производства ЕВРАЗ ЗСМК, рельсы для скоростных магистралей ДТ350СС, производства ПАО ЧМК. Основой рельсовых сталей является пластинчатый перлит – эвтектоидная смесь феррита и цементита, в которой обе фазы имеют форму пластинок [254]. В исследованиях [255] контактно- усталостная прочность рельсов определяется многими факторами, в том числе механическими свойствами рельсовых сталей, определяемыми не только химическим составом, но и микроструктурой, величиной зерна, формой и количеством избыточной и карбидной фаз, межпластинчатым расстоянием, характером распреде-

ления феррита и цементита в перлите, свойствами металлической матрицы, степенью легирования феррита и цементита.

В работе [258] проведено сравнение объемно-закалённых и дифференцированно термоупрочненных рельсов. Установлено, что дифференцированно-термоупрочненные рельсы отличаются более низкими значениями ударной вязкости и несколько более высокими значениями твердости на поверхности катания и по сечению головки, а также более низкими значениями твердости в шейке и подошве относительно аналогичных величин объемно–закаленных рельсов.

Исследования рельсовой стали после объемной закалки показывают [257, 259–262], что пластинчатый перлит рельсовой стали характеризуется наличием различного рода несовершенств: наблюдаются ферритные мостики (участки феррита, разделяющие пластину цементита), пластины цементита искривлены и не параллельны друг другу, имеют различного типа сростки [258]. В работе [258] показано, что средняя величина межпластинчатого расстояния структуры перлита рельсовых сталей после объемной закалки изменяется в пределах от 80 нм до 132 нм и незначительно увеличивается при переходе от слоя, расположенного на глубине 2 мм к слою, расположенному на глубине 10 мм (см. табл.6.2).

Таблица 6.2 – Средняя величина межпластинчатого расстояния зерен перлита рельсовой стали [258]

Режим обработки	Категория рельсов	Расстояние от поверхности, мм	h, нм (по центральной оси)	h, нм (по выкружке)
Объемно-закаленные рельсы	В	2	8	80
		10	1	100
	ИК	2	1	87
		10	9	90
	НЭ	2	9	80
		10	1	110

Рельсы из сталей перлитного класса после дифференцированной закалки с прокатного нагрева имеют структуру сорбитообразного пластинчатого перлита

или сорбита. После дифференцированной закалки средняя величина межпластинчатого расстояния изменяется в пределах от 105 нм до 200 нм и уменьшается при удалении от поверхности катания, как по центральной оси, так и по выкружке рельсовой стали [258]. В работе [255] дисперсность микроструктуры, оцениваемая по величине межпластинчатого расстояния, составила: 200 нм для рельсов ДТ350 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», 152 нм для рельсов ДТ350 ПАО «ЧМК», 250 нм для рельсов производства США и 140 нм для рельсов производства Японии. Согласно соотношению Холла-Петча [254, 262] твердость и прочность сталей перлитной структуры определяется как функция межпластинчатого расстояния. Чем меньше величина межпластинчатого расстояния, тем более высокие характеристики сопротивления контактной усталости у рельсов. Следовательно, у дифференцированно упрочненных рельсов, имеющих несколько большие межпластинчатые расстояния, чем у объемно – закаленных рельсов можно ожидать более низких значений контактно-усталостной прочности.

Однако, проведенные АО ВНИИЖТ сравнительные стендовые испытания образцов рельсовых сталей ОТ350, ДТ350, ДТ370 ИК на четырехточечной машине [265], показали более высокие в 1,1–1,5 раза показатели контактно-усталостной выносливости рельсов ДТ350 по отношению к рельсам ОТ350. Объяснить данный факт можно наличием в перлитной рельсовой стали после объемной закалки различного рода несовершенств: наблюдаются в виде ферритные мостиков, сростков, деформированных пластин цементита [258]. С другой стороны имеет место неблагоприятное распределение остаточных напряжений после объемной закалки рельсов в масле [264], что также снижает КУ-прочность рельсов.

В процессе наблюдения за рельсами ДТ350 на Большем московском окружном кольце Московской ДИ, производства ПАО «ЧМК», специалистами АО ВНИКТИ на поверхности катания были обнаружены сетки поверхностных микротрещин после пропуска 300-350 млнт брутто [266].

В связи с вышеизложенным для условий прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости дифференцированно- термоупрочненных рельсов приняты величины относительной повреждаемости ниже в 1.3 раза, чем для объемно-закаленных рельсов.

С учетом вышеизложенного определены зависимости относительной повреждаемости поверхностного слоя металла для дифференцированно – термоупрочненных рельсов ДТ350 от величин колесной нагрузки для каждого из условных интервалов по пропущенному тоннажу и рассчитаны величины интегральной повреждаемости для условных интервалов по пропущенному тоннажу для условий эксплуатации рельсов на Экспериментальном кольце АО ВНИИЖТ (Приложение 10). Результаты расчета представлены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Зависимости относительной повреждаемости и величины интегральной повреждаемости для условных интервалов по пропущенному тоннажу для условий эксплуатации рельсов на Экспериментальном кольце АО «ВНИИЖТ»

№	Интервал, млн т брутто	Зависимость относительной повреждаемости от величины колесной нагрузки, $W(F_i) = f(F_i)$	Интегральная повреждаемость $W_{\Sigma,л}^t$ Лето
1	0-30	$W(F_i) = 0,0000008199F_i^3 - 0,0000909758F_i^2 + 0,0041890455F_i$	0,53
2	30-60	$W(F_i) = 0,0000010463F_i^3 - 0,0001160912F_i^2 + 0,0053455000F_i$	0,68
3	60-90	$W(F_i) = 0,0000012089F_i^3 - 0,0001341354F_i^2 + 0,0061763604F_i$	0,78
4	90-120	$W(F_i) = 0,0000014145F_i^3 - 0,0001569441F_i^2 + 0,0072265998F_i$	0,92
5	120-150	$W(F_i) = 0,0000020923F_i^3 - 0,0002321500F_i^2 + 0,0106895109F_i$	1,36
6	150-180	$W(F_i) = 0,0000025356F_i^3 - 0,0002813352F_i^2 + 0,0129542757F_i$	1,65
7	180-210	$W(F_i) = 0,0000038845F_i^3 - 0,0004310033F_i^2 + 0,0198458511F_i$	2,52
8	210-240	$W(F_i) = 0,0000059023F_i^3 - 0,0006548783F_i^2 + 0,0301543326F_i$	3,83
9	240-270	$W(F_i) = 0,0000071755F_i^3 - 0,0007961462F_i^2 + 0,0366591112F_i$	4,70
10	270-300	$W(F_i) = 0,0000090388F_i^3 - 0,0010028898F_i^2 + 0,0461787667F_i$	5,87

С учетом различий контактно-усталостной прочности разных категорий

рельсов зависимостей относительной повреждаемости от величин колесной нагрузки для объемно- закаленных рельсов рекомендуется применять из таблицы 6.1, для дифференцированно термоупрочненных из таблицы 6.3. Для совершенствования методики расчета контактно-усталостной повреждаемости рельсов необходимо продолжить исследования по установлению экспериментальных зависимостей между усталостными характеристиками поверхности катания рельсов и степенью деградации ее механических свойств от пропущенного тоннажа.

6.4 Прогнозирование контактно-усталостной повреждаемости рельсов до образования трещин на поверхности катания на примере Зиловской дистанции пути

Для прогнозирования пропущенного тоннажа до образования контактно-усталостных трещин на поверхности катания рельсов на перегоне Зилово – Зудыра Забайкальской ДИ определим интегральный закон распределения вертикальных сил от суточного пакета поездов. По данным технического отдела Зиловской дистанции пути в 2019г. суточный пакет поездов на II главном пути (класс и специализация пути 10) включает 77 грузовых, 7 пассажирских, 4 пригородных и 2 хозяйственных поезда. Грузонапряженность в 2019 г. – 138,8 млн т брутто. Верхнее строение пути включает рельсы Р65 категории ДТ350 производства АО «ЗСМК», сваренные в плети длиной до 800 м, промежуточные скрепления ЖБР-65Ш, шпалы железобетонные 1 срока службы. Установленная скорость движения по участку 80/80 км/ч. Особенности перегона Зилово – Зудыра: сложные климатические условия с суточными колебаниями температуры до 30 градусов, годовые колебания до 90 градусов. Принимаются следующие допущения:

- суточный пакет поездов, а также уровень его технического состояния одинаковы в течение длительного срока;
- климатические условия распределяются на две составляющие – зима и

лето. Примем, что путь работает в летних условиях 7 месяцев и в зимних условиях 5 месяцев. Последние определяют разницу силового воздействия из-за изменения жесткости пути.

По методике, представленной в разделе 6.1 настоящей главы, выполнены расчеты интегральных законов распределений для условий, когда доля поездов, сформированных из вагонов с нагрузками 245 кН/ось, составляет 9 %, и второй вариант – когда доля этих вагонов увеличена до 64 %, а также для летних и зимних условий эксплуатации. Результаты расчета интегрального распределения вертикальных сил для доли 64 % грузовых вагонов с нагрузками 245 кН/ось в зимних условиях представлены на рисунке 6.2.

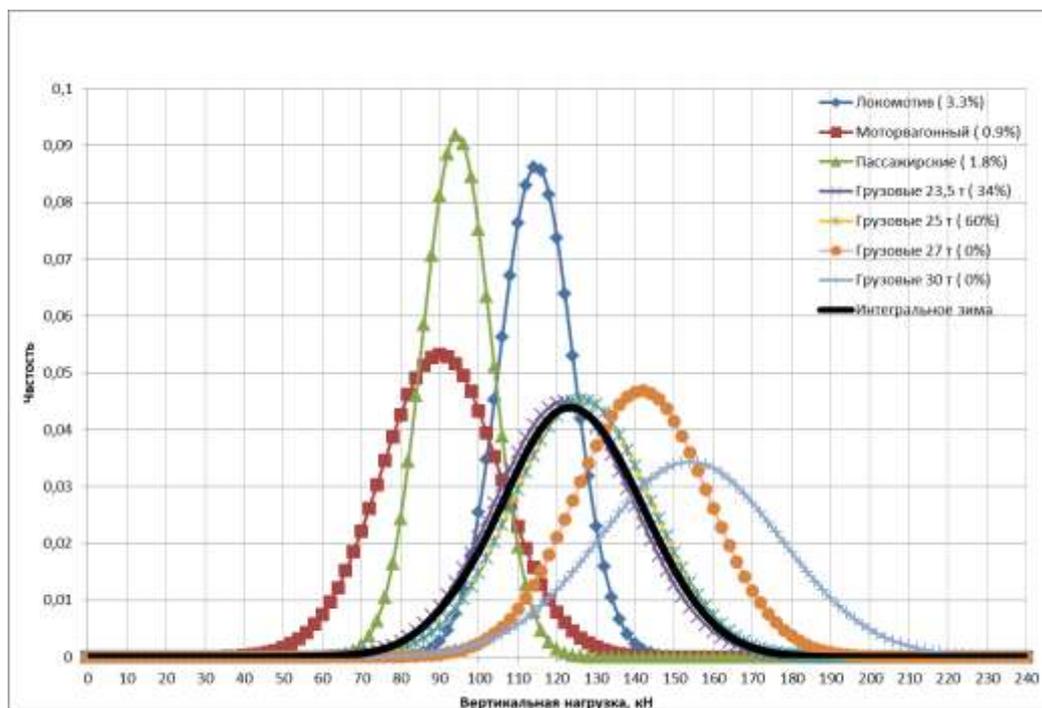


Рисунок 6.2 – Интегральное распределение вертикальных сил от суточного пакета поездов на перегоне Зилово – Зудыра Забайкальской ДИ для доли 64 % грузовых вагонов с нагрузками 245 кН/ось для зимних условий

Подробные результаты расчета интегральных распределений вертикальных сил для рассматриваемых вариантов представлены в Приложении 11.

Результаты расчета интегральных распределений вертикальных сил для Зилловской дистанции пути поездов, сформированных из вагонов с нагрузками 245 кН/ось, для их доли 9 и 64 %, для летних и зимних условий эксплуатации представлены на рисунке 6.3.

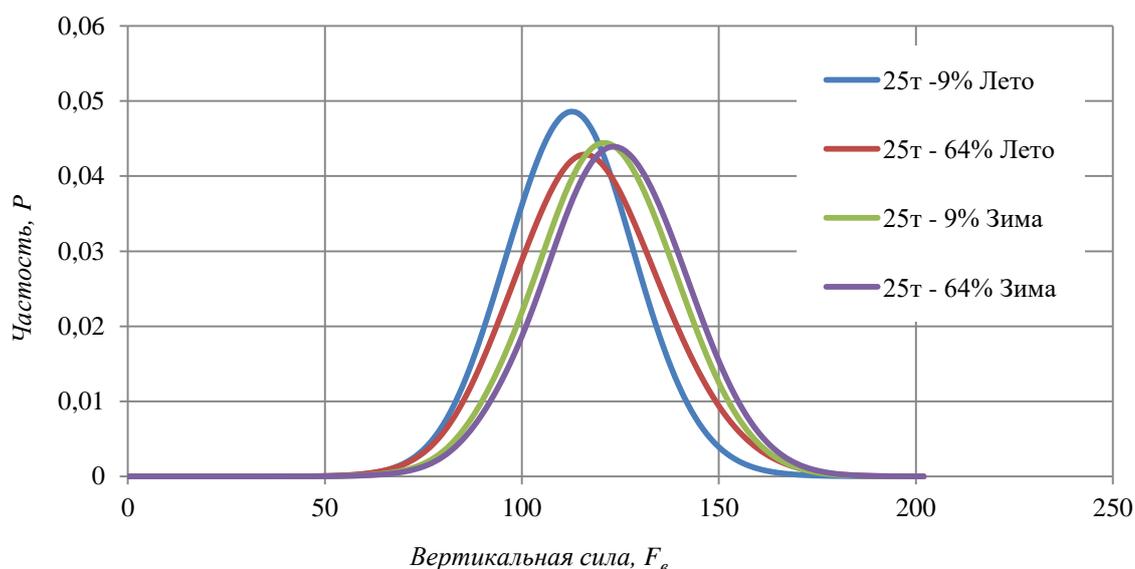


Рисунок 6.3 – Интегральные распределения вертикальных сил от суточного пакета поездов на перегоне Зилово – Зудыра Забайкальской ДИ для доли 9 и 64 % грузовых вагонов с нагрузками 245 кН/ось для летних и зимних условий соответственно (см. Приложение 11)

Таблица 6.4 – Интегральная повреждаемость рельсов ДТ350 для четырех блоков нагрузок

№ п/п	Интервал по пропущенному тону	Интегральная повреждаемость, лето		Интегральная повреждаемость, зима	
		$W_s, 9\%$	$W_s, 60\%$	$W_s, 9\%$	$W_s, 60\%$
1	0-30	0,54	0,63	0,70	0,75
2	30-60	0,69	0,81	0,89	0,95
3	60-90	0,80	0,93	1,03	1,10
4	90-120	0,93	1,09	1,21	1,29
5	120-150	1,38	1,61	1,79	1,90
6	150-180	1,67	1,96	2,16	2,31
7	180-210	2,56	3,00	3,32	3,53
8	210-240	3,89	4,55	5,04	5,37
9	240-270	4,73	5,53	6,12	6,53
10	270-300	5,96	6,97	7,71	8,22
Среднее		2,315	2,708	2,997	3,195

По данным интегральных распределений были рассчитаны интегральные повреждаемости рельсов ДТ350, с учетом деградации механических свойств поверхностного слоя для разных интервалов пропущенного тонажа и каждого из четырех блоков нагрузок ДИ для доли 9 и 64 % грузовых вагонов с нагрузками 245 кН/ось для летних и зимних условий. Результаты расчетов представлены в таблице 6.4.

По данным интегральных распределений были рассчитаны эквивалентная нагрузка и средние значения интегральной повреждаемости рельсов ДТ350.

Средние расчетные значения интегральной повреждаемости рельсов ДТ350 и эквивалентной нагрузки для Зиловской дистанции пути Забайкальской ДИ для доли грузовых вагонов с осевыми нагрузками 245 кН/ось 9 и 64 % летних и зимних условий представлены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Средние расчетные значения интегральной повреждаемости рельсов ДТ350 и эквивалентной нагрузки для Зиловской дистанции пути Забайкальской ДИ для доли грузовых вагонов с осевыми нагрузками 245 кН/ось 9 и 64 % летних и зимних условий.

Сезон	Повреждаемость рельсов		Эквивалентная нагрузка, кН	
	9 %	64 %	9 %	64 %
Лето	$2.315 \cdot 10^{-7}$	$2.708 \cdot 10^{-7}$	112	117
Зима	$2,997 \cdot 10^{-7}$	$3,195 \cdot 10^{-7}$	121	123

Для учета климатических условий с учетом продолжительности летнего и зимнего периодов, принимая период эксплуатации участка железнодорожного пути для летних условий – $\alpha = 7/12 = 0,583$, для эксплуатации в зимних условиях – $\beta = 5/12 = 0,416$.

Тогда для участка пути Зиловской дистанции пути Забайкальской ДИ суммарные интегральные распределения вертикальных сил F_i при эксплуатации рельсов в летний и зимний период определим в соответствии с выражением (5.8) главы 5.

В соответствии с выражением (6.10), данными табл.6.5 получены следующие числовые значения пропущенного тоннажа до образования контактно-усталостных трещин на поверхности катания.

Для доли грузовых вагонов 9 % с нагрузками 245 кН/ось:

$$-\text{лето } T_{\text{кут } 9\%} = 2 / (2,315 \cdot 0,264) \cdot 10^7 \cdot 11,2 = 367 \text{ млн т брутто};$$

$$-\text{зима } T_{\text{кут } 9\%} = 2 / (2,997 \cdot 0,264) \cdot 10^7 \cdot 12,1 = 338 \text{ млн т брутто}.$$

Среднее расчетное значение пропущенного тоннажа до образования сетки контактно-усталостных микротрещин на поверхности катания при доле 9 % вагонов с нагрузками 245 кН/ось составило:

$$T_{\text{кут } 9\%}^{\Sigma} = 0,583 \cdot 367 + 0,417 \cdot 338 = 214 + 141 = 355 \text{ млн т брутто}$$

Расчетная величина пропущенного тоннажа по пути до образования контактно-усталостных микротрещин на поверхности катания составит 355 млн т брутто.

Для доли грузовых вагонов 64 % с нагрузками 245 кН/ось:

$$-\text{лето } T_{\text{кут } 64\%} = 2 / (2,708 \cdot 0,264) \cdot 10^7 \cdot 11,7 = 327 \text{ млн т брутто};$$

$$-\text{зима } T_{\text{кут } 64\%} = 2 / (3,195 \cdot 0,264) \cdot 10^7 \cdot 12,3 = 298 \text{ млн т брутто}.$$

Среднее расчетное значение пропущенного тоннажа для одной до образования контактно-усталостных трещин при доле 64 % вагонов с нагрузками 245 кН/ось составило:

$$T_{\text{кут } 64\%}^{\Sigma} = 0,583 \cdot 327 + 0,417 \cdot 298 = 191 + 124 = 315 \text{ млн т брутто}.$$

Таким образом, увеличение доли поездов, сформированных из вагонов с нагрузками 245 кН/ось с 9 % в суточном пакете поездов до 64 % величина пропущенного тоннажа до образования поверхностных трещин снизится с 355 до 315 млн т брутто или на 11,3 %.

Выводы по главе 6

1 Разработана методика расчета контактно-усталостной повреждаемости рельсов до образования трещин на поверхности катания рельсов с учетом деградации механических свойств рельсовой стали от пропущенного тоннажа.

2 Путем верификации расчетных и экспериментальных данных до образования контактно-усталостных трещин участках Экспериментального кольца АО ВНИИЖТ Московской ДИ получены расчетные зависимости относительной повреждаемости для объемно- закаленных рельсов по условным интервалам пропущенного тоннажа с учетом деградацию механических свойств поверхности катания рельсов.

3 С учетом разработанной методики выполнены расчеты срока службы до образования трещин на поверхности катания рельсов и выполнена верификация с экспериментальными данными работы [195]. Расхождения составили до 15 %.

4 Расчетным путем на примере Зиловской дистанции пути Забайкальской ДИ установлено, что увеличение доли грузовых вагонов с нагрузками 245 кН/ось с 9 до 64 % приведет к снижению службы рельсов до образования трещин контактно-усталостного характера на поверхности катания рельсов на 11,3 %.

5 Для совершенствования методики расчета контактно-усталостной доповреждаемости рельсов необходимо:

– продолжить исследования по установлению аналитических зависимостей между усталостными характеристиками поверхности катания рельсов и степенью деградации ее механических свойств от пропущенного тоннажа;

– разработать методику, включающую стадию развития и роста трещин до предельного состояния;

– дополнить методику в части прогнозирования контактно - усталостной повреждаемости внутренних рельсов в кривых малых радиусов при воздействии разного подвижного состава, в том числе от вагонов с повышенными осевыми

нагрузками, а также на участках эксплуатации локомотивов, формирующих высокие уровни касательных напряжений на поверхности катания рельсов в режимах тяги и торможения.

ГЛАВА 7 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ РЕЛЬСОВ

7.1 Состояние вопроса по технологии фрезерования рельсов

Фрезерование рельсов применяется для восстановления формы головки рельсов под профиль нового рельса типа Р65, удаления длинных и коротких волнообразных неровностей и снятия дефектного слоя металла на рабочих поверхностях головок рельсов в пути [267, 268]. Критерием выбора вида технологии поверхностной обработки рельсов является глубина контактно-усталостных дефектов: при глубине дефектов менее 1 мм применяется шлифование, при глубине более 1 мм до 3,5 мм – фрезерование [269]. Для реализации технологии фрезерования рельсов ОАО «Калужский завод «Ремпутьмаш» по кооперации с австрийской фирмой MFL изготовлен рельсофрезерный поезд РФП-1, который одновременно выполняет обработку поверхности катания обеих рельсовых нитей на глубину до 3,5 мм за один проход поезда [267]. Общий вид рельсофрезерного поезда РФП-1 № 001 и его рабочих органов – фрезерных колес показан на рис. 7.1, 7.2.



Рисунок 7.1 – Общий вид рельсофрезерного поезда РФП-1 № 001



Рисунок 7.2– Общий вид рабочих органов РФП-1- фрезерных колес

На рисунке 7.3 представлен общий вид размещения кассет на фрезерном колесе.



Рисунок 7.3 – Общий вид размещения кассет с твердосплавными пластинами на фрезерном колесе

7.2 Условия проведения исследований по отработке технологии фрезерования рельсов

Исследования технологии фрезерования рельсов проводились в осеннее и зимнее время года при температуре окружающей среды от -2 до -8°C , в светлое и темное время суток на опытном участке пути ст. Разъезд 8 км Приволжской ДИ, на прямом опытном участке, набранном из рельсов Р65 длиной 12,5, 16,5 и 25 м производства Нижнетагильского металлургического комбината, 1995 и 2006 гг. выпуска с поверхностными дефектами 10, 11, 14, 16, 40, 44 и их сочетаниями. Длина опытного участка 375 м.

Испытания также проводились в кривой R650 м. Опытный участок в кривой R650 м расположен на действующем пути перегона Разъезд 8 км – РСП. В соответствии с требованием к высоте головки рельса – не менее 28 мм, высота рельса была не менее 172 мм. Выщербины, сколы, глубиной более 8 мм были наплавлены и зашлифованы. Анализ геометрических параметров рельсовой колеи показал:

– на опытном прямом участке пути ширина колеи по контрольным сечениям изменялась в диапазоне от 1507 до 1536 мм. Сужение рельсовой колеи определялось за счет установки рельсов с расплющенной верхней частью головки с выступом до 6 мм. Предельные уширения определялись за счет установки рельсов с боковым износом. Уровень изменялся от 1 до 14 мм, что больше, чем допускается для прямого участка пути. Подуклонка изменялась в диапазоне от $1/12$ до $1/28$, что допускается согласно Инструкции по текущему содержанию пути [190];

– в кривой R650 м ширина колеи изменялась в пределах от 1532 до 1544 мм, уровень от 32 до 57 мм. Подуклонка находилась в пределах от $1/11$ до $1/15$ на наружном рельсе и от $1/39$ до $1/42$ на внутреннем рельсе.

Разброс геометрических параметров рельсовой колеи в широком диапазоне позволил сконцентрировано, на небольшом по протяженности участке пути, выявить возможности, качественные показатели при выполнении технологических операций по фрезерованию рельсов в пути.

7.3 Результаты исследований технологии фрезерования рельсов в пути

7.3.1 Исследование качества формирования поперечного профиля рельсов при фрезеровании в прямом участке пути

Качественные показатели по формированию поперечного профиля рельса определялись путем совмещения поперечных профилей, формируемых рельсофрезерным поездом РФП-1 и заданным профилем Р65 в соответствии с ГОСТ 51 685–2013г. [10].

Установлено, что качественные показатели по формированию поперечного профиля существенно зависят от геометрических параметров пути и могут быть разделены на группы, определяемые величиной подуклонки, шириной колеи, поперечным профилем пути.

Анализ поперечных профилей рельсов показал:

– на прямом участке пути наиболее эффективно съём металла происходил на рельсах с подуклонкой близкой к номинальной $-1/20$;

– при наличии у рельсов дефектов в виде бокового износа более 5...6 мм (код дефекта 44 [197]) обработка внутренней рабочей поверхности рельсов не выполнялась. При этом происходил повышенный съём металла в зоне наружной поверхности рельса с образованием ломаной поверхности и острых углов в зоне сопряжения фрезерованной поверхности и боковой наружной грани рельса. Бо-

ковая, изношенная поверхность рельса не обрабатывалась из-за начальной настройки положения фрезы на другую исходную ширину рельсовой колеи. Это подтверждает тот факт, что система фрезерования не управляет положением фрез по ширине, приводит к пропуску участков рельсов с увеличенной шириной колеи по отношению к исходной. Отступления подуклонки рельсов от номинальных значений $1/20$ вызывает повышенный съём металла, образование ступеньки в местах сопряжения обработанной и необработанной поверхности головки рельса;

– улучшение профиля наблюдалось на рельсах с расплющенной верхней частью головки (код дефекта 41.1, 41.2, 43) [197].. При этом наблюдался увеличенный съём металла в зоне наружной части поверхности катания рельса, что ухудшало профиль рельса, определяло повышенный съём металла у наружной части рельса. Это приводило к возникновению острых углов в зоне сопряжения боковой грани рельса с поверхностью катания;

– существенное ухудшение поперечного профиля рельса после фрезерования наблюдалось при отклонении подуклонки от номинального значения до $1/15...1/16$. Жесткая привязка фрез к нормативной подуклонке рельсов приводит к нерациональному съему металла, формированию профилей рельсов отличных от нового Р65, а так же образованию ступеньки в месте сочленения обработанной и необработанной поверхности со стороны рабочей выкружки рельсов. При разуклонке рельсов в пути с диаметральной осью фрезы на поверхности катания рельса формируется поверхность в виде многоугольника с несколькими углами, что ухудшает профиль рельса и может быть источником повышенных контактных давлений в зоне взаимодействия колеса с рельсом;

– как на правом, так и левом рельсах имеет место формирование ломанного профиля с понижением поверхности катания к внешней стороне рельсов. Данная закономерность наблюдалась на всех отфрезерованных рельсах. Происходило формирование острого угла в зоне сопряжения обработанной и необработан-

ной поверхности. Типичный ломанный профиль головки рельса после фрезерования представлен на рис. 7.4.

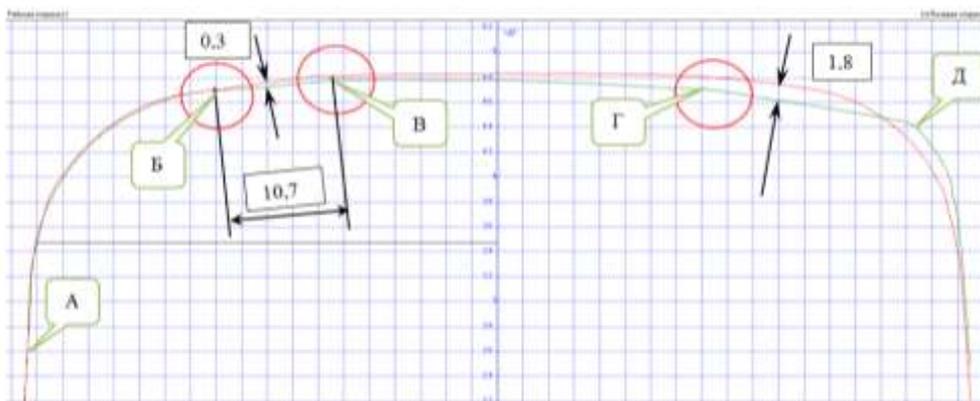


Рисунок 7.4 – Поперечные профили отфрезерованного рельса и нового Р65: зеленый – поперечный профиль отфрезерованного рельса; красный – по ГОСТ 51 685– 2013.

Анализ поперечного профиля рельса формируемого при фрезеровании показал необходимость условно разбить поперечный профиль на несколько зон. Границы зон фиксируются буквами алфавита. Установлено:

- полностью профили совпадают в зоне на рабочей выкружке боковой грани (на участке от А до В);
- на внутренней боковой грани профиля (рабочая грань) вслед за выкружкой (от В до В) вместо радиуса сопряжения $R 80$ мм образуется прямой участок шириной 10,7 мм, формирующий продольную полосу, с глубиной в средней части до 0,5 мм;
- на участке от В до Г отфрезерованный профиль имел угловое смещение по отношению к исходному профилю в направлении часовой стрелки. Это возможно при расхождении подуклонок рельса и поверхности резания кассет фрезерного колеса;

– на внешней поверхности головки рельса (нерабочей грани) вместо плавной поверхности симметричной рабочей грани имеет место поверхность с переломом профиля в точках Г и Д. На участке Г – Д образована наклонная площадка с занижением от заданного профиля до 2 мм.

Таким образом, поперечный профиль, формируемый при фрезеровании рельсофрезерным поездом РФП-1, совпадает с заданным профилем Р65 только в зоне рабочей выкружки, в остальных зонах он не соответствует требуемому очертанию.

7.3.2 Исследование качества формирования поперечного профиля рельсов при фрезеровании в кривом участке пути

В процессе фрезерования в кривом участке пути R 650 м установлено:

– для зарядки копировального устройства и начальной калибровки на наружном рельсе (боковой износ более 3 мм) наплыв на внутренней боковой грани должен быть сошлифован на длине 1 м;

– при фрезеровании внутреннего рельса с подуклонкой 1/40 (вертикальная ось рельса близкая к вертикальному положению) наблюдался повышенный съем металла в зоне поверхности катания наружной части головки рельса;

– сопряжение в зоне обработанной и необработанной наружной боковой поверхности головки рельса практически не имеет радиуса скругления;

– профиль наружного рельса с боковым износом $h=3...4$ мм фрезеровался только по поверхности катания с формированием плоской площадки с наклоном близким к величине угла отклонения вертикальной оси рельса от угла наклона фрез (1/20). Боковая изношенная часть поверхности не фрезеровалась и не видоизменялась;

– в ряде сечений в зоне сопряжения обработанной верхней поверхности головки рельса и внутренней боковой грани образовывалась ступенька глубиной до 1 мм.

7.3.3 Исследование геометрических параметров режущего инструмента фрезерных колес

Для установления причин отклонения сформированного после фрезерования поперечного профиля рельса от требований Технического задания [268,269] встала необходимость определения геометрических параметров поверхностей резания кассет фрезерных колёс поезда РФП-1. Объектом исследований являлись четыре кассеты, демонтированные с четырёх фрез: двух – секции фрезерной № 1 и двух – с секции фрезерной № 2.

Определение геометрических параметров кассет производилось с помощью координатно-измерительной машины FARO Fusion 6 (далее по тексту – КИМ). Конструкция КИМ FARO похожа на строение человеческой руки. Имеет плечевой, локтевой, кистевой суставы [270].

На плечевом суставе располагается крепёжная плита с помощью, которой машина устанавливается на плоскую поверхность. На кистевом суставе монтируется измерительный щуп.

В каждом суставе имеются датчики угловых перемещений. В режиме реального времени КИМ рассчитывает углы поворота каждого датчика угла поворота (12 датчиков) и рассчитывает координаты измерительного щупа в пространстве.

КИМ осуществляет измерения в рабочей зоне 1800 мм, при повторяемости измерения точки 0,036 мм с погрешностью линейных измерений $\pm 0,051$ мм [270].

Проведено полное измерение четырёх кассет фрезерных колес рельсофрезерного поезда РФП-01 на высокоточной измерительной машине FARO Fusion 6.

В результате измерений получено облако точек для каждой кассеты [271]. Результаты измерений облака точек рабочей поверхности кассеты представлены на рисунках 7.5 и 7.6.

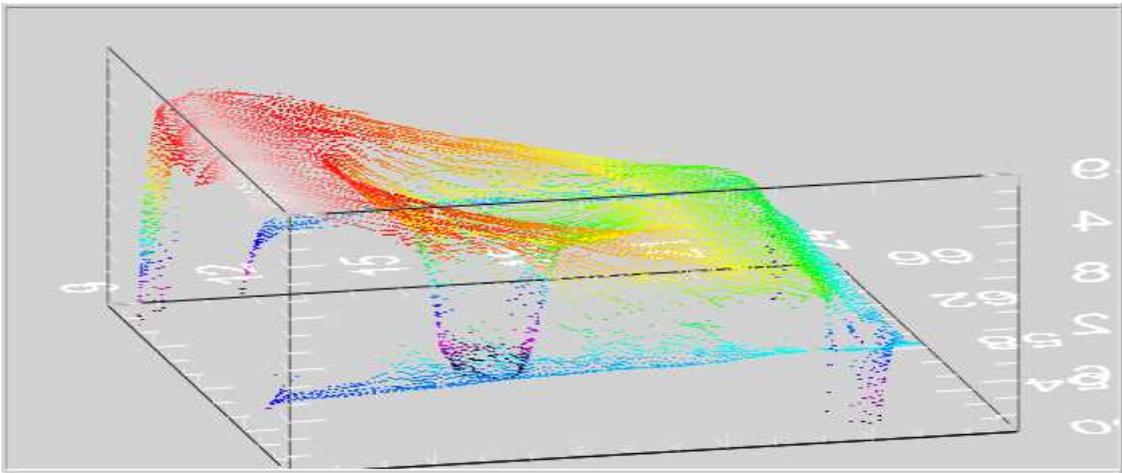


Рисунок 7.5 – Облако точек твёрдосплавной пластины по результатам измерения на координатно-измерительной машине FARO Fusion 6 [271]

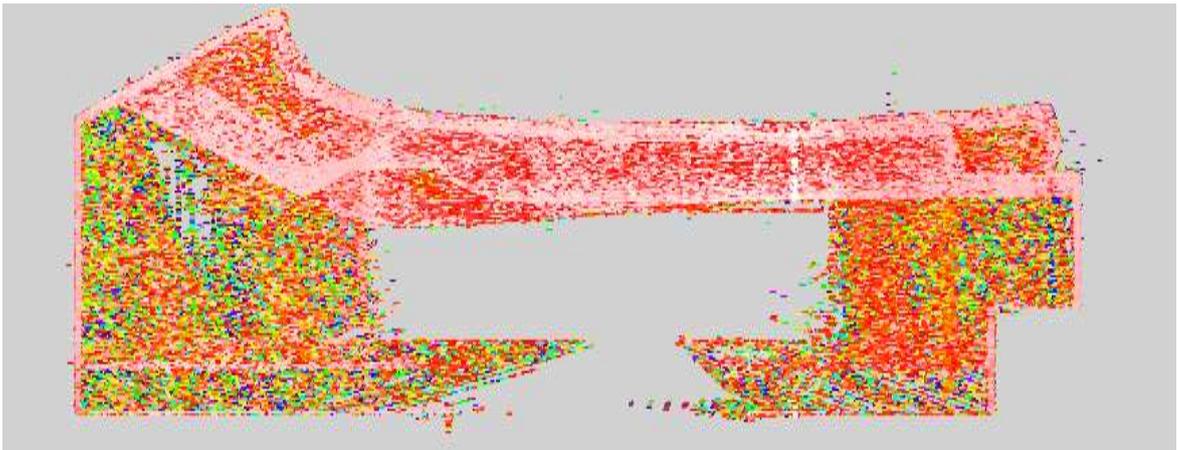


Рисунок 7.6 – Облако точек кассет в изометрии с видом боковой поверхности кассеты и поверхности резания [271]

Из полученного в результате измерений общего облака точек выделены облака точек для каждой из твёрдосплавных пластин. Каждое облако точек представляется в виде матрицы M размером $n \times 3$, где n - количество строк, равно количеству точек в облаке, столбцы - это координаты X, Y, Z [272]. Для полученной матрицы производится сингулярное разложение вида [272]

$$M = USV^*, \quad (7.1)$$

где S - матрица размером $n \times 3$, у которой элементы, лежащие на главной диагонали — это сингулярные числа (а все элементы, не лежащие на главной диагонали, являются нулевыми). Матрицы U (порядка n) и V (порядка 3) - это две унитарные матрицы, состоящие из левых и сингулярных векторов соответственно (а V^* - это сопряжённо-транспонированная матрица к V).

Сингулярное разложение матрицы M позволяет вычислять сингулярные числа данной матрицы [272], а также, левые и правые сингулярные векторы матрицы M :

- левые сингулярные векторы матрицы M — это собственные векторы матрицы MM^* ;
- правые сингулярные векторы матрицы M — это собственные векторы матрицы M^*M .

Решения систем уравнений сингулярного разложения в нашем случае используется для сжатия и распознавания изображений. Подробно алгоритм определения сингулярного разложения (Singular Values Decomposition, SVD) изложен в работах [272].

Дальнейшим шагом являлось разбиение облака точек на треугольники с использованием алгоритма Делоне [273]. Определялись точки, лежащие в горизонтальной и вертикальной плоскостях твёрдосплавных пластин.

Использовался метод Делоне, позволяющий максимизировать минимальный угол среди углов всех построенных треугольников, исключая образование «тонких» треугольников. Алгоритм для количества точек $N > 1$ состоит из двух шагов. Разбиение исходного множества на более мелкие подмножества. Для этого

проводятся вертикальные или горизонтальные прямые в середине множества и уже относительно этих прямых разделяются точки на две части примерно по $N/2$. После для каждой группы точек рекурсивно запускается процесс деления – объединение оптимальных триангуляций [273]. Сначала находятся две пары точек, отрезки которых образуют в совокупности с построенными триангуляциями выпуклую фигуру. Они соединяются отрезками, и один из полученных отрезков выбирается как начало для последующего обхода. Обход заключается в следующем: на этом отрезке как будто «надувается пузырь» внутрь до первой точки, которую достигнет раздувающаяся окружность «пузыря». С найденной точкой соединяется та точка отрезка, которая не была с ней соединена. Полученный отрезок проверяется на пересечение с уже существующими отрезками триангуляции, и в случае пересечения они удаляются из триангуляции. После этого новый отрезок принимается за начало для нового «пузыря». Цикл повторяется до тех пор, пока начало не совпадёт со вторым отрезком выпуклой оболочки. Процесс триангуляция (разбивка на треугольники) с использованием алгоритма Делоне для максимизации углов всех построенных треугольников в метрике Евклида приведено на рис. 7.7.

Для каждого полученного треугольника вычисляются косинусы нормали к осям координат. Отбираются те треугольники, для которых косинусы нормали совпали (плюс/минус СКО) с косинусами плоскости, полученной методом сингулярного разложения.

Таким образом отсекаются треугольники (точки), лежащие не в плоскости пластины, например углубление в центре пластины. При вписывании плоскости в облако точек последний столбец матрицы V является проекцией вектора нормали плоскости на оси координат (косинусы нормального вектора плоскости к осям).

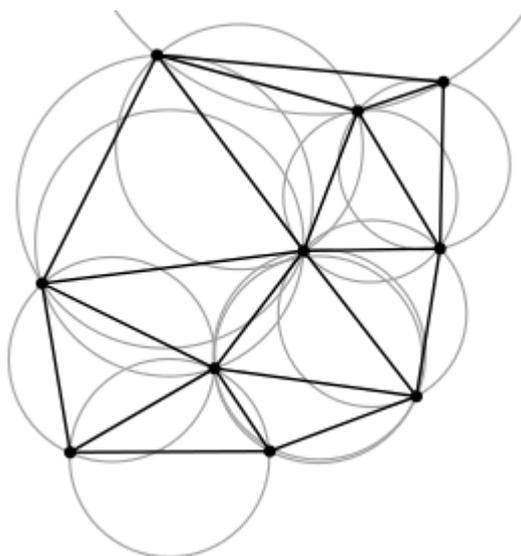


Рисунок 7.7– Пример использования алгоритма Делоне для максимизации углов всех построенных треугольников [273]

По отобранным точкам выводилась формула плоскости вида:

$$x \cdot \cos a + y \cdot \cos b + z \cdot \cos c - p = 0 \quad (7.2)$$

где a , b , c - углы вектора нормали плоскости к осям X , Y , Z ; p - расстояние от начала координат. Аналогичным образом получаем уравнение плоскости боковой поверхности пластины.

Формула линии кромки резания твёрдосплавной пластины, определялась как пересечение передней вертикальной и горизонтальной плоскостей [271]. Вокруг полученной прямой отобраны реальные точки из исходного облака точек. Путём совмещения кромок резания всех пластин на кассете получена линия резания кассеты, образующая фактический формируемый профиль рельса (профиль резания кассеты). Из исходного облака точек отбираются точки вблизи полученной прямой. Это реальные точки режущей грани твёрдосплавной пластины. Аналогично определяется режущая грань пластины с радиусом 15 мм, только в облако точек вписывается не плоскость, а цилиндр. Полученные режущие грани отдельных пластин сводятся в одну линию путём разворота вокруг оси барабана [271].

Подуклонка определялась путем нахождения минимума среднеквадратичного отклонения точек профиля фрезерования кассеты от профиля головки рельса Р65 по ГОСТ 51 685– 2013 [10] при повороте профиля головки рельса.

Результаты построения линии резания кассеты показаны на рис. 7.8.

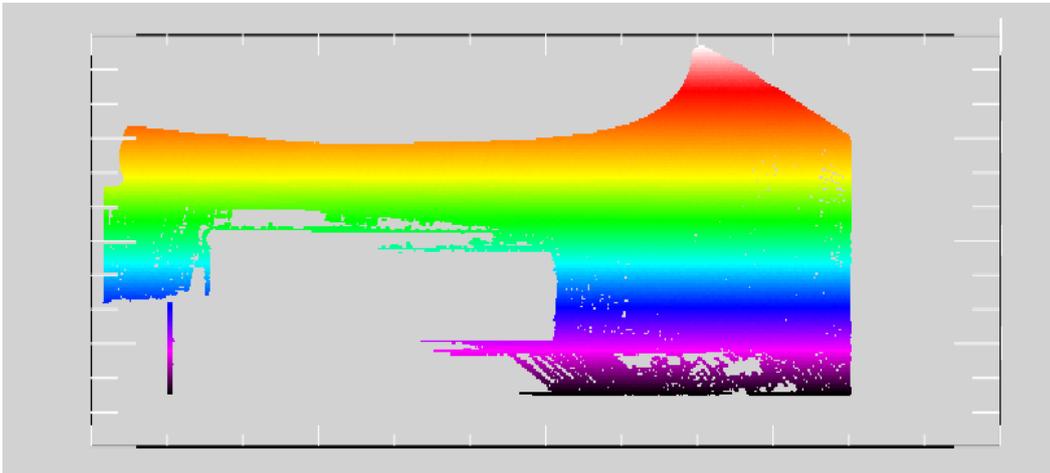


Рисунок 7.8 – Построенная по данным облака точек линия резания кассеты в плоскости $Y - Z$ [271]

По пространственным координатам облака точек построено изображение кассет в изометрии. Построение по облаку точек твердосплавные пластины на рабочей поверхности кассеты изображены в изометрии на рисунке 7.9.

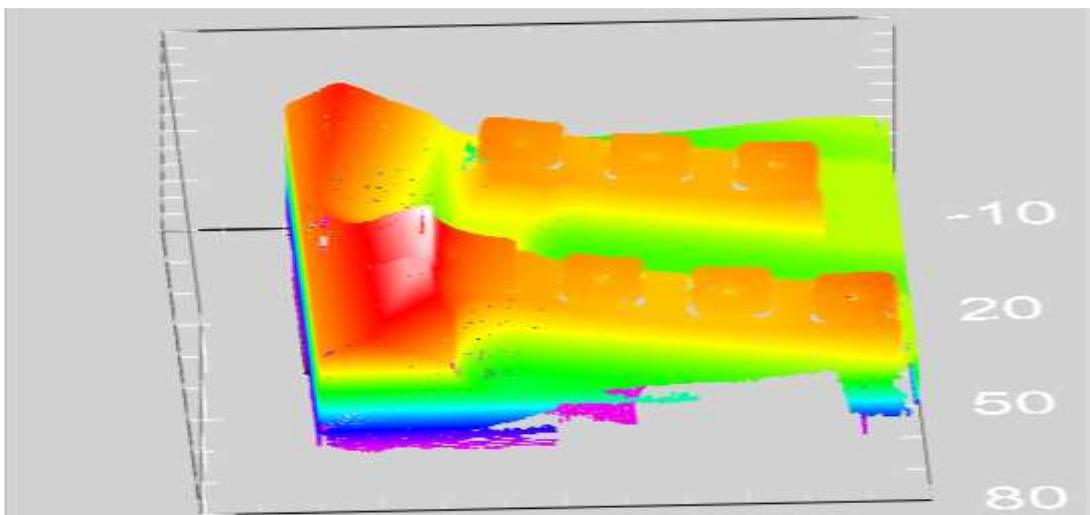


Рисунок 7.9 – Построенная по данным облака точек изображение кассеты с твердосплавными пластинами в изометрии в координатах $X - Y - Z$ [271]

Линия резания кассеты, образующая фактический профиль рельса после обработки и профиль рельса Р65 по [10] совмещались относительно вертикальной оси рельса по условию максимального совпадения контуров, т. е. до достижения минимального СКО. Наложением линии резания кассеты, образующей фактический профиль рельса Р65 после обработки и профиля рельса Р65 получено положение вертикальной оси Z кассеты.

По результатам наложения профилей линий резания кассеты и профиля рельса Р65 определялся угол между осью симметрии поперечного профиля рельса и вертикальной осью Z линии резания кассеты, образующей фактический профиль рельса после обработки, на основании которого определялась фактическая подуклонка.

Построенные в соответствии с методикой обработки результатов измерений линии резания, совмещались с новым профилем рельса Р65 [10] до достижения минимального СКО между накладываемыми профилями. Результаты расчёта подуклонки поверхности резания кассет представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Результаты расчётов подуклонки поверхности фрез [271]

№	Номер кассеты	Угол поворота, град.	Подуклонка
1	383_84	1,5	1/38
2	383_54	1,3	1/44
3	384_15	1,7	1/34
4	384_74	1,8	1/32

Таким образом, рассчитанные по результатам измерений на случайно выбранных кассетах по одной с каждой фрезы величина подуклонки изменялись в пределах от 1/32 до 1/44. Полученные значения подуклонки близки к нормативному устройству европейской рельсовой колеи – 1/40 и не соответствует требованиям Инструкции по текущему содержанию пути [190], определяющим для Российских железных дорог значение подуклонки 1:20.

Результаты совмещения поверхности катания рельса Р65 [10] и линии резания, полученной с помощью измерений, которые аппроксимированы по самой «высокой» линии выступов неровностей, т. е. профиль Р65 и профиль, развернутый до фактической поверхности резания – для всех четырёх кассет показали:

- профиль резания кассеты № 1 имеет поверхность, близкую к профилю Р65;
- профиль резания кассеты № 2 имеет поверхность, отличающуюся от профиля Р65 более значительно с учётом износа режущих граней пластин;
- профиль резания кассеты № 3 имеет поверхность, еще более отличающуюся от профиля Р65 из-за более сильного износа режущих граней твердосплавных пластин;
- профиль резания кассеты № 4 имеет местные горизонтальные участки с большими выступами, образуемые в результате неправильной настройки пластин 1 и 3 ряда № 1 и пластин 2 и 3 ряда № 2 кассеты.

В результате выполненных исследований геометрических параметров линии резания кассет установлено:

1 По полученному облаку точек путем проведения измерений в координатах OXYZ на высокоточной координатно – измерительной машине фирмы FARO с использованием метода триангуляции построены поверхности Делоне образующих поверхностей резания пластин кассет фрезерного колеса, приведённые к линиям резания для каждой кассеты.

2 Выполненные исследования при совмещении профилей резания кассет и нового профиля рельса Р65 показали:

- величины фактической подуклонки кассет близки к $1/40$, что соответствует нормативному устройству европейской рельсовой колеи, но не российской, где номинал $1/20$;
- фактическая подуклонка на случайно выбранных кассетах из четырёх фрез фрезерных колёс имела разброс от $1/32$ до $1/44$;

– при несовпадении значений геометрических параметров поверхности резания кассет фрезерных колёс и рельсов происходит ухудшение профиля рельса после фрезерования – формируется ломаная линия, поверхность с излишним наклоном к поверхности катания рельса ($1/20$). Чем больше расхождение между подуклонками, тем больше отклонения от поверхности головки рельса Р65.

3 Установлено, что причиной повторяющихся недостатков сформированного после фрезерования профиля рельса служит некачественно проведённая настройка режущих граней пластин на настроечном столе и отсутствие проверки на радиальное биение.

7.4 Исследование качественных показателей по удалению дефектов контактно усталостного характера на поверхности катания рельсов методом фрезерования

Для оценки эффективности метода фрезерования по удалению дефектов поверхности катания рельсов проводилась проверка рельсовых нитей с помощью ультразвукового дефектоскопа РДМ-2 [274].

В ходе проверки прямого участка пути на станции «Разъезд 8км» до фрезерования выявлены многочисленные пропадания донного сигнала (канал №1 с углом ввода 0°), указывающего на наличие контроленепригодных рельсов.

Суммарные длины пропадания донного сигнала для каждого рельса в прямом участке пути представлены в таблице 7.2. Как видно из таблицы суммарная длина пропадания донного сигнала для некоторых рельсов доходила до 5000 мм. Помимо наличия дефектов на такие пропуски донного сигнала могло повлиять наличие коррозии на поверхности рельсов.

Таблица 7.2 – Таблица проверки прямого участка пути средствами дефектоскопии до фрезерования

Рельс	Правая нить					Левая нить				
	Начало рельса			Длина рельса	Суммарное пропадание донного сигнала	Начало рельса			Длина	Суммарное пропадание донного сигнала
№	км	ПК	м	м	мм	км	ПК	м	м	мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	8	3	48.3	12.5	946	8	3	48.3	12.5	0
2	8	3	60.8	16.7	2612	8	3	60.8	25	0
3	8	3	77.5	16.5	3092	8	3	85.8	12.5	296
4	8	3	94	12.5	152	8	3	97.8	12.5	436
5	8	4	6.5	12.5	0	8	4	10.3	25	30
6	8	4	19	12.5	401	8	4	35.3	25	0
7	8	4	31.5	25	3096	8	4	60.3	25	0
8	8	4	56.5	25	1340	8	4	85.3	12.5	0
9	8	4	81.6	25	317	8	4	97.8	12.5	94
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
10	8	5	6.6	25	0	8	5	10.3	15	0
11	8	5	31.6	12.5	140	8	5	25.3	12	1576
12	8	5	44.1	25	56	8	5	37.3	25	4916

Также стоит отметить, что по проходу выявлены некачественные сигналы от преобразователей с углом ввода 70° и 45° (канал №2 и №3 соответственно) при проходе болтовых соединений и стыков, что говорит о некачественной настройке аппарата.

После фрезерования была проведена повторная проверка рельсовых нитей. Полученные данные показывают, что пропадание донного сигнала практически отсутствует (см. таблица 7.3), тележка дефектоскопа настроена лучше и записи прохода болтовых соединений и рельсовых стыков проведены более качественно. Несмотря на это, имелись сигналы на головке рельсов от преобразователей с углом ввода 70° , 55° и 45° , которые контроленепригодны.

Таблица 7.3 – Результаты проверки прямого участка пути средствами дефектоскопии после фрезерования

Рельс	Правая нить					Левый нить				
	Начало рельса			Длина рельса	Суммарное пропала-ние донного сигнала	Начало рельса			Длина рельса	Суммарное пропала-ние донного сигнала
№	км	ПК	м	м		мм	км	ПК	м	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	8	3	48,3	12,5	24	8	3	48,3	12,5	0
2	8	3	60,8	16,7	148	8	3	60,8	25	0
3	8	3	77,5	16,5	0	8	3	85,8	12,5	0
4	8	3	94	12,5	100	8	3	97,8	12,5	160
5	8	4	6,5	12,5	0	8	4	10,3	25	12
6	8	4	19	12,5	0	8	4	35,3	25	0
7	8	4	31,5	25	0	8	4	60,3	25	0
8	8	4	56,5	25	76	8	4	85,3	12,5	0
9	8	4	81,6	25	0	8	4	97,8	12,5	0
10	8	5	6,6	25	0	8	5	10,3	15	0
11	8	5	31,6	12,5	0	8	5	25,3	12	0
12	8	5	44,1	25	52	8	5	37,3	25	0

В кривом участке пути были проведены аналогичные проходы дефектоскопа РДМ-2 до и после фрезерования. В кривом участке пути лежали рельсы без видимых дефектов на головке рельса и следов коррозии. В результате запись сигналов дефектоскопа РДМ-2 была более качественной, по сравнению с прямым участком пути. Записи болтовых соединений и рельсовых стыках более четкие. Пропуски донных сигналов при проходе до фрезерования практически отсутство-

вали: на одном из рельсов зафиксирован пропуск суммарной длиной 168 мм. При проходе после работы РФП-1 пропуски данных сигналов не зафиксированы. Данные по суммарным пропускам данных сигналов приведены в таблицах 7.4, 7.5.

Таблица 7.4 – Таблица проверки в кривом участке пути R 650 м средствами дефектоскопии до фрезерования

Рельс	Правая нить					Левый нить				
	Начало рельса			Длина рельса	Суммарное пропадание донного сигнала	Начало рельса			Длина	Суммарное пропадание донного сигнала
№	к	ПК	м	м	мм	км	ПК	м	м	мм
1	6	7	3	25	0	6	7	3	25	0
2	6	7	28	25	0	6	7	28	25	0
3	6	7	53	25	0	6	7	53	25	0
4	6	7	78	25	168	6	7	78	25	0

Таблица 7.5 – Таблица проверки кривого участка пути R 650 м средствами дефектоскопии после фрезерования

Рельс	Правая нить					Левый нить				
	Начало рельса			Длина рельса	Суммарное пропадание донного сигнала	Начало рельса			Длина	Суммарное пропадание донного сигнала
№	км	ПК	м	м	мм	км	ПК	м	м	мм
1	6	7	3	25	0	6	7	3	25	0
2	6	7	28	25	0	6	7	28	25	0
3	6	7	53	25	0	6	7	53	25	0
4	6	7	78	25	0	6	7	78	25	0

Из данных таблиц 7.4, 7.5 видно, что пропуски данного сигнала имели место на правом наружном рельсе №4 длиной 168 мм. После проведения фрезерования пропуски данных сигналов не зарегистрированы.

Таким образом, произведенная дефектоскопия рельсов до и после их фрезерования показала, что в условиях действующего пути, где количество и величина дефектов незначительны, РФП-1 полностью удаляет дефекты на поверхности катания. В случае, когда глубина дефектов больше глубины фрезерования, дефекты

удаляются частично. Для полного их удаления требуется увеличить съём металла путем повторного прохода.

7.5 Недостатки технологического оборудования, выявленные в процессе отработки технологии фрезерования рельсов в пути

В процессе испытаний рельсофрезерного поезда выявлены замечания и недостатки [274].:

– происходило замерзание конденсата в «дюзах» и пневматических трубках при температуре окружающей ниже -3°C , что резко снижало эффективность отсоса стружки из зоны резания. Из-за недостаточной эффективности системы отсоса происходило попадание стружки под лыжу копира и его сброс. Последнее приводило к неуправляемому перемещению фрезерного колеса и «зарезанию» поверхности катания рельса. Требуется повысить эффективность осушки воздуха в пневмосистеме отсоса стружки. Предусмотреть подогрев «дюз» по причине прохождения теплого воздуха со стружкой и конденсации влаги при остановке поезда после работы;

– жесткая привязка фрез к нормативной подуклонке рельсов $1/20$ приводит к нерациональному съему металла при отступлении подуклонки рельсов в условиях эксплуатации от нормативной, а так же образованию ступеньки в месте сопряжения обработанной и необработанной поверхности. В данной напряженной части рельса сформированная ступенька, являясь концентратором напряжений, может являться зоной зарождения трещин. Кроме того, при разуклонке рельсов в пути с осью фрезы на поверхности катания формируется поперечный профиль рельса в виде многоугольника с несколькими тупыми углами;

– при недостаточной степени уплотнения балласта под шпалами, наличие участков с провисшими шпалами при фрезеровании возникают вертикальные ко-

лебания рельсошпальной решетки, приводящие к образованию рифлей на поверхности катания рельса с шагом, равным шагу размещения кассет с твердосплавными пластинами. Количество и амплитуда рифлей тем больше, чем больше длина и глубина участка с провисшими шпалами. Для обеспечения качественного фрезерования требуется жесткое основание, на котором располагается обрабатываемый рельс;

– недостаточная устойчивость копировального измерительного устройства на поверхности рельса. Из-за боковых и вертикальных ступенек в зоне болтовых стыков имели место случаи сброса копира и врезание фрезы в поверхности катания рельса;

– инерционность системы обработки положения фрезы по отношению к контрольному измерительному устройству определило случай врезания фрезы в поверхность катания при прохождении наплавки в зоне болтового стыка.

Выводы по главе 7

1 Впервые на российских железных дорогах проведены исследования по отработке технологии фрезерования поверхности катания рельсов в результате которых установлены основные закономерности данной технологии и недостатки технологического оборудования.

2 Метод фрезерования позволяет эффективно репрофилировать изношенную головку рельса под профиль Р65 и удалять дефекты контактно-усталостного характера поверхностного слоя. Произведенная дефектоскопия рельсов до и после их фрезерования показала, что в условиях действующего пути, где количество и величина дефектов не превышает двух мм РФП-1 полностью удаляет дефекты на поверхности катания. В случае, когда глубина дефектов больше глубины фрезерования, дефекты удаляются частично. Для полного их удаления требуется увеличить съем металла путем повторного прохода.

3 Разработана методика определения геометрических параметров

поверхностей кассет фрезерных колес путем измерений режущего инструмента с помощью высокоточной координатно-измерительной машины Fusion 6 фирмы FARO, преобразование облака точек, полученных методом сингулярного разложения и построения 3-D моделей кассет с использованием алгоритмов Делоне.

4 Разработаны и переданы на завод КЗ «Ремпутьмаш» мероприятия по совершенствованию технологии фрезерования рельсов и конструкции рабочих органов и измерительной системы рельсофрезерного поезда РФП-1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненных комплексных теоретических и экспериментальных исследований получены новые научно обоснованные технические и технологические решения по снижению износа и контактно-усталостной повреждаемости рельсов для условий интенсификации грузового движения.

1 Разработана структурная схема и аналитические выражения для расчета бокового и вертикального износа рельсов с использованием впервые введенного понятия базовой интенсивности износа. На основании комплексных экспериментальных и теоретических исследований установлены количественные значения и закономерности изменения интенсивности износа в зависимости от категорий качества рельсов, радиуса кривых участков пути, уровней непогашенных ускорений, периодичности лубрикации, продольного профиля пути и массы поездов, конструкции экипажных частей подвижного состава и величин осевых нагрузок, типа применяемых промежуточных рельсовых скреплений. Это позволило разработать научно обоснованную методику прогнозирования износа рельсов различных категорий качества для определения количественных величин бокового и вертикального износа в разных условиях эксплуатации.

2 По результатам многовариантных расчетов износа рельсов с использованием программного инструмента Rail Profile Wear Evolution в составе программного комплекса «Универсальный механизм» по критерию максимальной сходимости экспериментальных и расчетных данных в опытных кривых участках пути установлены параметры модели изнашивания Шпехта: коэффициент износа $k_v = 2,57E-13$, коэффициент скачка $k_\gamma = 12$ и критическая плотность мощности $P_{кр} = 30$ Вт/мм² для рельсов ДТ350. Предложен метод оценки интенсивности износа рельсов разных категорий качества путем определения их коэффициентов износа.

3 Выполнено ранжирование факторов по доле вклада их в интенсивность износа рельсов. Выделены факторы, позволяющие управлять износом рельсов:

категория качества рельсов, тип смазки и периодичность лубрикации, уровни непогашенных ускорений, стабильность подуклонки рельсов. Рациональный выбор управляющих факторов с использованием методики прогнозирования позволит минимизировать интенсивность износа рельсов в различных условиях эксплуатации.

4 Для автоматизации проведения расчетов износа рельсов разработана программа для ЭВМ в среде графического программирования Lab View 2011. На примере 36 кривых проведено моделирование бокового износа рельсов с использованием разработанной программы и выполнен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных по износу рельсов, представленных техническим отделом Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской ДИ. Разность между расчетными и экспериментальными данными не превышала 15 %.

5 Разработан алгоритм прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости рельсов до образования трещин на поверхности катания. На разработанной конечно-элементной модели прокатки вагонного колеса по рельсу исследовано напряженно-деформированное состояние зоны контакта. По результатам моделирования установлено, что компоненты тензора напряжений на поверхности рельса находятся в непропорциональном многоосном напряженном состоянии. Это позволило обосновать применение деформационной модели Брауна – Миллера для прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости рельсов на поверхности катания до образования трещин.

6 Определены параметры деформационных кривых упругой, пластической и суммарной усталости рельсовой стали с использованием модифицированного метода твердости Расла – Фатеми. Установлена полиномиальная зависимость относительной повреждаемости поверхности катания рельсов от вертикальной силы F_i путем проведения расчетов в программном комплексе Fatigue с использованием усредненных характеристик показателей степени усталостной прочности и пластичности рельсовой стали и расчетных напряжений в зоне контакта колеса и рельса.

7 Разработано устройство на основе системы технического зрения, предложен алгоритм обработки видеосигнала для определения распределений точек контакта колеса с рельсом по поперечному сечению. Путем испытаний грузового груженого вагона, оборудованного разработанным устройством, установлено, что основная доля точек контакта приходится на продольные полосы поверхности катания рельса, расположенные на расстоянии 20...25 мм от внутренней боковой грани, – 26,4 % и на продольные полосы поверхности катания рельса, расположенные на расстоянии 25...30 мм, – 22 %.

8 Разработана методика определения интегральных распределения вертикальных сил, позволяющая учитывать воздействие от разного типа подвижного состава с учетом конструкции ходовых частей и величин осевых нагрузок, скорости движения, жесткости подшпального основания от сезонности (лето, зима), поперечного профиля пути, а также состояния пути в виде влажных и сухих выплесков.

9 Разработана методика прогнозирования контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов до образования трещин с учетом деградации механических свойств рельсовой стали в зависимости от пропущенного тоннажа. Расчетным путем установлено, что увеличение доли грузовых вагонов с осевыми нагрузками 245 кН с 9 до 64 % для условий Забайкальской ДИ приведет к снижению сроков до зарождения контактно-усталостных трещин на поверхности катания рельсов на 11,3 %.

10 Впервые для российских железных дорог установлены закономерности формирования методом фрезерования изношенного продольного и поперечного профиля головки рельса в прямых и кривых участках пути и эффективность удаления контактно-усталостных повреждений, распространяющихся на глубину до 2,5 мм, с использованием рельсофрезерного поезда. Разработана методика определения геометрических параметров режущего инструмента фрезерных колес с преобразованием облака точек методом сингулярного разложения и использования алгоритмов Делоне, которая позволила выбрать рациональный профиль режущего

инструмента для качественного репрофилирования изношенной головки рельса.

11 Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации являются:

– исследования по рациональному выбору управляющих факторов для снижения интенсивности износа рельсов;
исследования контактно-усталостной повреждаемости рельсов в кривых участках пути малых и средних радиусов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Захаров, С. М. Развитие тяжеловесного движения в мире / С. М. Захаров, К. П. Шенфельд // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 4. – С. 9–17.
- 2 Захаров, С. М. Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения в области колес, рельсов и их взаимодействия / С. М. Захаров // Железные дороги мира. – 2002. – № 8. – С. 9–17.
- 3 Харгроуе, М. Экономическая оценка повышения осевых нагрузок по результатам испытаний в Пуэбло / М. Харгроуе // Железные дороги мира. – 1993. – № 9. – С. 56–58.
- 4 Ньюмен, Р. Р. Экономика большегрузных вагонов на железной дороге / Р. Р. Ньюмен // Burlington Northern Bulletin. – 1990. – С. 136–172.
- 5 Гапанович, В. А. Тяжеловесное движение, опыт, проблемы, задачи / В. А. Гапанович // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 10. – С. 9–14.
- 6 Иванов, П. А. Об эффективности технологии тяжеловесного движения и перспективах ее развития / П. А. Иванов // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 10. – С. 16–18.
- 7 Гапанович, В. А. Инфраструктура в условиях интенсификации перевозок / В. А. Гапанович, В. В. Третьяков, В. О. Певзнер, О. А. Суслов // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 3. – С. 16–20.
- 8 Головатенко, А. В. Работа «ЕВРАЗ ЗСМК» по инновационному развитию рельсовой продукции за счет технического перевооружения и освоения новых технологий / А. В. Головатенко // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам юбилейного 130-го заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Новокузнецк, 7–9 октября 2014 г.). – Санкт-Петербург, 2015. – С. 43–47.
- 9 Капнин, В. В. Освоение технологии производства рельсов на ОАО

«ЧМК» / В. В. Капнин, Д. В. Шабуров // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам юбилейного 130-го заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Новокузнецк, 7–9 октября 2014 г.). – Санкт-Петербург, 2015. – С. 77–79.

10 ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия (с изменением № 1). – Москва: Стандартинформ, 2014. – 95 с.

11 Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.: утверждены распоряжением Правительства РФ от 17.06.2008 № 877-р.

12 Протокол совещания под председательством Министра промышленности и торговли Российской Федерации Д. В. Мантурова № 56-МД/20 от 30.08.2018.

13 Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года. Утвержденные распоряжением правительства РФ от 19.03.2019. № 466 р.

14 Лисицын, А. И. О надежности рельсов в различных условиях эксплуатации и необходимых мероприятиях по ее повышению / А. И. Лисицын // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Анапа, 7–9 октября 2020 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2021. – С. 58–68.

15 Соловатов, Р. О. Эксплуатация рельсов на грузонапряженных и горно-перевальных участках / Р. О. Соловатов // Путь и путевое хозяйство. – 2020. – № 5. – С. 24–27

16 Соколов, О. М. Оценка влияния типов конструкций рельсовых скреплений на износ рельсов разных категорий в кривых малого радиуса (менее 650 м) на участках с повышенными осевыми нагрузками для анализа возможности увеличения межремонтных сроков / О. М. Соколов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Анапа, 7–

9 октября 2020 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2021. – С. 101–128.

17 Некрасов, Д. Б. Основные направления деятельности бюро по взаимодействию с ОАО «РЖД» / Д. Б. Некрасов, Р. Н. Молоканов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов, по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Анапа, 7–9 октября 2020 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2021. – С. 69–75.

18 О внесении изменений в Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 9 февраля 2018 № 54: утвержден Министерством транспорта Российской Федерации 21 декабря 2010 г. № 286.

19 Заграничек, К. Л. Сравнительная оценка сопротивления износу дифференцированно термоупрочненных рельсов общего и специального назначения в лабораторных условиях / К. Л. Заграничек, А. И. Борц, И. Е. Перков // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Новокузнецк, 26–27 сентября 2019 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2020. – С. 94–114.

20 Чечельницкий, А. И. Анализ дефектности и изломов рельсов / А. И. Чечельницкий, О. Н. Ваганова // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Новокузнецк, 26–27 сентября 2019 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2020. – С. 66–75.

21 Чечельницкий, А. И. Влияние эксплуатационных, технических и технологических факторов на образование дефектов рельсов и мероприятия по снижению их воздействия / А. И. Чечельницкий // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Анапа, 7–9 октября 2020 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2021. – С. 55–57.

22 Правила производства расчетов верхнего строения железнодорожного

пути на прочность / МПС СССР, ВНИИЖТ. – Москва, 1954. – 60 с.

23 Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения его надежности / ЦПТ52/14, МПС РФ, ЦП. – Москва, 2000. – 39 с.

24 Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» 22.12.2017 № 2706р.

25 Сергеев, Б. Н. Пересмотр действующих правил расчета пути / Б. Н. Сергеев // Пересмотр путевых расчетов: сборник Центрального института научных исследований и реконструкций железнодорожного пути НКПС. – Москва: Гострансиздат, 1931. – С. 7–29.

26 Вериго, М. Ф. Расчеты пути. Их прошлое, настоящее и будущее / М. Ф. Вериго // Путь и путевое хозяйство. – 1997. – № 8. – С. 25–30.

27 Ломбард, П. С. Конструкция пути – оптимизация проектирования / П. С. Ломбард // Материалы конференции по железнодорожным тяжелым грузам / Институт инженеров. – Перт, 1978. – С. 107–115.

28 ГОСТ Р 55050–2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 16 с.

29 ГОСТ 32192–2013. Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ. – 2014. – 27 с.

30 ГОСТ Р 54505–2011. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 35 с.

31 Мелентьев, Л. П. Результаты наблюдений за развитием бокового износа рельсов в различных условиях эксплуатации / Л. П. Мелентьев // Труды ВНИИЖТ. – Вып. 220. Исследование тяжелых рельсов. – Москва: Трансжелдориздат, 1961. – 144 с.

32 Андриевский, С. М. Боковой износ рельсов в кривых / С. М. Андриевский, В. Н. Шестаков // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 1957. – № 1. – С. 22–29.

33 Вериго, М. Ф. Расчеты боковых сил, воспринимаемых рельсами при движении подвижного состава по горизонтальным неровностям пути / М. Ф. Вериго // Доклады Высшей школы. – Москва: Советская наука, 1959. – С. 100–104.

34 Hertz, H. Uber die beruhrung fester elastischer koerper / H. Hertz // Journal für die reine und angewandte mathematik. – 1882. – Bd. 92. – S. 156–171.

35 Жуковский, Н. Е. Трение бандажей железнодорожных колес о рельсы / Н. Е. Жуковский // Собрание сочинений. – Т. 3. – Москва: Ленинград: Госиздат, 1949. – С. 329–333.

36 Мусхелишвили, Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мусхелишвили. – Москва: Наука, 1966. – 708 с.

37 Мусхелишвили, Н. И. Решение основной смешанной задачи теории упругости для полуплоскости / Н. И. Мусхелишвили // Доклады Академии наук. – 1935. – Т. 3, № 2. – С. 51–53.

38 Штаерман, И. Я. Контактная задача теории упругости / И. Я. Штаерман. – Москва: Ленинград: ГИТТЛ, 1949. – 270 с.

39 Carter, F. W. On the action of a locomotive driving wheel / F. W. Carter // Proceedings of the Royal Society. – 1926. – Series A, vol. 112. – P. 151–157.

40 Carter, F. W. On the stability of running of locomotives / F. W. Carter // Proceedings of the Royal Society. – 1928. – Series A, vol. 121. – P. 585–611.

41 Fromm, H. Berechnung des schlupfes beim rollen deformierbaren schein / H. Fromm // Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik. – 1927. – Bd. 7, H. 1. – P. 27–58.

42 Джонсон, К. Л. Механика контактного взаимодействия / К. Л. Джонсон. – Москва: Мир, 1989. – 510 с.

43 Vermeulen, P. J. Contact of non-spherical bodies transmitting tangential forces / P. J. Vermeulen, K. L. Johnson // Journal of Applied Mechanics. – 1964. – № 31. – P. 338–340.

44 Poritsky, H. Stresses and deflections of cylindrical bodies in contact with ap-

plication to contact of gears and locomotive wheels / H. Poritsky, N. Y. Schenectady // Transactions of the American Society of Mechanical Engineers (ASME). Series E. Journal of Applied Mechanics. – 1950. – Vol. 17. – P. 191–201.

45 Kalker, J. J. On the rolling contact of two elastic bodies in the presence of dry friction / J. J. Kalker. – The Netherlands: Delft University, 1967. – 170 p.

46 Kalker, J. J. A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact / J. J. Kalker // Vehicle System Dynamics. – 1982. – Vol. 11, No. 1. – P. 1–13.

47 Kalker, J. J. Two algorithms for the contact problem in elastostatics / J. J. Kalker. – Waterloo: University of Waterloo Press, 1983. – 101 p.

48 De Pater, A. D. The motion of a single wheelset along curved track / A. D. De Pater; Delft University of Technology. – 1995.

49 De Pater, A. D. The approximate determination of the hunting movement of a railway vehicle by aid of the method of Krylov and Bogoljubov / A. D. De Pater // Applied Science Results. Section A. – 1961. – Vol. 10. – Article number: 205.

50 Kik, W. A fast approximate method to calculate normal load at contact between wheel and rail and creep forces during rolling / W. Kik, J. Piotrowski // Paper, presented at Second mini-conference on contact mechanics and wear of rail-wheel systems (Budapest, July 29–31). – 1996. – P. 52–61.

51 Погорелов, Д. Ю. Моделирование контактных взаимодействий в задачах динамики систем тел / Д. Ю. Погорелов, А. Э. Павлюков, Т. А. Юдакова, С. В. Котов // Динамика, прочность и надежность транспортных машин: сборник научных трудов / Под ред. В. И. Сакало. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2001. – С. 11–23.

52 Casanueva, C. Comparison of wear prediction models for different contact condition. / C. Casanueva, R. Enblom, M. Berg // The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks. Proceedings of the 24th Symposium of the International Association for Vehicle System Dynamics (IAVSD 2015), Graz, Austria, 17-21 August 2015. – CRC Press, 2016. – P. 871–878.

53 Саидова, А. В. Совершенствование прогнозирования износа профилей

колес грузовых вагонов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Саидова Алина Викторовна. – Санкт-Петербург, 2013. – 121 с.

54 Shen, G. A comparison of alternative creep-force models for rail vehicle dynamics analysis / G. Shen, J. K. Hedrick, J. A. Elkins // *The dynamics of vehicles on Roads and on Tracks: Proceedings of 8-th IAVSD Symposium (Cambridge, August 1983)*. – Liss: Swetz and Zeitlinger Publishers, 1984. – P. 591–605.

55 Magel, E. A numerical simulation of wheel/rail wear / E. Magel, J. Kalousek, R. Caldwell // *Wear*. – 2005. – Vol. 258. – P. 1245–1254.

56 Clayton, P. Rolling/sliding wear behavior of a chromium-molybdenum rail steel in pearlitic and bainitic conditions / P. Clayton, R. Devanathan // *Wear*. – 1992. – Vol. 156. – P. 121–131.

57 Kapoor, A. Wear by plastic ratcheting / A. Kapoor, K. L. Johnson // *Wear*. – 1997. – Vol. 212. – P. 119–130.

58 Серенсен, С. В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность: руководство и справочное пособие / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. – Москва: Машиностроение, 1975. – 448 с.

59 Когаев, В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В. П. Когаев. – Москва: Машиностроение, 1993. – 364 с.

60 Basquin, O. H. The exponential law of endurance tests / O. H. Basquin // *Proceedings of ASTM*. – 1910. – Vol. 10, Part II. – 625 p.

61 Tavernelli, J. F. Experimental support for generalized equation predicting low cycle fatigue / J. F. Tavernelli, L. F. Coffin // *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers (ASME)*. – 1962. – Vol. 84, No. 4. – P. 533–537.

62 Manson, S. S. Discussion / S. S. Manson // *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers (ASME)*. – 1962. – Vol. 84, No. 4. – P. 537–541.

63 Morrow, J. Fatigue design handbook. Advances in Engineering / J. Morrow // Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers. – 1968. – Vol. 4. – P. 21–29.

64 Kapoor, A. A re-evaluation of the life to rupture of ductile metals by cyclic plastic strain / A. Kapoor // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. –

1994. – Vol. 17, No. 2. – P. 201–219.

65 Sines, G. Behavior of metals under complex static and alternating stresses / G. Sines, J. L. Waisman // *Metal Fatigue*. – New York, 1959. – P. 145–169.

66 Crossland, B. Effect of large hydrostatic pressures on the torsional fatigue strength of an alloy steel / B. Crossland // *Proceedings of the International Conference on Fatigue of Metals*. – London: Institution of Mechanical Engineers, 1956.

67 Findley, W. N. A theory for the effect of mean stress on fatigue of metals under combined torsion and axial load or bending / W. N. Findley // *Journal of engineering for industry. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. – 1959. – Vol. 81. – 301 p.

68 Brown, M. W. A theory for fatigue failure under multiaxial stress-strain conditions / M. W. Brown, K. J. Miller // *Proceedings of The Institute of Mechanical Engineers*. – 1973. – Vol. 187. – P. 745–755.

69 Fatemi, A. A critical plane approach to multiaxial fatiguedamage including out-of-phase loading / A. Fatemi, D. F. Socie // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. – 1988. – Vol. 11. – P. 149–165.

70 Socie, D. F. Critical plane approaches for multiaxial fatigue damage assessment / D. F. Socie // *Advances in Multiaxial Fatigue / ASTM STP*. – West Conshohocken, 1993. – 7 p.

71 Dang Van, K. Sur la résistance à la fatigue des métaux / K. Dang Van // *Sciences et Techniques de l'Armement / Mémorial de l'artillerie française; Imprimerie nationale*. – Paris, 1973. – 47 p.

72 Dang Van, K. On a new multiaxial fatigue limit criterion: theory and application / K. Dang Van, B. Griveau, O. Message // *International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue*. – London, 1985. – P. 459–478.

73 Dang Van, K. Criterion for high cycle fatigue failure under multiaxial loading / K. Dang Van, G. J. F. Catilletaud, Le Flavenot, A. Douaron, H. P. Lieurade // *Biaxial and Multiaxial Fatigue (EGF 3)*. – London, 1989. – P. 459–478.

74 Dang Van, K. A comprehensive approach for modeling fatigue and fracture of

rails / K. Dang Van, M. H. Maitournam, Z. Moumni, F. Roger // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2009. – Vol. 76, No. 17. – P. 2626–2636.

75 Ekberg, A. Rolling contact fatigue of railway wheels. A parametric study / A. Ekberg // *Wear*. – 1997. – Vol. 211, No. 2. – P. 280–288.

76 Desimone, H. On the application of Dang Van criterion to rolling contact fatigue / H. Desimone, A. Bernasconi, S. Beretta // *Wear*. – 2006. – Vol. 260, No. 4–5. – P. 567–572.

77 Ciavarella, M. On the Dang Van fatigue limit in rolling contact fatigue / M. Ciavarella, F. Monno, G. Demelio // *International Journal of Fatigue*. – 2006. – Vol. 28, No. 8. – P. 852–863.

78 Сакало, В. И. Контактные задачи железнодорожного транспорта / В. И. Сакало, В. С. Коссов. – Москва: Машиностроение, 2004. – 496 с.

79 Сакало, А. В. Математическое моделирование контактных напряжений фрагментов на упругом основании с использованием конечно-элементных моделей: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Сакало Алексей Владимирович; ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет». – Брянск, 2009. – 143 с.

80 Сосновский, Л. А. Контактно-механическая усталость: основные закономерности / Л. А. Сосновский, Н. А. Махутов, В. А. Шуринов // *Вестник машиностроения*. – 1992. – № 10. – С. 44–61.

81 Махутов, Н. А. Метод оценки механического состояния материала рельсов после длительной эксплуатации / Н. А. Махутов, Л. А. Сосновский, А. А. Кебинов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2007. – № 8. – С. 49–54.

82 Гапанович, В. А. Какой должна быть поверхностная твердость рельсов / В. А. Гапанович, Л. А. Сосновский // *Железнодорожный транспорт*. – 2009. – № 12. – С. 36–40.

83 Махутов, Н. А. Усталостное разрушение рельсовой стали после эксплуатации / Н. А. Махутов, Ю. А. Демина, И. М. Петрова, И. В. Гадолина, Н. А. Жар-

кова, Е. А. Шур, А. И. Борц, И. В. Светозарова, Л. Р. Ботвина // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сборник материалов V международной конференции / ИМЕТ РАН. – Москва, 2013. – С. 87–88.

84 Махутов, Н. А. Кинетические закономерности развития поврежденности в рельсовых сталях / Н. А. Махутов, Л. Р. Ботвина, М. Р. Тютин, А. П. Солдатенков, Ю. А. Демина, Е. А. Шур, А. И. Борц, И. М. Петрова, И. В. Гадолина, В. П. Левин // Интеллектуальные системы на транспорте (ИнтеллектТранс-2014): сборник материалов IV международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 3–4 апреля 2014 г.) / под ред. А.А. Корниенко. – Санкт-Петербург: ПГУПС, 2014. – С. 121–127.

85 Ботвина, Л. Р. Деструкция рельсовых сталей в условиях тяжеловесного и высокоскоростного движения / Л. Р. Ботвина, М. Р. Тютин, А. П. Солдатенков, Ю. А. Демина, В. П. Левин, Е. А. Шур, А. И. Борц, И. В. Светозарова, Н. А. Махутов, И. М. Петрова, И. В. Гадолина // Интеллектуальные системы на транспорте (ИнтеллектТранс-2013): материалы III международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 3–5 апреля 2013 г.). – Санкт-Петербург: ПГУПС, 2013. – С. 307–313.

86 Ботвина, Л. Р. Закономерности накопления повреждений в рельсовой стали в условиях контактной усталости / Л. Р. Ботвина, М. Р. Тютин, А. П. Солдатенков, В. П. Левин, Н. А. Жаркова, Ю. А. Демина, Е. А. Шур, А. И. Борц, И. В. Светозарова // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сборник материалов V международной конференции. – Москва: ИМЕТ РАН, 2013. – С. 11–12.

87 Шур, Е. А. Контактная усталость рельсов. Новые технологии производства деталей с увеличенными сроками эксплуатационного содержания для железнодорожного транспорта / Е. А. Шур, А. И. Борц, К. Л. Заграничек, В. М. Федин // Сборник научных докладов ВИНТИ РАН. – Москва, 2016. – С. 43–56.

88 Захаров, С. М. Анализ влияния параметров экипажей и пути на интенсивность износа в системе колесо – рельс (на основе полного факторного числен-

ного эксперимента) / С. М. Захаров, Д. Ю. Погорелов, В. А. Симонов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2010. – № 2. – С. 31–35.

89 Антерейкин, Е. С. Оценка влияния параметров рельсовой колеи на интенсивность износа рельсов в кривых: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06 / Антерейкин Евгений Сергеевич; [Место защиты: Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ) МПС РФ]. – Москва, 2010. – 187 с.

90 Гозбенко, В. Е. Анализ и пути снижения износа рельсов и колес подвижного состава / В. Е. Гозбенко, Б. Тувшинтур // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 3. – С. 191–197.

91 Андриевский, С. М. Боковой износ рельсов на кривых / С. М. Андриевский // Труды ВНИИЖТ. – Вып. 207. – М.: Трансжелдориздат, 1961. – 128 с.

92 Вериго, М. Ф. Взаимодействие пути и подвижного состава в кривых малого радиуса и борьба с боковым износом рельсов и гребней колес / М. Ф. Вериго. – Москва: ПТКБ ЦП МПС, 1997. – 207 с.

93 Карпущенко, Н. И. Износ и сроки службы рельсов и колес подвижного состава / Н. И. Карпущенко, И. А. Котова // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2003. – № 2. – С. 41–46.

94 Осташко, И. А. Влияние параметров рельсовой колеи на износ рельсов в кривых: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06 / Осташко Ирина Александровна; Сибирская академия путей сообщения. – Новосибирск, 1997. – 17 с.

95 Карпущенко, Н. И. Исследование бокового износа рельсов в кривых на перевальном участке / Н. И. Карпущенко, Е. С. Антерейкин, Д. Ю. Замелова, П. С. Труханов // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 9. – С. 35–40.

96 Вериго, М. Ф. Причины роста интенсивности бокового износа рельсов и гребней колес / М. Ф. Вериго; ВНТО железнодорожников и транспортных строителей. – Москва: Транспорт, 1992. – 46 с.

97 Карпущенко, Н. И. Влияние подуклонки и ширины колеи на износ рельсов / Н. И. Карпущенко, А. А. Николенко, Г. Г. Ядрошникова, Г. Г. Юрченко. – URL: <https://vunivere.ru/work65439?screenshots=1> (дата обращения 17.08.2019).

98 Карпущенко, Н. И. Влияние ширины колеи и состояния ходовых частей подвижного состава на интенсивность износов / Н. И. Карпущенко, Д. В. Величко, Н. А. Бобовникова // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, экономике, практике. – 2010. – № 3. – С. 10–13.

99 Рожкова, Е. А. Анализ влияния ширины колеи, уширений в кривых и возвышений наружных рельсов на показатели износов гребней колес (мощности сил трения между гребнем и рельсом) / Е. А. Рожкова, В. В. Закирова // Проблемы трансферта современных технологий в экономику Забайкалья и железнодорожный транспорт: материалы международной научно-практической конференции (Чита, 13–14 октября 2011 г.) / Забайкальский институт железнодорожного транспорта. – Чита, 2011. – С. 104–108.

100 Шахунянц, Г. М. Механические характеристики рельсов Р65 / Г. М. Шахунянц // Труды МИИТ. – Вып. 543. – Москва, 1977. – С. 39–106.

101 Добужская, А. Б. Исследование структуры рельсов с разной стойкостью к образованию контактно-усталостных дефектов / А. Б. Добужская, Г. А. Галицын, В. И. Сырейщикова // Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов. – Екатеринбург: УИМ, 2006. – С. 64–81.

102 Добужская, А. Б. Исследование неметаллических включений в рельсах и очагах контактно-усталостных дефектов / А. Б. Добужская, Г. А. Галицын, В. И. Сырейщикова // Неметаллические включения в рельсовой стали: сборник научных трудов по материалам I всероссийского научно-технического семинара / Уральский институт металлов. – Екатеринбург, 2005. – С. 41–58.

103 Шур, Е. А. Повреждения рельсов / Е. А. Шур. – Москва: Интекст, 2012. – 192 с.

104 Конюхов, А. Д. Изменение остаточного напряженного состояния рельсов в процессе производства / А. Д. Конюхов // Труды ЦНИИ МПС. – Вып. 434. –

Москва: Транспорт, 1971. – С. 102–117.

105 Захаров, С. М. Контактно-усталостные повреждения колес и рельсов и способы их снижения / С. М. Захаров, Е. А. Шур // Современные проблемы взаимодействия подвижного состава пути: сборник докладов научно-практической конференции (Москва, 20–21 ноября 2003 г.). – Москва: Интекст, 2003. – С. 47–50.

106 Абдурашитов, А. Ю. Закономерности образования контактно-усталостных дефектов / А. Ю. Абдурашитов // Путь и путевое хозяйство. – 2002. – № 11. – С. 16–20.

107 Георгиев, М. Н. О механизме развития контактно-усталостных трещин в железнодорожных рельсах / М. Н. Георгиев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2000. – № 9. – С. 50–52.

108 Георгиев, М. Н. Трещиностойкость железнодорожных рельсов / М. Н. Георгиев. – Кемерово: Флаг, 2006. – 211 с.

109 Clayton, P. Rolling/sliding wear behavior of a chromium-molybdenum rail steel in pearlitic and bainitic conditions / P. Clayton, R. Devanathan // Wear. – 1992. – Vol. 156. – P. 121–131.

110 Chen, Y. Rolling contact fatigue of rail steel / Y. Chen // Journal of Iron and Steel Research. – 2000. – № 12. – P. 50–53.

111 Порошин, В. Л. Исследование влияния силового воздействия на живучесть рельсов с контактно-усталостными повреждениями / В. Л. Порошин // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 1976. – № 7. – С. 36–46.

112 Порошин, В. Л. Оценка повреждаемости рельсов дефектами при повышении скоростей движения / В. Л. Порошин // Труды ВНИИЖТ. – Вып. 614. – Москва: Транспорт, 1975. – С. 54–65.

113 Щапов, Н. П. Результаты изучения различных вариантов опытных рельсов повышенной работоспособности / Н. П. Щапов // Труды ВНИИЖТ. Вып. 314. – Москва: Транспорт, 1966. – С. 5–19.

114 Яковлев, В. Ф. Исследование динамических контактных деформаций в

колесах и рельсах в эксплуатационных условиях / В. Ф. Яковлев // Научные труды ЛИИЖТ. – Вып. 222. – 1964. – С. 53–62.

115 Яковлев, В. Ф. Исследование сил взаимодействия, деформаций и напряжений в зоне контакта железнодорожных колес и рельсов: автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.06 / Владимир Федорович Яковлев; Ленинградский институт железнодорожного транспорта. – Ленинград, 1964. – 47 с.

116 Яковлев, В. Ф. Влияние схемы приложения нагрузок на контактную выносливость рельсов / В. Ф. Яковлев, П. А. Кудрявцев // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 1977. – № 1. – С. 33–36.

117 Борц, А. И. Результаты испытаний рельсов, подвергнутых дифференцированной закалке с прокатного нагрева, влияние особенностей технологии производства на их свойства / А. И. Борц, Е. А. Шур, В. А. Рейхарт, Ю. А. Базанов // Промышленный транспорт XXI век. – 2009. – № 4. – С. 32–36.

118 Шур, Е. А. О выборе допускаемых напряжений при прочностных расчетах рельсов / Е. А. Шур // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 1977. – № 8. – С. 38–41.

119 Могильный, В. В. Результаты производства и качество рельсов ОАО «НКМК» / В. В. Могильный, К. В. Волков, Е. П. Кузнецов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных трудов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Калуга, 1–2 октября 2009 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2010. – С. 26–32.

120 Морозов, К. В. Анализ структурно-фазовых состояний в рельсах, подвергнутых объемной и дифференцированной закалке / К. В. Морозов, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, А. М. Глезер, В. А. Батаев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – № 4. – С. 22–26.

121 Окладников, Е. В. Рельсы отечественных и иностранных предприятий / Е. В. Окладников // Путь и путевое хозяйство. – 2010. – № 6. – С. 11–17.

122 Рейхарт, В. А. Основные результаты полигонных испытаний рельсов на

экспериментальном кольце ВНИИЖТ / В. А. Рейхарт, Л. А. Джанполадова // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Калуга, 1–2 октября 2009 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2010. – С. 16–26.

123 Шур, Е. А. Эволюция повреждаемости рельсов дефектами контактной усталости / Е. А. Шур, А. И. Борц, А. В. Сухов, А. Ю. Абдурашитов, Л. В. Базанова, К. Л. Заграничек // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2015. – № 3 – С. 3–9.

124 Генкин, И. З. Термическое упрочнение рельсов в зоне сварки путем индукционного нагрева стыков / И. З. Генкин, Н. И. Дорофеева // Применение токов высокой частоты и электротермии. – Москва: Машиностроение, 1973. – С. 120–126.

125 Золотарский, А. Ф. Термически упрочненные рельсы / А. Ф. Золотарский. – Москва: Транспорт, 1976. – 263 с.

126 Полевой, Е. В. Разработка ресурсосберегающей технологии дифференцированной термической обработки длинномерных железнодорожных рельсов: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / Полевой Егор Владимирович; ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет». – Новокузнецк, 2018. – 132 с.

127 Самойлович, Ю. А. Упрочнение железнодорожных рельсов путем изотермической закалки на нижний бейнит / Ю. А. Самойлович // Черная металлургия. – 2013. – № 8. – С. 39–43.

128 Хлыст, С. В. Перспективная технология производства рельсов для высокоскоростного и тяжеловесного движения / С. В. Хлыст, В. М. Кузьмиченко, В. А. Резанов, А. И. Борц, Е. А. Шур // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – № 6. – С. 14–20.

129 Полевой, Е. В. Определение рационального химического состава и режимов термической обработки железнодорожных рельсов стали марки Э76ХФ с

использованием тепла прокатного нагрева / Е. В. Полевой, М. В. Темлянцев // *Металлургия: технологии, инновации, качество.* – Новокузнецк: СибГИУ, 2015. – С. 114–155.

130 Марков, Д. П. Контактная усталость колес и рельсов / Д. П. Марков // *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта.* – 2001. – № 6. – С. 8–14.

131 Синадский, Н. А. Остаточное напряженное состояние сварных объемно- закаленных рельсов / Н. А. Синадский // *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта.* – 1970. – № 8. – С. 38–41.

132 Громов, В. Е. Эволюция структуры и свойств поверхностного слоя рельсов при длительной эксплуатации / В. Е. Громов, О. А. Перегудов, Ю. Ф. Иванов, К. В. Морозов, К. В. Алсараева // *Вопросы материаловедения.* – 2015. – № 3. – С. 30–38.

133 Громов, В. Е. Изменение структуры и свойств поверхностных слоев головки рельсов после длительной эксплуатации / В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, К. В. Морозов, О. А. Перегудов, К. В. Алсараева, Н. А. Попова, Е. Л. Никоненко // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения.* – 2015. – № 2. – С. 203–208.

134 Громов, В. Е. Механизмы упрочнения рельсов при длительной эксплуатации / В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, К. В. Морозов, О. А. Перегудов, Н. А. Попова, Е. Л. Никоненко // *Проблемы черной металлургии и материаловедения.* – 2015. – № 4. – С. 98–104.

135 Юрьев, А. А. Эволюция структуры и свойств дифференцированно - закаленных рельсов в процессе длительной эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.07 / Юрьев Антон Алексеевич; Новокузнецкий государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2018. – 152 с

136 Sunnygarg, J. R. Effect of heavy cars on rail. A.R.E.A. /J.R. Sunnygarg// *Bulletin.* –1997.– № 663. – P. 611–635.

137 Koffman, J.L. Some problems of railway operation at high axle loads / J.L.

Koffman, D.M. Fairweather // (1975). Rail Engineering International. – 1975. № June/July. – P. 156–161.

138 Коссов, В.С. Взаимодействие подвижного состава и пути в зонах понижения сварных стыков / В.С. Коссов, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 8. – С. 19–25.

139 Коссов, В. С. Влияние смятия в зоне сварных стыков на силовое воздействие подвижного состава на путь / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2020. – № 1. – С. 35–43.

140 Kossov, V. S. Dynamics of Rolling Stock Wheels and Track Interaction in Areas of Welded Rail Joints Crush / V. S. Kossov, O. G. Krasnov, N. M. Nikonova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 459. – 022049

141 Краснов, О. Г. Динамические силы и процессы в рельсах при ударном взаимодействии колес с дефектами / О. Г. Краснов, О. К. Богданов, М. Г. Акашев // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – № 6. – С. 354–364.

142 Краснов, О. Г. Описание взаимодействия колес с дефектами на поверхности катания и рельсов / О. Г. Краснов // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, экономике, практике. – 2018. – № 3. – С. 65–66.

143 Краснов, О. Г. Вибрационные процессы в балластном слое при нестационарных режимах нагружения / О. Г. Краснов, О. К. Богданов // Мир транспорта. – 2016. – № 6. – С. 66–77.

144 Краснов, О. Г. Исследование вертикальных сил взаимодействия дефектных колес с рельсами / О. Г. Краснов, В. Н. Сенча // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2012. – № 2. – С. 42–45.

145 Краснов, О. Г. Дополнительные затраты на тягу поездов из-за наличия дефектов на поверхности катания колес / О. Г. Краснов // Proceedings of articles the International scientific conference “Science and Life” (Karlovyy Vary: Moscow, 2016). – P. 7–14.

146 Краснов, О. Г. Дополнительные затраты на тягу поездов из-за наличия дефектов на поверхности катания колес / О. Г. Краснов // Вестник транспорта Поволжья. – 2017. – № 6. – С. 29–34.

147 Fernandez Rico, J. E. Rolling contact fatigue in lubricated contacts / J. E. Fernandez Rico, H. Battez, D. Garcia Cuervo // Tribology International. – 2003. – No. 36. – P. 35–40.

148 Cheng, W. Experimental investigation on rolling/sliding contact fatigue initiation with artificial defects / W. Cheng, H. S. Cheng, F. M. Keer // Tribology Transactions. – 1994. – No. 37. – P. 51–58.

149 Dang Van, K. Rolling contact in railways: modeling, simulation and damage prediction / K. Dang Van, M. H. Maitoumam // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 2003. – Vol. 26, No. 10. – P. 939–948.

150 Sraml, M. Numerical procedure for predicting the rolling contact fatigue crack initiation / M. Sraml, J. Flaker, I. Potrc // International Journal of Fatigue. – 2003. – No. 25. – P. 585–595.

151 Fletcher, D. Modelling and full-scale trials to investigate fluid pressurization of rolling contact fatigue cracks / D. Fletcher, P. Hyde, A. Kapoor // Wear. – 2008. – No. 265. – P. 1317–1324.

152 Desimone, E. L. On the application of Dang Van criterion to rolling contact fatigue / E. L. Desimone, A. Bernasconi, S. Berreta // Wear. – 2006. – No. 260. – P. 567–572.

153 Ekberg, A. A fatigue life model for general rolling-contact with application to wheel/rail damage / A. Ekberg, H. Bjarnehed, R. Lunden // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. – 1995. – № 18. – P. 1189–1199.

154 Sines, G. Failure criteria under combined stresses or strains / G. Sines, G. Ohgi // Journal of Engineering Materials and Technology. – 1981. – Vol. 103, No. 2. – P. 82–90.

155 Аксенов, В. А. Повышение эффективного шлифования рельсов в современных условиях эксплуатации железнодорожного пути на основе применения

новой схемы резания / В. А. Аксенов, А. С. Ильиных // Наука и техника транспорта. – 2011. – № 4. – С. 86–91.

156 Карпущенко, Н. И. Анализ факторов, определяющих износ рельсов в кривых малого радиуса / Н. И. Карпущенко, И. А. Котова / Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути: сборник докладов научно-практической конференции. – Москва, 2003. – С. 101–105.

157 Лисицын, А. И. Анализ факторов, влияющих на работу рельсов в различных условиях эксплуатации / А. И. Лисицын, А. Ю. Абдурашитов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Новокузнецк, 26–27 сентября 2019 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2020. – С. 45–75.

158 Карпущенко, Н. И. Износ и сроки службы рельсов и колес подвижного состава / Н. И. Карпущенко, И. А. Котова // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – 2003. – № 2. – С. 41–46.

159 Коссов, В. С. Экспериментально-теоретический метод определения износостойкости рельсов разных категорий качества / В. С. Коссов, А. А. Лунин, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 7. – С. 51–57.

160 Универсальный механизм – программный комплекс для моделирования динамики механических систем. Загрузки. Универсальный механизм 9. Руководство пользователя. – URL: <http://www.universalmechanism.com/pages/index.php?id=3> (дата обращения: 23.07.2021).

161 Универсальный механизм. Моделирование динамики железнодорожных экипажей. Руководство пользователя / Лаборатория вычислительной механики БГТУ. – URL: <http://www.umlab.ru> (дата обращения 06.03.2021).

162 Универсальный механизм. Прогнозирование износа профилей колес и рельсов / Лаборатория вычислительной механики БГТУ. – URL:

<http://www.umlabor.ru> (дата обращения 06.03.2021).

163 Specht, W. New particulars of wear of heavy railway carriage wheels / W. Specht // *Glaser's Annalen*. – 1987. – № 9. – P. 271–280.

164 Archard, J. F. Contact and rubbing of flat surface / J. F. Archard // *Journal of Applied Physics*. – 1953. – Vol. 2, No. 8. – P. 981–988.

165 Jendel, T. Prediction of wheel profile wear – comparisons with field measurements / T. Jendel // *Wear*. – 2002. – No. 253. – P. 89–99.

166 Krause, H. Wear of wheel-rail surfaces / Krause H., Poll G. // *Wear*. – 1986. – Vol. 113. – P. 103–122.

167 Коган, А. Я. Оценка интенсивности бокового и вертикального износов рельсов под проходящими поездами / А. Я. Коган // *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. – 2017. – Т. 76, № 3. – С. 138–145.

168 Экспериментальные исследования по определению среднесетевых профилей поверхности катания колес грузовых вагонов и локомотивов: отчет о НИР: И-17-11 / О.Г. Краснов, Н.Н. Астанин, В.Н. Кашанов; ОАО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (ОАО «ВНИКТИ»). – Коломна, 2011. – 103 с.

169 Воробьев, И. Ю. Как служат рельсы на Восточно-Сибирской дороге / И. Ю. Воробьев // *Путь и путевое хозяйство*. – 2018. – № 4. – С. 31–37.

170 Соколов, О. М. Мониторинг за эксплуатационной работой и износостойкостью рельсов сетевыми путеобследовательскими станциями / О. М. Соколов // *Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых креплений: сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Новокузнецк, 26–27 сентября 2019 г.)*. – Екатеринбург: УИМ, 2020. – С. 219–226.

171 Краснов, О. Г. Воздействие на путь разных типов подвижного состава в условиях горно-перевального участка / О. Г. Краснов, М. Г. Акашев, В. Ю. Колтунов // *Сборник трудов I международной научно-практической конфе-*

ренции «Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт». – М.: ВНИИЖТ, 2021. – С. 110–115.

172 Результаты испытаний по воздействию на путь поездов массой 6300 и 7100 т на Восточно-Сибирской ж. д.: отчет о НИР: И-04-15 / В.В. Березин, А. А. Лунин, А. В. Спиров; ОАО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (ОАО «ВНИКТИ»). – Коломна, 2015. – 96 с.

173 Карпущенко, Н. И. Математическая модель оценки интенсивности бокового износа рельсов / Н. И. Карпущенко // Путь и путевое хозяйство. – 1996. – № 11. – С. 14–17

174 Коган, А. Я. Оценка потери материала рельсов и бандажей колесных пар при движении подвижного состава в кривых участках пути / А. Я. Коган // Повышение надежности и эффективности работы железнодорожного пути в условиях роста осевых нагрузок подвижного состава. – Новосибирск, 1989. – С. 15–20.

175 Андриевский, С. М. Боковой износ рельсов на кривых / С. М. Андриевский // Труды ВНИИЖТ. – Вып. 207. – Москва, 1961. – 128 с.

176 О введении карты лубрикации рельсов главных путей: распоряжение ОАО РЖД от 21.12.2011.

177 Марков, Д. П. Испытания рельсовых смазочных материалов на экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ» / Д. П. Марков // Промышленный транспорт XXI века. – 2012. – № 1. – С. 49–52.

178 Методика определения возвышения наружного рельса в кривых участках пути. Приложение к указанию МПС России от 17.03.1997. № С333у

179 Результаты экспериментальных исследований интенсивности износа рельсов на БМО Московской ДИ: отчет о НИР: И-20-21 / О. Г. Краснов, Г. С. Ноздрачев, О. К. Богданов; АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»). – Коломна, 2021. – 112 с.

180 Краснов, О. Г. Влияние непогашенного ускорения на интенсивность

износа рельсов / О. Г. Краснов, М. Г. Акашев, Н. М. Никонова // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, экономике, практике. – 2021. – № 4. – С. 68–69.

181 ..Лысюк, В. С. Уменьшение бокового износа рельсов и гребней колес / В. С. Лысюк, А. В. Лукьянов, В.Н. Цюренко, М.Ф. Вериги, В.Н. Данилов // Управление надежностью железнодорожного пути: сборник научных трудов. – Москва: Транспорт, 1991. – С. 58–69.

182 Лысюк, В. С. Оценка влияния возвышения наружного рельса в кривых на вертикальное воздействие колес / В. С. Лысюк // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2008. – № 4. – С. 4–8.

183 Лысюк, В. С. О роли в повреждении рельсов динамической разуклонки, контактных деформаций головки и проскальзывания колес / В. С. Лысюк // Динамика механических систем / ИТМ АН УССР. – Киев: Наукова думка, 1983. – С. 157–169.

184 Мугинштейн, Л. А. Основные причины повышенного износа рельсов и гребней колесных пар грузовых вагонов / Л. А. Мугинштейн, В. М. Богданов, А.В.Сухов, Ю. С. Ромен // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 7. – С. 43–51.

185 О сферах рационального применения промежуточных рельсовых скреплений и унификации вариантов комплектации ими железобетонных шпал: распоряжение ОАО «РЖД» от 28.06.2018 № 1362р.

186 Хойман, Х. Направление железнодорожных экипажей рельсовой колеи / Х. Хойман. – Москва: Трансжелдориздат, 1957. – 415 с.

187 Шевалин, В. А. Критерий бокового износа рельсов и гребней бандажей электровозов в кривых / В. А. Шевалин // Труды ЛИИЖТ. – Вып. 135. – Ленинград, 1941. – С. 57–61

188 Косенко, С. А. Оценка влияния промежуточных скреплений на интенсивность износа рельсов в кривых / С. А. Косенко, С. С. Акимов // Инновацион-

ные факторы развития транспорта. Теория и практика: материалы международной научно-практической конференции: в 3 ч. – Новосибирск, 2018. – С. 32–40.

189 Краснов, О. Г. Влияние промежуточных рельсовых скреплений на износ рельсов / О. Г. Краснов, М. Г. Акашев, Н. М. Никонова // Путь и путевое хозяйство. – 2022. – № 3. – С. 19–21.

190 Инструкция по текущему содержанию пути: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 № 2288р (взамен утратившей силу 2791р). – Москва, 2016. – 286 с.

191 Певзнер, В. О. Результаты наблюдений по оценке влияния эксплуатационных факторов на боковой износ рельсов / В. О. Певзнер, О. Ю. Белоцветова, А. В. Потапов // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – № 4. – С. 242–247.

192 Певзнер, В. О. Подуклонка рельсов и ее связь с безопасностью движения и боковым износом / В. О. Певзнер, О. Ю. Белоцветова, А. В. Потапов // Путь и путевое хозяйство. – 2018. – № 2. – С. 30–33.

193 Атапин, В. В. Обеспечение стабильности подуклонки рельсов при различных промежуточных скреплениях / В. В. Атапин, Ю. А. Кочетков, Г. И. Галлямов, Э. М. Бахтияров // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 5. – С. 15–17.

194 Зензинов, Б. Н. Анализ изменения подуклонки и наклона поверхности катания рельсов / Б. Н. Зензинов, Ю. Р. Трушина, К. В. Клементьев // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 1. – С. 15–19.

195 Шур, Е. А. О некоторых причинах повреждаемости рельсов на Экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ». Железнодорожный транспорт на современном этапе / Шур Е.А., Борц А.И., Сухов А.В., Рейхарт В.А., Абдурашитов А.Ю., Суслов О.А., Базанова Л.В. // Сборник трудов научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – Москва: ВМГ-Принт, 2014. – С. 259–267.

196 Баулин, И. С. Особенности возникновения и развития контактно-

усталостных повреждений рельсов в пути / И. С. Баулин, О. Н. Ускова // Пути повышения работоспособности рельсов и крестовин. – Москва: Транспорт, 1971. – С. 95–101.

197 Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов: инструкция: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 23.10.2014 № 2499р.

198 Гаврилов, В. М. Оценка контактно-усталостной долговечности рельсов при их взаимодействии с колесами подвижного состава: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06; 01.02.03 / Гаврилов Владимир Михайлович. – URL: <http://www.universalmechanism.com/pages/index.php?id=3> (дата обращения: 02.04.2019).

199 Александров, А. И. Применение метода конечных элементов в задача о контакте колеса и рельса / А. И. Александров, В. Ф. Грачев // Труды Днепропетровского института инженеров транспорта. – Вып. 220/28. – 1981. – С. 116–122.

200 Суворин, П. Г. Расчетная оценка остаточного ресурса железнодорожных рельсов с поперечными трещинами: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Суворин Павел Геннадьевич. – URL: <http://www.universalmechanism.com/pages/index.php?id=3> (дата обращения: 11.05.2019).

201 Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. – Москва: Высшая школа, 1980. – 368 с.

202 Краснов, О. Г. Методика определения контактно-усталостной долговечности рельсов / О. Г. Краснов // Сборник научных докладов по материалам 136-го заседания НП «Рельсовая комиссия» (Анапа, 7–9 октября 2020 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2021. – С. 129–139.

203 Коссов, В. С. К вопросу определения относительной контактно-усталостной повреждаемости поверхности катания рельсов / В. С. Коссов, А. В. Савин, О. Г. Краснов // Мир транспорта. – 2021. – Т. 19, № 1. – С. 6–17.

204 Коссов, В. С. Влияние величины осевых нагрузок на контактно-

усталостную долговечность рельсов / В. С. Коссов, Г. М. Волохов, О. Г. Краснов, М. Н. Овечников, А. Л. Протопопов, В. В. Огуенко // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – № 3. – С. 149–151.

205 Краснов, О. Г. К вопросу оценки ресурса рельсов в зоне сварных стыков. / О. Г. Краснов // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов по материалам заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Новокузнецк, 26–27 сентября 2019 г.). – Екатеринбург: УИИМ, 2020. — С. 127–134.

206 Коссов, В. С. Повышение надежности рельсов при эксплуатации в условиях низких температур / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, В. Н. Огуенко // Труды XVI международной научно-технической конференции (чтений памяти профессора Г. М. Шахунянца) «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». Секция 2. Железнодорожный путь для высокоскоростного движения и высоких осевых нагрузок. – М., 2019. – С. 82–87.

207 Шатров, Б.В. Расчеты конструкций за пределами упругости в комплексе MSC.Marc. Часть 1. Ползучесть металлов / Б. В. Шатров, Э. Ю. Князев. – URL: <http://www.mscsoftware.ru/press/n20090722> (дата обращения: 13.01.2019).

208 Шатров, Б. В. Расчеты конструкций за пределами упругости в комплексе MSC.Marc. Часть 2. Ползучесть металлов под нагрузкой. Примеры расчетов на ползучесть / Б. В. Шатров, Э. Ю. Князев. – URL: <http://www.mscsoftware.ru/press/n20090722> (дата обращения: 03.02.2019).

209 Бунин, Б. Б. Краткое руководство пользователя пакета программ MSC.Fatigue / Б. Б. Бунин. – URL: <http://www.mscsoftware.ru/manuals> (дата обращения: 11.05.2019).

210 Марков, Д. П. Контактная усталость колес и рельсов / Д. П. Марков // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2001. – № 6. – С. 8–14.

211 Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, пред-

сказания, предотвращения / пер. с англ. – Москва: Мир, 1984. – 62 с.

212 Manson, S. S. Fatigue: A complex subject – some simple approximation / S. S. Manson // *Experimental Mechanics*. – 1965. – Vol. 5. – P. 193–226.

213 Coffin, L. F. A study of the effect of cyclic thermal stresses on a ductile metals / L. F. Coffin // *Transactions of the american society of mechanical engineers*. – 1954. – Vol. 76. – P. 931–950.

214 Morrow, J. D. Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals. Internal friction, damping, and cyclic plasticity / J. D. Morrow // *A Symposium Presented at the Sixty-Seventh Annual Meeting / American Society for Testing and Materials (ASTM), STP 378*. – 1965. – P. 45–87.

215 Ramberg, W. Description of stress-strain curves by three parameters / W. Ramberg, W. R. Osgood // *NACA Technical Note*. – 1943. – No. 902. – 32 p.

216 Трощенко, В. Т. Деформационные кривые усталости сталей и методы определения их параметров. Сообщение 1. Традиционные методы / В. Т. Трощенко, Л. А. Хамаза // *Проблемы прочности*. – 2010. – № 6. – С. 26–39.

217 Трощенко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник. Ч. 1. / В. Т. Трощенко, Л. А. Сосновский. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 347 с.

218 Циклические деформации и усталость металлов: в 2 т. Т. 1 / под ред. В. Т. Трощенко. – Киев: Наукова думка, 1985. – 216 с

219 Brown, M. A theory for fatigue under multiaxial stress-strain conditions / M. Brown, K. J. Miller // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. – 1973. – Vol. 187, No. 65. – P. 745–755.

220 Shamsaei, N. Multiaxial fatigue evaluation using discriminating strain paths / N. Shamsaei, A. Fatemi, D. F. Socie // *International Journal of Fatigue*. – 2011. – Vol. 33, No. 4. – P. 597–609.

221 Smith, R. N. A stress-strain parameter for the fatigue of metals / R. N. Smith, P. Watson, T. H. Topper // *Journal of Materials Science*. – 1970. – Vol. 5, No. 4. – P. 767–778.

222 Горохов, В. А. Численное моделирование процессов упруго-вязко-пластинчатого деформирования и разрушения элементов конструкций при квазистатических термосиловых, циклических и терморadiационных воздействия: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.02.04 / Горохов Василий Андреевич. – URL: <http://diss.unn.ru/files/2018/818/diss-Gorokhov-818.pdf> (дата обращения 06.03.2020).

223 Автоматизация управления техническими процессами СПС с применением технического зрения: отчет о НИР: И-37-05 / О. Г. Краснов, Н. Н. Астанин; ОАО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (ОАО «ВНИКТИ»). – Коломна, 2005. – 75 с.

224 Краснов, О. Г. О некоторых особенностях влияния колесной пары грузового вагона / О. Г. Краснов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2012. – № 3. – С. 38–40.

225 Определение интенсивности наклепа и развития контактно-усталостных дефектов в зависимости от пропущенного тоннажа, скорости движения и осевой нагрузки для рельсов различных категорий качества. Разработка критериев оценки работоспособности рельсов различных категорий качества после установленной наработки для различных условий эксплуатации: отчет о НИР: И-16-15 / О. Г. Краснов, Г. С. Ноздрачев, О. К. Богданов; ОАО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (ОАО «ВНИКТИ»). – Коломна, 2015. – 175 с.

226 Третьяков, В. В. Воздействие на путь вагонов с повышенной осевой нагрузкой / В. В. Третьяков, И. Б. Петропавловская, В. О. Певзнер, Т. И. Громова, И. В. Третьяков, К. В. Шапетько, И. С. Смелянская, А. С. Томиленко // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – № 4. – С. 233–238.

227 Степов, В. В. Эксплуатация вагонов с повышенной осевой нагрузкой на участке Ковдор – Мурманск / В. В. Степов // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 10. – С. 19–22.

228 Коссов, В. С. Результаты экспериментальных и теоретических исследований воздействия подвижного состава на путь в перспективных условиях эксплуатации / В. С. Коссов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2013. – № 5. – С. 27–36.

229 Коссов, В. С. Оценка воздействия на путь грузовых вагонов с осевыми нагрузками 23,5, 25 тс / В. С. Коссов, А. А. Лунин, О. Г. Краснов, А. В. Спириков // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 3. – С. 63–68.

230 Грановская, Г. А. Методические подходы к экономической оценке затрат при эксплуатации вагонов с осевой нагрузкой 27 т на участках Качканар – Смычка / Г. А. Грановская, А. И. Сафонова, О.А. Суслов, Н. С. Охотников // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – № 6. – С. 347–356.

231 Мониторинг состояния инфраструктуры, оценка накопления расстройств верхнего строения пути и деформаций земляного полотна, с разработкой норм устройства, эксплуатации, технического обслуживания, диагностики инфраструктуры, технологии вождения поездов для участков обращения составов, сформированных из вагонов с осевой нагрузкой 27 тс на участке Качканар – Смычка Свердловской железной дороги: отчет о НИР, этап 27 / А.В. Макаров, А.В. Портнов, О.А. Суслов; АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»). – Москва, 2018. – 320 с.

232 Краснов, О. Г. Методика определения интегрального распределения сил, действующих на путь / О. Г. Краснов // Мир транспорта. – 2019. – № 4. – С. 6–21.

233 Коссов, В. С., Влияние влажных выплесков на динамику взаимодействия подвижного состава и пути / В.С. Коссов, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Путь и путевое хозяйство. – 2020. – № 2. – С. 29–31.

234 Коссов, В. С. Влияние сухих выплесков на динамику взаимодействия подвижного состава и пути / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – № 2. – С. 23–25.

235 Фундаментальные проблемы динамики и прочности подвижного состава / под общ. ред. А. Н. Савоськина. – Москва: Машиностроение, 1997. – 102 с.

236 Содержание балластной призмы железнодорожного пути / под ред. Е. С. Варызгина. – Москва: Транспорт, 1978. – 141 с.

237 Попов, С. Н. О допускаемых напряжениях на балласт. Взаимодействие пути и подвижного состава и вопросы расчетов пути / С. Н. Попов // Труды ВНИИЖТ. – Вып. 97. – 1955. – С. 353–385.

238 Ашпиз, Е. С. Мониторинг земляного полотна при эксплуатации железных дорог / Е. С. Ашпиз. – Москва: Путь-экспресс, 2002. – 112 с.

239 Пейч, Ю. Л. Динамический влагоперенос в грунтовом основании железнодорожного пути / Ю. Л. Пейч; под ред. проф. Ю.В. Писарева // Сборник трудов кафедры «Гидравлика и водоснабжение»; МИИТ. – Вып. 1–50. – Москва, 2002. – 80 с.

240 Патент № 2441206 Российская Федерация, МПК G01L 5/16 (2006.01), G01L 1/22 (2006.01). Устройство для измерения боковых и вертикальных сил взаимодействия колеса с рельсом: № 2010144830/28: заявл. 02.11.2010: опубл. 27.01.2012 / Краснов О. Г., Бидуля А. Л., Коссов В. С., Астанин Н. Н.; заявитель ОАО «Российские железные дороги». – 7 с.: и

241 Патент № 2513338 Российская Федерация, МПК B61K 9/08 (2006.01), E01B 35/12 (2006.01). Способ оценки состояния рельсового пути: № 2012156356/11: заявл. 25.12.2012: опубл. 20.04.2014 / Бидуля А. Л., Краснов О. Г., Никитина Н. Н.; заявитель ОАО «Российские железные дороги». – 8 с.: ил.

242 Патент № 2566654 Российская Федерация, МПК G01L 5/16 (2006.01). Устройство измерения и регистрации сил взаимодействия между колесом и рельсом: № 2014103289/28: заявл. 31.01.2014: опубл. 27.10.2015 / Бидуля А. Л., Краснов О. Г., Фролова О. Л.; заявитель ОАО «Российские железные дороги». – 10 с.: ил.

243 Краснов, О. Г. Создание тензометрической колесной пары для непрерывной регистрации вертикальных и боковых сил в зоне контакта колеса с рель-

сом / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, Н. К. Закаблукова, М. Г. Акашев // Сборник тезисов XIV всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017 г.). – С. 251–254.

244 Краснов, О. Г. Тензометрическая колесная пара для подвижного состава с осевой нагрузкой до 30 тс / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, экономике, практике. – 2017. – № 4. – С. 68–69.

245 Краснов, О. Г. Методика непрерывного оценивания вертикальных и боковых сил в зоне контакта колеса с рельсом / Краснов О. Г. // Сборник тезисов XIV всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017 г.). – С. 259–262.

246 Краснов, О. Г. Прогнозирование сил в контакте колеса с рельсом с использованием нейронных сетей / О. Г. Краснов, Н. Н. Астанин // Вестник научно-исследовательского и конструкторско-технологического института подвижного состава. – 2010. – Вып. 92. – С. 126–136.

247 Краснов, О. Г. Результаты эксплуатационных испытаний геометрически-силового метода оценки состояния пути / В. С. Коссов, А. Л. Бидуля, О. Г. Краснов, М. Г. Акашев // Труды XIII международной конференции «Проблемы механики железнодорожного транспорта» (Днепропетровск, 2012 г.). – С. 67–68.

248 Краснов, О. Г. Прогнозирование сил взаимодействия колес грузовых порожних вагонов и пути / О. Г. Краснов, Н. Н. Астанин // Труды XIII международной конференции «Проблемы механики железнодорожного транспорта» (Днепропетровск, 2012 г.). – С. 71–72.

249 Краснов, О. Г. Оценка состояния пути геометрически-силовым методом на искусственных неровностях / О. Г. Краснов, М. Г. Акашев, В. М. Сасковец // Путь и путевое хозяйство. – 2012. – № 7. – С. 24–29.

250 Краснов, О. Г. Результаты оценки состояния пути диагностическим поездом геометрически-силовым методом / О. Г. Краснов, М. Г. Акашев,

А. В. Ефименко, Т. Ю. Некрасова // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 9.

251 Краснов, О. Г. Исследование напряженного состояния земляного полотна от воздействия грузовых вагонов с осевыми нагрузками до 30 тс / В. С. Коссов, О. Г. Краснов, А. Л. Протопопов // Мир транспорта. – 2018. – № 7. – С. 70–91.

252 Гузыкова, С. В. Метод экспертных оценок. Теория и практика / С. В. Гузыкова // Институт психологии РАН. – Москва, 2011. – 315 с.

253 Богданов, О. К. Анализ статистики ОДР с дефектами 21 / О. К. Богданов, Г. С. Ноздрачев // Путь и путевое хозяйство. – 2017. – № 2. – С. 26–33.

254 Тушинский, Л. И. Структура перлита и конструктивная прочность стали / Л. И. Тушинский, А. А. Батаев, Л. Б. Тихомирова. – Новосибирск: Наука, 1993. – 280 с.

255 Полевой, Е. В. Сравнительный анализ микроструктуры и свойств дифференцированно и объемно термоупрочненных рельсов / Е. В. Полевой, А. Б. Добужская, М. В. Темлянцев // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2016. – № 2. – С. 18–22.

256 Борц, А.И. Исследования инновационной рельсовой продукции и перспективы ее дальнейшего развития в условиях концепции импортозамещения / А. И. Борц // РСРП ЭКСПЕРТ. – 2015. – № 12. – С. 20–22; 2016. – № 1. – С. 16–19.

257 Полевой, Е. В. О совершенствовании оценки качественных характеристик рельсовой продукции / Е. В. Полевой, Г. Н. Юнин // Сборник научных докладов по материалам 135-го заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Новокузнецк, 26–27 сентября 2019 г.). – Екатеринбург: УИМ, 2020. – С. 26–36.

258 Морозов, К. В. Формирование тонкой структуры рельсов при объемной и дифференцированной закалке: дис... канд. техн. наук: 01.04.07 / Морозов Константин Викторович // ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет». – Новокузнецк, 2015. – 180 с.

259 Полевой, Е. В. Сравнительный анализ микроструктуры и свойств дифференцированно и объемно термоупрочненных рельсов / Е. В. Полевой, А. Б. Добужская, М. В. Темлянец // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2016. – № 2. – С. 18–22.

260 Морозов, К. В. Природа упрочнения зеренной структуры рельсов, подвергнутых объемной закалке / К. В. Морозов, В. Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, А. Б. Юрьев, В. А. Батаев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2014. – № 3. – С. 312–316.

261 Морозов, К. В. Анализ структурно-фазовых состояний в рельсах, подвергнутых объемной и дифференцированной закалке / К. В. Морозов, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов, А. М. Глезер, В. А. Батаев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – № 4. – С. 22–26.

262 Громов, В. Е. Микроструктура закаленных рельсов / В. Е. Громов, А. Б. Юрьев, К. В. Морозов, Ю.Ф. Иванов. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2014. – 216 с.

263 Гриднев, В. И. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали / В. И. Гриднев, В. Р. Гаврилюк, Ю. Я. Мешков. – Киев: Наукова думка, 1974. – 237 с.

264 Штайгер, М. Г. Особенности структурообразования металла рельсового стыка в условиях термомеханического воздействия в процессе сварки: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09 / Штайгер Максим Григорьевич; ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет». – Иркутск, 2021. – 242 с.

265 Борц, А. И. Исследования инновационной рельсовой продукции и перспективы ее дальнейшего развития / А. И. Борц // Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сборник научных докладов о материалах 130 заседания некоммерческого партнерства «Рельсовая комиссия» (Новокузнецк, 7–9 октября 2014 г.). – Санкт-Петербург, 2015. – С. 107–120.

266 Сравнительные испытания рельсов отечественного производства раз-

личных категорий: отчет о НИР: И-24-18 / Г. М. Волохов, О. Г. Краснов, Г. С. Ноздрачев, О. К. Богданов; АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»). – Коломна, 2018. – 175 с.

267 Поезд рельсофрезерный РФП-1: техническое задание: утверждено ОАО «РЖД» 22.09.2008.

268 Работы с применением рельсофрезерного поезда РФП-1: опытный технологический процесс: утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 07.06.2011 № 417у-11.

269 Инструкция по шлифовке и фрезерованию рельсов в пути и стационарных условиях: утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 29.12.2014 № 3185р в редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 03.06.2019 № 1088/р. – 72 с.

270 Координатно-измерительная машина FARO Edge. – URL: https://3d.globatek.ru/3d-scanners/faro_edge/ (дата обращения 16.09.2018).

271 Краснов, О. Г. Исследование геометрических параметров режущего инструмента рельсофрезерного поезда / О. Г. Краснов, А. В. Недбайло // Мир транспорта. – 2020. – № 4. – С. 67–71.

272 Препарата, Ф. Вычислительная геометрия / Ф. Препарата, М. Шеймос. – Москва: Мир, 1989. – 478 с.

273 Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применение / А.В. Скворцов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 128 с.

274 Анализ полученных результатов приемочных испытаний РФП-1: отчет о НИР: И-35-14 / О. Г. Краснов, Г. С. Ноздрачев, О. К. Богданов; ОАО «ВНИКТИ». – Коломна, 2014. – 66 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Акты о закладке отытных участков в кривых участках пути Слюдянской ди-
станции пути Восточно- Сибирской ДИ

СОГЛАСОВАНО:

Главный инженер
Слюдянской дистанции пути (ПЧ-9)
Восточно-Сибирской ДИ



П. А. Ляхов
_____ 2021 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер
Управления пути и сооружений
Центральной дирекции
инфраструктуры –
филиала ОАО «РЖД»



Д. Н. Бурков
_____ 2021 г.

А К Т

о закладке опытных кривых
на участках Ангасолка – Слюдянка II, Глубокая-Андриановская Восточно-
Сибирской ж. д. на I главном пути

11...17 мая 2021 г.

ПЧ-9 Восточно-Сибирской ДИ
ст. Слюдянка I

В рамках выполнения работы Плана НТР ОАО РЖД «Разработка методики прогнозирования износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации» (шифр 11.267) гг. в соответствии с телеграммой ОАО РЖД подписанной заместителем начальника ЦДИ С.В.Максимцевым-от 26.04.2021г. №исх-18488/ЦДИ специалистами Слюдянской дистанции пути и АО ВНИКТИ выбраны опытные кривые участки пути.

Опытные участки заложены в кривых для определения силового воздействия на рельсы от колёс подвижного состава и проведения мониторинга износа рельсов. Основным отличительным параметром опытных участков являлся радиус кривой и уклон пути.

На I-м главном пути выбраны четыре кривые, различающиеся радиусом и продольным профилем пути, по срокам проведения капитального ремонта пути и пропущенному тоннажу на участках Ангасолка – Слюдянка

II, класс и категория пути – I/O/21, с грузонапряжённостью – 65,6 млн т брутто в год.

Суточный пакет поездов на этих участках – 79 грузовых, 6 пассажирских, 2 мотор-вагонных. Средняя осевая нагрузка – 7,36 т, от груженых вагонов -16,26 т, от порожних вагонов 6,57 т, от локомотивов - 23т.

Установленная скорость движения по участку – 70/60 км/ч.

Средняя техническая скорость движения по участку – грузовых поездов-36 км/ч, пассажирских – 45 км/ч

Путь – бесстыковой из рельсов типа Р 65 первой группы, сваренных в плети.

Шпалы – железобетонные I срока службы, установлены с эпюрой – 2000 шт. на 1 км пути.

Балласт – щебёночный фракций 25–60 мм, толщина балластной призмы 35–50 см, плечо призмы – 40–50 см.

Характеристика контрольных участков, выбранных на I-м главном пути.

Участок 1.1 заложен в левой кривой – с 5253,978 по 5254,356 км перегона Глубокая – Подкаменная, радиусом – R300 м (фактически – 305 м), протяжённостью – 468 м (круговая кривая – 288 м), возвышение наружного рельса – 110 мм (фактически – 110 мм).

Продольный профиль пути – подъём с уклоном 13,3–17,6‰.

Пропущенная поездная нагрузка на момент осмотра составила $552,8 + 27,3 = 580,1$ млн т брутто.

Рельсы – объемно-закаленные, категории T1, производства – АО «ЕВРАЗ ЗСМК», маркировка К I 11, К VI 14.

Промежуточные рельсовые скрепления – ЖБР-65.

Участок 1.2 заложен с 5271,0246 км по 5272,0048 км перегона Глубокая – Андриановская, радиусом – R600 м (фактически – 595 м),

протяжённостью – 804 м (круговая кривая – 674 м), возвышение наружного рельса – 45 мм (фактически – 30 мм).

Продольный профиль пути – подъем с уклоном 13,1 - 16,3‰.

Рельсы – объемно-закаленные, категории Т1, производства – АО «ЕВРАЗ ЗСМК», маркировка К VIII 11.

Пропущенная поездная нагрузка на момент осмотра составила $552 + 27,3 = 588,25$ млн т брутто

Промежуточные рельсовые скрепления – ЖБР-65.

Участок 1.3 Заложен опытный участок с 5300,0665 км по 5301,0189 км в кривой радиусом R302 м, протяжённостью – 524 м, возвышение наружного рельса - 100мм Продольный профиль пути – подъем с уклоном 15,1-17,4‰.

Средний ремонт выполнен 10/2019 г.

Рельсы – ДТ350, производства – АО «ЕВРАЗ ЗСМК», маркировка – К VIII 19.

Пропущенная поездная нагрузка на момент осмотра составила $97,4 + 27,3 = 124,7$ млн т брутто.

Промежуточные рельсовые скрепления – ЖБР-65.

Участок 1.4 заложен с 5301,0508 км по 5301,0874 км в кривой радиусом R559 м, протяжённостью – 336 м, возвышение наружного рельса-60мм, фактическое - 57 мм.

Продольный профиль пути – подъем с уклоном 15,4 - 18‰.

Пропущенная поездная нагрузка на момент осмотра составила $611,1 + 27,3 = 638,4$ млн т брутто.

Рельсы – ВС Я 250, производства NIPPON STEEL Япония, маркировка – Я 10.

Промежуточные рельсовые скрепления – ЖБР-65.

На опытных участках будут определяться:

- за период проведения измерений – боковые, вертикальные силы от колес эксплуатирующего подвижного состава на рельсы;

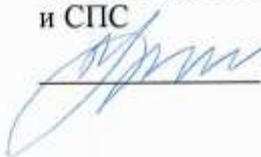
- боковые отжатия головки наружного и внутреннего рельсов;
- поперечные сечения головки рельсов.

- за период наблюдений – интенсивность возникновения дефектов на рельсах, интенсивность бокового и вертикального износа, эволюция профилей рельсов в зависимости от пропущенной поездной нагрузки.

Ленты последних проходов вагона-путеизмерителя, ведомости дефектных рельсов и таблицы 5 по данным участкам получены.

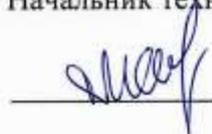
От АО «ВНИКТИ»

Заведующий отделом пути
и СПС


О. Г. Краснов

От ПЧ-9

Начальник технического отдела


В. А. Малыгин

СОГЛАСОВАНО:

Главный инженер
Слюдянской дистанции пути (ПЧ-9)
Восточно-Сибирской ДИ
_____ П. А. Ляхов
_____ 2021 г.



УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер
Управления пути и сооружений
Центральной дирекции
инфраструктуры –
филиала ОАО «РЖД»
_____ Д. Н. Бурков
_____ 2021 г.



А К Т

о закладке опытных кривых
на участках Ангасолка – Слюдянка II, Глубокая - Андриановская Восточно-
Сибирской ж. д. на II главном пути

11...28 мая 2021 г.

ПЧ-9 Восточно-Сибирской ДИ
ст. Слюдянка I

В рамках выполнения работы Плана НТР ОАО РЖД «Разработка методики прогнозирования износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации» (шифр 11.267) гг. в соответствии с телеграммой ОАО РЖД подписанной заместителем начальника ЦДИ С.В.Максимцевым-от 26.04.2021г. №исх-18488/ЦДИ специалистами Слюдянской дистанции пути и АО ВНИКТИ выбраны опытные кривые участки пути.

Опытные участки заложены в кривых для определения силового воздействия на рельсы от колёс подвижного состава и проведения мониторинга износа рельсов. Основным отличительным параметром опытных участков являлся радиус кривой и уклон пути.

На II-м главном пути выбраны четыре кривые, различающихся радиусом и продольным профилем пути, по срокам проведения капитального ремонта пути и пропущенному тоннажу на участках Ангасолка – Слюдянка II, Глубокая –Андриановская. Класс и категория пути на 01.01.2021:

- от 5225 до 5313 км – 10/20, с грузонапряжённостью – 169,6 млн т брутто/1 км в год.

Суточный пакет поездов на этих участках: грузовых – 85, пассажирских – 6, мотор-вагонных – 2.

Установленная скорость движения по участку – 70/60 км/ч.

Средняя техническая скорость движения по участку: грузовых поездов – 43 км/ч, пассажирских – 46 км/ч.

Средняя осевая нагрузка – 17,89 т, от гружённых грузовых вагонов – 22,4 т, от порожних грузовых вагонов – 6,11 т, от пассажирских – 19,07 т, от локомотивов – 23,00 т.

Путь – бесстыковой из рельсов типа Р 65 первой группы, сваренных в плети.

Шпалы – железобетонные 1 срока службы, установлены с эпюрой – от 1988 до 2000 шт. на 1 км пути.

Балласт – щебёночный фракций 25–60 мм, толщина балластной призмы 35–50 см, плечо призмы – 40–50 см, замазученность – менее 30 % в кривых R300 м и около 30 % – в кривых R600 м.

Участок 2.1 заложен с 5253,0972 км по 5254,0359 км в кривой радиусом R302 м, протяжённостью – 377 м. Возвышение наружного рельса 105 мм. Продольный профиль пути – подъем с уклоном 11,7 - 18,5 ‰.

Пропущенная поездная нагрузка на момент осмотра составила $261,3 + 70,6 = 331,9$ млн т брутто.

Рельсы – категории – ДТ 370 ИК, производства – АО «ЕВРАЗ ЗСМК», маркировка – К X 20, рельсы – категории – ДТ 350, производства – АО «ЕВРАЗ ЗСМК», маркировка – К VII 20.

Промежуточные рельсовые скрепления – ЖБР-65ПШМ.

Участок 2.2 заложен с 5271,0260 км по 5272,0053 км перегона Глубокая – Андриановская, радиусом – R605 м (фактически – 605 м), протяжённостью – 793 м (круговая кривая – 673 м), возвышение наружного рельса – 35 мм (фактически – 34 мм).

Продольный профиль пути – подъём с уклоном 15,5–17,6 ‰ (средневзвешенный уклон – 16,5 ‰).

Рельсы – ДТ350, производства – АО «ЕВРАЗ ЗСМК», маркировка – К VI 16, К X 20.

Пропущенная поездная нагрузка на момент осмотра составила 784,9 + 70,6 = 855,5 млн т брутто

Промежут очные рельсовые скрепления – ЖБР-65ПШМ.

Участок 2.3 Заложено опытный участок с 5300,0683 км по 5301,0189 км в кривой радиусом R298 м, протяжённостью – 506 м, возвышение наружного рельса- 105мм Продольный профиль пути – спуск с уклоном 15,3-17,3‰.

Капитальный ремонт выполнен 10/2020 г.

Рельсы – ДТ370 ИК, производства – АО «ЕВРАЗ ЗСМК», маркировка – К XII 19, Рельсы – ДТ 350, производства – АО «ЕВРАЗ ЗСМК», маркировка К I 21.

Пропущенная поездная нагрузка на момент осмотра составила 90,42 + 70,6 = 161 млн т брутто.

Промежуточные рельсовые скрепления – ЖБР-65ПШМ.

Участок 2.4 заложен с 5301,0512 км по 5301,0845 км в кривой радиусом R565 м, протяжённостью – 333 м, возвышение наружного рельса- 35мм.

Продольный профиль пути – спуск с уклоном 15,3-17,7‰.

Пропущенная поездная нагрузка на момент осмотра составила 891,7 + 962,3 = млн т брутто.

Рельсы – ДТ370 ИК, производства – АО «ЕВРАЗ ЗСМК», маркировка – К V 20.

Промежуточные рельсовые скрепления – ЖБР-65ПШМ.

На опытных участках будут определяться:

- боковые отжатия головки наружного и внутреннего рельсов;
- поперечные сечения головки рельсов.

- за период наблюдений – интенсивность возникновения дефектов на рельсах, интенсивность бокового и вертикального износа, эволюция профилей рельсов в зависимости от пропущенной поездной нагрузки.

Ленты последних проходов вагона-путеизмерителя, ведомости дефектных рельсов и таблицы 5 по данным участкам получены.

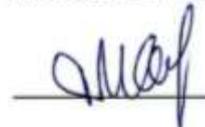
От АО «ВНИКТИ»

Заведующий отделом пути
и СПС


О. Г. Краснов

От ПЧ-9

Начальник технического отдела


В. А. Малыгин

СОГЛАСОВАНО:

Начальник
Голутвинской дистанции пути (ПЧ-7)
Московской ДИ


« ___ » _____ 2021 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер
Управления пути и
сооружений Центральной
дирекции инфраструктуры –
филиала ОАО «РЖД»


« ___ » _____ 2021 г.

АКТ

о закладке опытных участков пути
на Большом окружном кольце Московской железной дороги

22 марта 2021 г.

ПЧ-7 Московской ДИ
ст. Голутвин

В рамках выполнения работы «Разработка методики прогнозирования износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации» специалистами АО «ВНИКТИ» в период 2020–2021 гг. на Большом окружном кольце на перегоне Яганово – Воскресенск на первом и втором пути и на ветке Воскресенского узла были заложены под наблюдение 18 опытных участков в кривых различного радиуса для проведения мониторинга состояния рельсов при различных условиях эксплуатации.

1 Кривая R 395 м, путь ветка 2в Воскресенского узла, 1 км ПК7/8, первый путь. Наружный рельс с маркировкой – Ч X 19, внутренний рельс с маркировкой – Ч III 17. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 179,8 млн ткм брутто/км в год.

2 Кривая R 400 м, путь ветка 2в Воскресенского узла, 2 км ПК6/7, первый путь. Наружный рельс с маркировкой – Ч X 19, внутренний рельс с маркировкой – Ч III 17. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 179,8 млн ткм брутто/км в год.

3 Кривая R 597 м, перегон Яганово-Воскресенск, 45/46 км, первый путь. Наружный и внутренний рельсы с маркировкой – К VIII 16. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 141,2 млн ткм брутто/км в год.

4 Кривая R 598 м, перегон Яганово-Воскресенск, 45/46 км, второй путь. Наружный рельс с маркировкой – К IV 15, внутренний рельс с маркировкой – К III 15. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 59,8 млн ткм брутто/км в год.

5 Кривая R 588 м, перегон Яганово-Воскресенск, 46 км ПК6/ 7, первый путь. Наружный рельс с маркировкой – К IX 18, внутренний рельс с маркировкой – К VIII 16 Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 141,2 млн ткм брутто/км в год.

6 Кривая R 580 м, перегон Яганово – Воскресенск, 46 км ПК6/7, второй путь. Наружный рельс – К IV 15, внутренний рельс с маркировкой – Ч II 18. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 59,8 млн ткм брутто/км в год.

7 Кривая R 600 м, перегон Яганово – Воскресенск, 48 км ПК5+40 м, первый путь. Наружный рельс с маркировкой – К XII 18, внутренний рельс с маркировкой – Ч VIII 16. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 141,1 млн ткм брутто/км в год.

8 Кривая R 630 м, перегон Яганово – Воскресенск, 48 км ПК5+40 м, второй путь. Наружный рельс и внутренний рельс с маркировкой – К IV 15. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 59,8 млн ткм брутто/км в год.

9 Кривая R 1016 м, перегон Яганово – Воскресенск, 49 км ПК5+50 м, первый путь. Наружный и внутренний рельсы с маркировкой – Ч VIII 16. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 141,2 млн ткм брутто/км в год.

10 Кривая R 1021 м, перегон Яганово – Воскресенск, 49 км ПК5+50 м, второй путь. Наружный рельс с маркировкой – К II 15, внутренний рельс с маркировкой – К IV 15. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 59,8 млн ткм брутто/км в год.

11 Кривая R 585 м, перегон Яганово – Воскресенск, 50 км ПК2+15 м, первый путь. Наружный рельс с маркировкой – К XII 18, внутренний рельс с маркировкой – К II 20. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 141,1 млн ткм брутто/км в год.

12 Кривая R 593 м, перегон Яганово – Воскресенск, 50 км ПК2+15 м, второй путь. Наружный рельс с маркировкой – К III 15, внутренний рельс с маркировкой – К II 15. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 59,8 млн ткм брутто/км в год.

13 Кривая R 392 м, перегон Яганово – Воскресенск, 62 км ПК6/7, первый путь. Наружный и внутренний рельсы с маркировкой – Ч II 20. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 127,3 млн ткм брутто/км в год.

14 Кривая R 493 м, перегон Яганово – Воскресенск, 63 км ПК3/4, первый путь. Наружный и внутренний рельсы с маркировкой – Ч II 20. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 127,3 млн ткм брутто/км в год.

15 Кривая R 585 м, перегон Яганово – Воскресенск, 64 км ПК1, первый путь. Наружный и внутренний рельсы с маркировкой – Ч II 20. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 127,3 млн ткм брутто/км в год.

16 Кривая R 410 м, перегон Яганово – Воскресенск, 62 км ПК6/7, второй путь. Наружный рельс с маркировкой – Ч VI 17 и внутренний рельсы с маркировкой – К XII 18. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 53,8 млн ткм брутто/км в год.

17 Кривая R 500 м, перегон Яганово – Воскресенск, 63 км ПК3/4, второй путь. Наружный рельс с маркировкой – Т IX 03 и внутренний рельс с маркировкой – Ч VI 17. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 53,8 млн ткм брутто/км в год.

18 Кривая R 550 м, перегон Яганово – Воскресенск, 64 км ПК1, второй путь. Наружный рельс с маркировкой – К XII 18, внутренний рельс с маркировкой – Ч VII 17. Грузонапряжённость на 01.01.2020 – 53,8 млн ткм брутто/км в год.

Более подробные характеристики опытных участков представлены в таблице 1.

На опытных участках за период наблюдений будет определяться интенсивность возникновения дефектов на рельсах, интенсивность бокового и вертикального износа, эволюция профилей рельсов в зависимости от пропущенной поездной нагрузки.

Ленты последних проходов вагона-путеизмерителя, перечень дефектных рельсов и таблицы формы ПУ-5 по данным участкам получены.

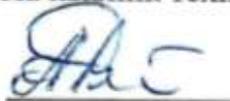
От АО «ВНИКТИ»:

Заведующий лабораторией
испытаний

 Г. С. Ноздрачев

От ПЧ-7:

Начальник технического отдела

 А. В. Русанова

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Протокол испытаний по определению боковых и вертикальных сил от эксплуатируемого подвижного состава в кривых участках пути Слюдянской дистанции пути Восточно- Сибирской ДИ

УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер
Слюдянской дистанции пути (ПЧ-9)
Восточно-Сибирской ДИ
П.А. Ляхов
2021 г.



Протокол

испытаний по определению боковых и вертикальных сил от эксплуатируемого подвижного состава в кривых R300 м, R600 м на подъемах и спусках с уклонами более 16%

17-28 мая 2021 г.

ПЧ-9 Восточно-Сибирской ДИ
ст. Слюдянка I

В рамках выполнения работы Плана НТР ОАО РЖД «Разработка методики прогнозирования износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации» (шифр 11.267) в соответствии с телеграммой ОАО «РЖД» подписанной заместителем начальника ЦДИ С.В. Максимцевым от 26.04.2021г. №ИСХ – 18488/ЦДИ специалистами АО «ВНИКТИ» и Слюдянской дистанции пути проведены испытания по определению силового воздействия подвижного состава на рельсы в соответствии с программой-методикой 30.П.496.П, утвержденной главным инженером ЦДИ.

Цель испытаний – установить уровни силового воздействия от колес эксплуатируемого на Восточно-Сибирской ДИ подвижного состава, в том числе от новых грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками, на участках пути со сложным продольным и поперечным профилями в условиях максимальной тяги с использованием локомотивов – толкачей (электровозов ЗЭС5К) и торможения поездов.

Испытания проводились на горно-перевальном участке Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры. Опытные участки заложены в кривых для определения силового воздействия на рельсы от колёс подвижного состава и проведения мониторинга износа рельсов. Основным отличительным параметром опытных участков являлся радиус кривой и уклон пути. На опытных участках пути, выбранных в соответствии с Актами №1 и №2, проводилось оборудование наружного и внутреннего рельсов измерительными датчиками и приборами.

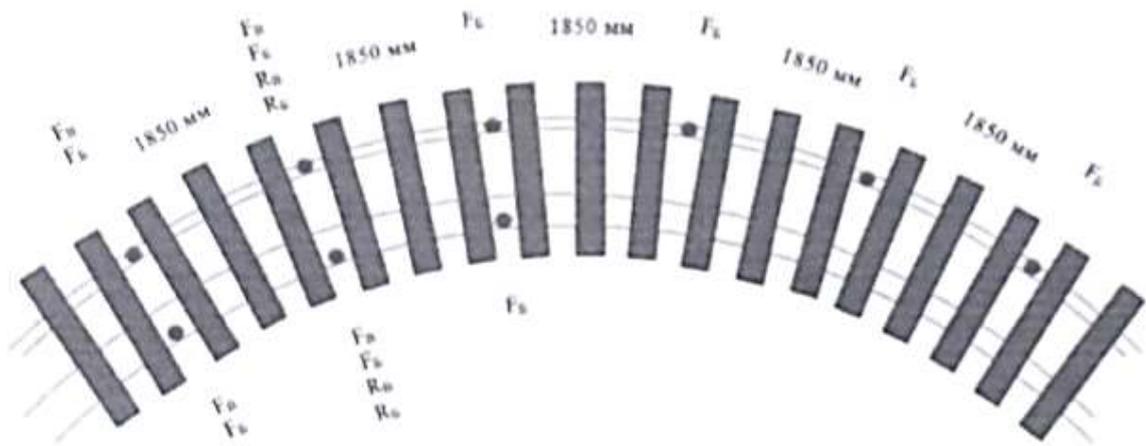


Рисунок 1 – Схема оборудования пути: $F_{\text{в}}$ – вертикальные силы; $F_{\text{б}}$ – боковые силы; $R_{\text{в}}$ – вертикальный прогиб рельса; $R_{\text{б}}$ – боковое отжатие головки рельса.

Для измерения боковых и вертикальных сил, в соответствии со схемой оборудования пути (рис.1), на шейку рельса наклеивались по методу Шлюмпфа тензорезисторы, в соответствии с ГОСТ Р 55050-2012 (рис.2).

Для измерения боковых отжатий головок наружного и внутреннего рельсов, а также для определения вертикального прогиба наружного и внутреннего рельсов использовались балочные прогибомеры. На рисунке 3 представлен общий вид установки прогибомеров на пути.



Рисунок 2 – Общий вид наклейки тензорезисторов на шейке рельса в измерительном сечении.



Рисунок 3 – Общий вид установки балочных прогибомеров для регистрации боковых отжатий головки и вертикальных перемещений подошвы рельса.

Общий вид опытного кривого участка пути R565 м на 5301 км оборудованного измерительными приборами представлены на рисунке 4.



Рисунок 4 – Общий вид опытного кривого участка пути R565 м на 5301 км измерительными приборами.

Измерение поперечного профиля рельсов на опытных кривых выполнялось с использованием лазерного переносного рельсового профилометра ПРП RIFTEK RF 570 (рис.5).



Рисунок 5 – Измерение поперечного профиля головки рельса с использованием переносного рельсового профилометра ПРП RIFTEK RF 570.

В процессе испытаний в кривых участках пути, расположенных на I и II главных путях, радиусами R300м и R600м на подъемах и спусках определены:

- боковые и вертикальные силы, воздействующие на наружный и внутренний рельсы;

- горизонтальные отжатия головок рельсов на II главном пути со скреплениями ЖБР-65ПШМ, на I главном пути со скреплениями ЖБР-65;

- поперечный профиль головок рельсов.

Воздействие определялось от следующего подвижного состава:

- локомотивов ЗЭС5К, ВЛ-80р, ВЛ-85, ЭП-1;

- грузовых вагонов: цистерн, платформ для перевозки контейнеров, вагонов-лесовозов, хоппер-дозаторов:

- пассажирских вагонов;

- вагонов мотор-вагонного подвижного состава.

В результате предварительного анализа полученных замеров установлено:

1) в кривых участках пути радиусами R300м на II главном пути боковые силы на наружном рельсе составили:

- от локомотивов ЗЭС5К: на спуске 7,4-7,7 тс; на подъеме 7,6-7,8 тс; при движении без поезда (передислокация толкачей), при движении на подъеме в режиме двойной тяги (с толкачами в конце состава) боковые силы перераспределялись по длине состава от переднего локомотива пиковые значения 2,9-3,3 тс; от локомотива - толкача 5,4-5,9 тс;

- от локомотивов ВЛ80р: на спуске 5,0-5,8 тс; на подъеме в голове поезда 1,7-2,1 тс;

- от локомотивов ВЛ85: на спуске 4,1-5,0 тс; на подъеме в голове поезда 1,7 тс;

- от локомотивов ЭПП: на спуске 2,6-3,9 тс;

- от полувагонов: на спуске 5,9-6,1 тс; на подъеме 4,8...5,2 тс;

- от цистерн: на спуске 5,4-5,8 тс; на подъеме в первой половине поезда 1,7-2,1 тс;

- от платформ-контейнеровозов: на спуске 4,8-5,9 тс; на подъеме первой половине поезда 0,7-0,9 тс;

- от пассажирских вагонов: на спуске 3,1-3,3 тс;

- от вагонов мотор-вагонного подвижного состава: на спуске 3,4-3,5 тс; на подъеме на подъеме 0,9-1,4 тс;

2) в кривых участках пути радиусами R600м на II главном пути боковые силы на наружном рельсе составили:

- от локомотивов ЗЭС5К: на спуске 4,6...4,9 тс; на подъеме 6,0...6,4 тс; при движении без поезда (передислокация толкачей) 5,6-6,1 тс, при движении на подъеме также имело перераспределение боковых сил между первой и второй половиной поезда, но различие это было менее значимо, чем в кривой R300м, от переднего локомотива в пиковые значения 2,9-3,3 тс ;

- от локомотивов ВЛ80р: на спуске 4,2-6,1 тс; на подъеме в голове поезда на подъеме 3,4-4,4 тс;

- от локомотивов ЭП-1: на спуске 2,0-3,7 тс;

- от полувагонов: на спуске 3,8-4,3 тс; на подъеме 3,8-4,1 тс;

- от цистерн: на спуске 4,2-5,0 тс; на подъеме первой половине поезда 1,4-2,2 тс;

- от платформ-контейнеровозов: на спуске 3,1-3,9 тс; на подъеме в первой половине поезда 3.1-3.5 тс;

- от вагонов-лесовозов: на спуске 3,3-3,6 тс;

- от пассажирских вагонов: на спуске 1,0-1,5 тс;

- от вагонов мотор-вагонного подвижного состава: на спуске 3,5-3,8 тс; на подъеме 1,3-2,0 тс.

3) На I главном пути боковые воздействия от порожних грузовых полувагонов в среднем составляли 20-30% от бокового воздействия локомотивов и не превышали в кривых участках пути радиусами R300м – на спусках 2,1...2,7 тс, подъеме 2,1-2,4 тс, в кривой R600м - на спусках 1,5...2,3 тс, подъеме 1,8...2,5 тс..

Окончательные уточненные данные по величинам боковых сил с увязкой к осевым нагрузкам, типам и моделям подвижного состава после синхронизации с видеозаписями движения поездов, данные по боковым отжатиям и вертикальным прогибам будут представлены в научно-техническом отчете после окончательной статистической обработки данных в сроки установленные Дорожной картой, утвержденные главным инженером ЦП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В соответствии с телеграммой ОАО РЖД от 26.04.2021г. №ИСХ – 18488/ЦДИ специалистами АО «ВНИКТИ» и Слюдянской дистанции пути проведены испытания по определению силового воздействия от эксплуатируемого подвижного состава в кривых R300, R600 м на подъемах и спусках с уклонами более 16% в соответствии с утвержденной главным инженером ЦДИ Программой методикой 30.П.496.П.

2. В процессе испытаний в кривых участках пути, расположенных на I и II главных путях, радиусами R300м и R600м на подъемах и спусках определены:

- боковые и вертикальные силы, воздействующие на наружный и внутренний рельсы;

- горизонтальные отжатия головок рельсов на II главном пути со скреплениями ЖБР-65ПШМ, на I главном пути со скреплениями ЖБР-65 от следующего подвижного состава:

- колес локомотивов ЗЭС5К, ВЛ-80р, ВЛ-85, ЭП-1;

- грузовых поездов, сформированных из полувагонов, цистерн, платформ для перевозки контейнеров, вагонов-лесовозов, хоппер - дозаторов;
- вагонов пассажирских поездов;
- вагонов мотор-вагонного подвижного состава.

3. Анализ результатов измерений силовых воздействий от эксплуатируемого подвижного состава показал:

- наиболее высокие уровни максимальных боковых сил наблюдаются от воздействия локомотивов ЗЭС5К с осевой формулой $3(2_0 - 2_0)$ и осевой нагрузкой 25тс. В кривых участках пути радиусами R300м на II главном пути на спусках с уклонами до 17,7% максимальные боковые силы достигали 7,4-7,7 тс; на подъеме 7,6-7,8 тс; при движении без поезда (передислокация толкачей) 7,3-7,6 тс Это на 24...32% выше, чем у локомотивов старых серий –ВЛ-80,ВЛ-85,ВЛ-80^Р. При движении на подъеме в режиме двойной тяги (с толкачами в конце состава) боковые силы перераспределялись по длине состава от переднего локомотива пиковые значения 2,9-3,3 тс; от локомотива- толкача 5,4-5,9 тс;

- высокие уровни боковых сил зарегистрированы от новых моделей полувагонов с осевой нагрузкой 25тс. В кривых участках пути радиусами R300м на II главном пути на спусках с уклонами до 17,7% максимальные боковые силы от полувагонов достигали 5,9-6,1 тс, от цистерн- 5,4-5,8 тс на подъемах в режимах двойной тяги (с толкачами) от переднего локомотива пиковые значения 2,9-3,3 тс; от локомотива - толкача 5,4-5,9 тс;

- с увеличением радиуса кривой до R600м уровни боковых сил снижались от всех типов подвижного состава. При этом достаточно высоки уровни боковых сил сохранялись от воздействия локомотивов ЗЭС5К, На спуске достигали 4,6...4,9 тс; на подъеме 6,0...6,4 тс при движении без поезда (передислокация толкачей. От полувагонов и цистерн максимальные значения боковых сил на спуске снизились до 3,8 -4,3тс и 4,2-5,0 тс соответственно, на подъеме до 3,8 -4,1тс и 2,4-2,9 тс соответственно;

- боковые силы от порожних грузовых полувагонов в среднем составляли 20-30% от бокового воздействия локомотивов ЗЭС5К и не превышали в кривых участках пути радиусами R300м – на спусках 2,1...2,7 тс, подъеме 2,1-2,4 тс, в кривой R600м - на спусках 1,5...2,3 тс, подъеме 1,8...2,5 тс.

4. Учитывая, что при суточной структуре поездов по главному пути- 85 грузовых, 6 пассажирских и 2-х мотор-вагонных доля грузовых вагонов по осям достигает 94%. Поэтому внедрение новых грузовых вагонов с повышенным боковым воздействием на путь в кривых малых радиусов приводит к резкому повышению износа с ростом грузонапряженности, что совпадает с внедрением новых категорий рельсов, имеющих недостаточную износостойкость.

5. Для снижения интенсивности износа необходимо проработать мероприятия по свободному вписыванию тележек новых грузовых вагонов в кривые малого радиуса. Разработать технологические мероприятия при производстве дифференцированно-термоупрочненных рельсов, направленные на повышением их износостойкости.

*- данное заключение получено на основании экспресс-анализа пиковых значений боковых сил и может считаться как предварительное. Окончательное заключение будет сделано после статистической обработки массива данных с привязкой боковых сил к вертикальным и с синхронизацией видеозаписей.

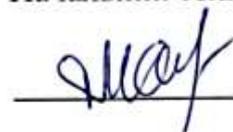
От АО «ВНИКТИ»:

Заведующий отделом пути
и СПС


О.Г. Краснов

От ПЧ-9:

Начальник технического отдела


В. А. Малыгин

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Пример определения коэффициентов
приведения боковых, вертикальных сил на наружный и внутренний рельсы от
подвижного состава

Рассчитаем коэффициенты приведения боковых и вертикальных сил на наружный и внутренний рельсы от подвижного состава на примере кривой R298 м с уклоном пути -16,2‰.

Согласно данным технического отдела Слюдянской дистанции пути на II главном пути суточный пакет поездов состоит из:

грузовые поезда – 85 шт.;

пассажирские поезда – 6 шт.;

мотор-вагонный подвижной состав – 2 шт.

При этом в состав грузовых поездов входят:

– 30% вагонов I кластера (полувагоны с осевой нагрузкой 250 кН);

– 55% вагонов II кластера (полувагоны с осевой нагрузкой 235 кН, цистерны, хопперы, лесовозы, крытые вагоны и др.);

– 15% вагонов III кластера (контейнеровозы).

Кроме того к вагонам III кластера относятся пассажирские вагоны и мотор-вагонный подвижной состав.

Принимаем, что в составе грузового поезда 71 вагон, в пассажирских поездах 12 вагонов, а в составе мотор-вагонного подвижного состава 6 вагонов.

В состав поездов также входили локомотивы:

в голове грузовых поездов:

– 60% локомотивы I кластера (ЗЭС5К, осевая формула 3(20-20));

- 20% локомотивы II кластера (ВЛ80р, осевая формула 3(20-20));
 - 20% локомотивы II кластера (ВЛ85, осевая формула 2(20-20-20));
- в голове пассажирских поездов:

- 100% локомотивы II кластера (ЭП1, осевая формула 1(20-20-20));
- в голове грузовых поездов – локомотивы-толкачи:

- 100% локомотивы I кластера (ЗЭС5К, осевая формула 3(20-20));

Тогда общее количество колесных пар проходящих по участку определится как:

$$\Sigma_{\text{к.п.}} = \text{КП}_{\text{локI}} + \text{КП}_{\text{локII}} + \text{КП}_{\text{вагI}} + \text{КП}_{\text{вагII}} + \text{КП}_{\text{вагIII}}$$

Количество колесных пар локомотивов I кластера:

$$\text{К. П.}_{\text{локI}} = 0,6 \cdot 85 \cdot 3 \cdot 4 + 85 \cdot 3 \cdot 4 = 1632 \text{ шт.}$$

Количество колесных пар локомотивов II кластера:

$$\text{К. П.}_{\text{локII}} = 85 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 0,2 + 85 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 0,2 + 6 \cdot 1 \cdot 6 \cdot 1 = 444 \text{ шт.}$$

Количество колесных пар грузовых вагонов I кластера:

$$\text{К. П.}_{\text{вагI}} = 85 \cdot 71 \cdot 4 \cdot 0,3 = 7242 \text{ шт.}$$

Количество колесных пар грузовых вагонов II кластера:

$$\text{К. П.}_{\text{вагII}} = 85 \cdot 71 \cdot 4 \cdot 0,55 = 13277 \text{ шт.}$$

Количество колесных пар грузовых вагонов III кластера:

$$\text{К. П.}_{\text{вагIII}} = 85 \cdot 71 \cdot 4 \cdot 0,15 + 6 \cdot 10 \cdot 4 + 2 \cdot 6 \cdot 4 = 3909 \text{ шт.}$$

Общее количество колесных пар проходящих через рассматриваемый кривой участок пути за сутки:

$$\Sigma_{\text{к.п.}} = 1632 + 444 + 7242 + 13277 + 3909 = 26504 \text{ шт.}$$

Определим долю каждого кластера подвижного состава:

$$\gamma_{\text{локI}} = \frac{\text{КП}_{\text{локI}}}{\Sigma \text{КП}} = \frac{1632}{26504} = 0,0616$$

$$\gamma_{\text{локII}} = \frac{\text{КП}_{\text{локII}}}{\Sigma \text{КП}} = \frac{444}{26504} = 0,0168$$

$$\gamma_{\text{ваг. I}} = \frac{KП_{\text{ваг. I}}}{\Sigma KП} = \frac{7242}{26504} = 0,2732$$

$$\gamma_{\text{ваг. II}} = \frac{KП_{\text{ваг. II}}}{\Sigma KП} = \frac{13277}{26504} = 0,5009$$

$$\gamma_{\text{ваг. III}} = \frac{KП_{\text{ваг. III}}}{\Sigma KП} = \frac{3909}{26504} = 0,1475$$

Зная долю каждого кластера подвижного состава, рассчитаем коэффициент приведения для бокового, вертикального износа наружного рельса, вертикального износа внутреннего рельса с учетом данных табл. 8.19 и 8.20.

$$K_{\text{п.с.}}^{\Sigma б} = 0,0616 \cdot (0,375 \cdot 1,3 + 0,625 \cdot 1,5) + 0,0165 \cdot 0,85 + 0,2732 \cdot 1,1 + \\ + 0,5009 \cdot 1 + 0,1475 \cdot 0,75 = 1,01385$$

Коэффициент $K_{\Sigma \text{бок}}$ показывает насколько интенсивность износа будет выше (или ниже) от эксплуатируемого подвижного состава по сравнению с эксплуатацией базовых грузовых вагонов.

Определим интегральный коэффициент вертикальных сил, воздействующих на наружный рельс с учетом коэффициента приведения по табл. 8.19 и 8.20.

$$K_{\text{п.с.}}^{\Sigma \text{в.н}} = 0,0616 \cdot (0,375 \cdot 0,95 + 0,625 \cdot 1) + 0,0165 \cdot 1 + 0,2732 \cdot 1,07 + \\ + 0,5009 \cdot 1 + 0,1475 \cdot 0,55 = 0,951294$$

Интегральный коэффициент вертикальных сил на наружный рельс показал, что интенсивность износа будет составлять $K_{\text{п.с.}}^{\Sigma \text{в.н}} = 0,978$ от интенсивности вертикального износа наружного рельса, если бы эксплуатировались только базовые грузовые вагоны.

Аналогичным способом определим интегральный коэффициент вертикальных сил воздействующих на внутренний рельс с учетом коэффициентов приведения по табл. 8.19 и 8.20.

$$K_{п.с.}^{\Sigma_{в.в.}} = 0,0616 \cdot (0,375 \cdot 1,07 + 0,625 \cdot 1,11) + 0,0165 \cdot 1 + 0,2732 \cdot 1,08 + \\ + 0,5009 \cdot 1 + 0,1475 \cdot 0,6 = 0,968408$$

Таким образом, получены интегральные коэффициенты приведения боковых сил $K_{п.с.}^{\Sigma_{\delta}} = 1,014$, вертикальных сил на наружный рельс $K_{п.с.}^{\Sigma_{в.н.}} = 0,951$, вертикальных сил на внутренний рельс $K_{п.с.}^{\Sigma_{в.в.}} = 0,968$, которые определяют насколько средние значения боковых и вертикальных сил на наружном и внутреннем рельсе отличаются от средних значений сил от базового грузового вагона. Принимая, что износ пропорционален работе сил трения, то можно использовать полученные коэффициенты в качестве функциональных, учитывающих влияние типов подвижного состава, эксплуатируемого на рассматриваемом участке на износ рельсов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Описание программы для расчета бокового и вертикального износа рельсов
для разных условий эксплуатации

Программа предназначена для расчета интенсивности износа рельсов при различных условиях эксплуатации.

В ходе вычислений определяется величина интенсивности износа рельса при достижении максимально допустимого бокового износа в 16 мм, а также интенсивность вертикального износа внутреннего и наружного рельсов.

Программное обеспечение выполнено в среде графического программирования Lab View 2011.

Входными данными для расчета являются параметры макрогеометрии пути (радиус кривого участка пути, возвышение наружного рельса, уклон продольного профиля пути), скорость движения подвижного состава, категория качества рельсов, тип промежуточных рельсовых скреплений, доля локомотивов кластеров I и II кластера, доля вагонов кластеров I–IV, средняя нагрузка на ось от грузовых вагонов, лубрикация.

Общий вид главного экрана программы представлен на рисунке А.1.

Общая блок-схема программы представлена на рисунке А.2.

ПАРАМЕТРЫ МАКРОГЕОМЕТРИИ		РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА	
Радиус кривой, м:	300	ИНТЕНСИВНОСТЬ БОКОВОГО ИЗНОСА, мм/млн т:	0.062
Возвышение, мм:	100	ПРОПУЩЕННЫЙ ТОННАЖ, млн.т :	256.8
Скорость движения, км/ч:	40	ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО ИЗНОСА НАРУЖНЕГО РЕЛЬСА, мм/млн т:	0.013
Уклон пути, ‰ :	0	ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО ИЗНОСА ВНУТРЕННЕГО РЕЛЬСА, мм/млн т:	0.021
Тип рельса	ДТ350		
Тип крепления:	КБ-65		
ЭКИПАЖИ (ВЕСОВОЙ КОЭФФИЦИЕНТ)			
ЛОКОМОТИВЫ	<input checked="" type="radio"/> Серийные	0.2	
	<input type="radio"/> Инновационные	0	
ВАГОНЫ	<input checked="" type="radio"/> Грузовой вагон	0.8	
	Ср. нагрузка на ось, т:	23.5	
	<input type="radio"/> Порожний	0	
	<input type="radio"/> Пассажирский	0	
	<input type="radio"/> Инновационный	0	
СУММА ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ:		1	
k, коэфф. трения:		0.1	
		 ПРОВЕСТИ РАСЧЕТ	 ВЫХОД

Рисунок А.1 – Главный экран программы расчета интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации

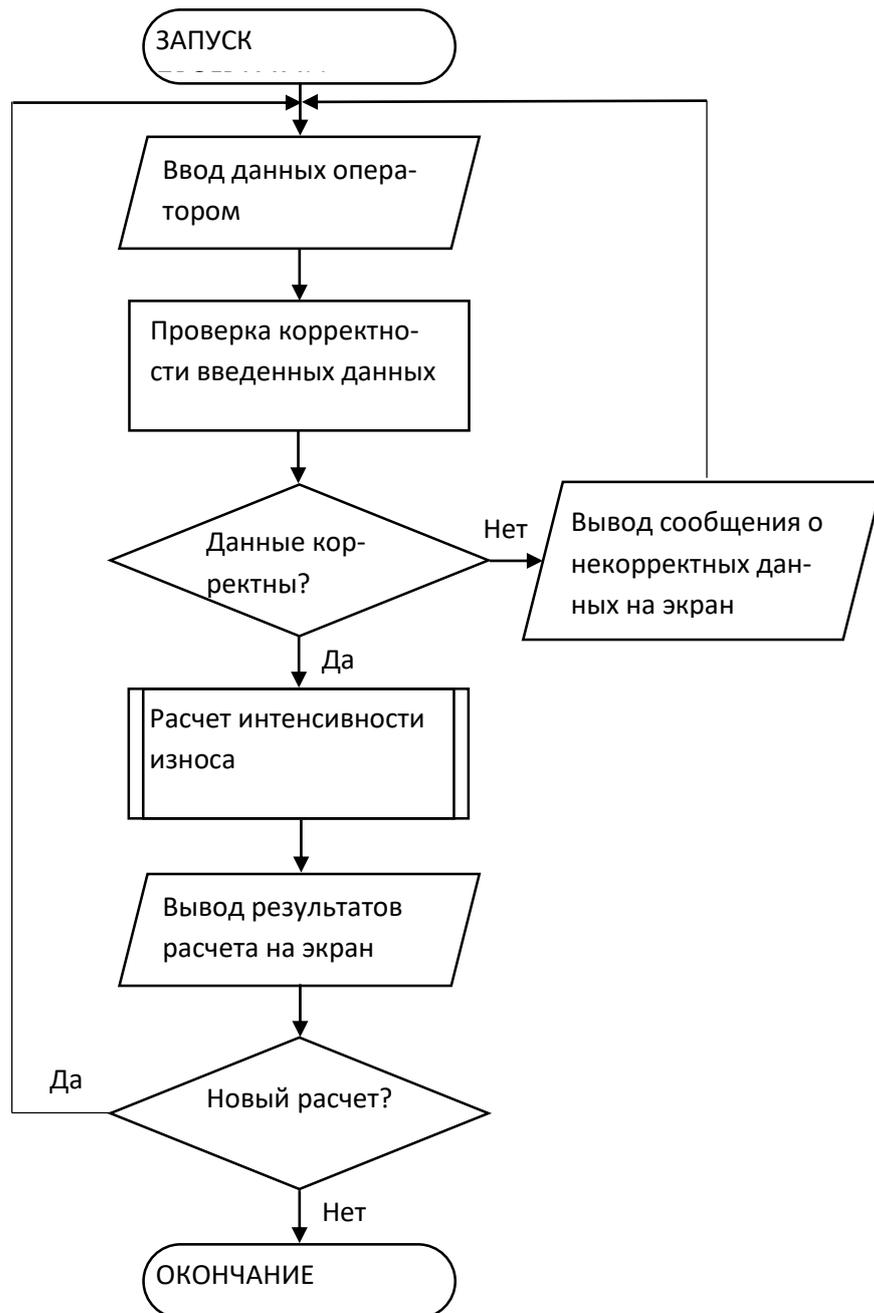


Рисунок А.2 – Общая блок-схема программы расчета интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации

Для расчета интенсивности износа необходимо ввести исходные данные в соответствующие поля. В окне «Сумма весовых коэффициентов» отображается

сумма долей экипажей. Если эта величина не равна «1», то значение будет подсвечено красным цветом.

После ввода исходных данных для расчета интенсивности необходимо нажать кнопку «Провести расчет». Программа проанализирует введенные данные и в случае некорректно введенных параметров выдаст предупреждающее сообщение, пример которого приведен на рисунке А.3. Пользователю необходимо устранить замечания и ввести корректные исходные данные, после чего повторно нажать кнопку «Провести расчет».

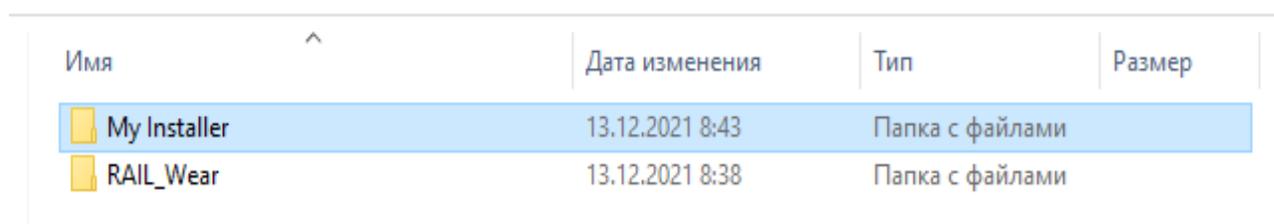
Рисунок А.3 – Пример предупреждения о некорректном вводе параметров для расчета интенсивности износа рельсов

После проведения расчета программа выведет величину интенсивности износа рельсов в поле «Результаты расчета».

Для завершения работы с программой необходимо нажать кнопку «Выход».

Установка программы расчета интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации.

Скопируйте папку RailWear на свой компьютер. В папке зайдите в каталог My Installer, далее в папку Volume и запустите установочный файл Setup.exe, дважды щелкнув по нему левой кнопкой мыши (см. рис. А.4).



Имя	Дата изменения	Тип	Размер
My Installer	13.12.2021 8:43	Папка с файлами	
RAIL_Wear	13.12.2021 8:38	Папка с файлами	

Рисунок А.4 – Папка с установочным файлом программы расчета интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации.

При запуске разрешите приложению внести изменения на вашем устройстве. Начнется процесс установки (см. рис. А.5).

.

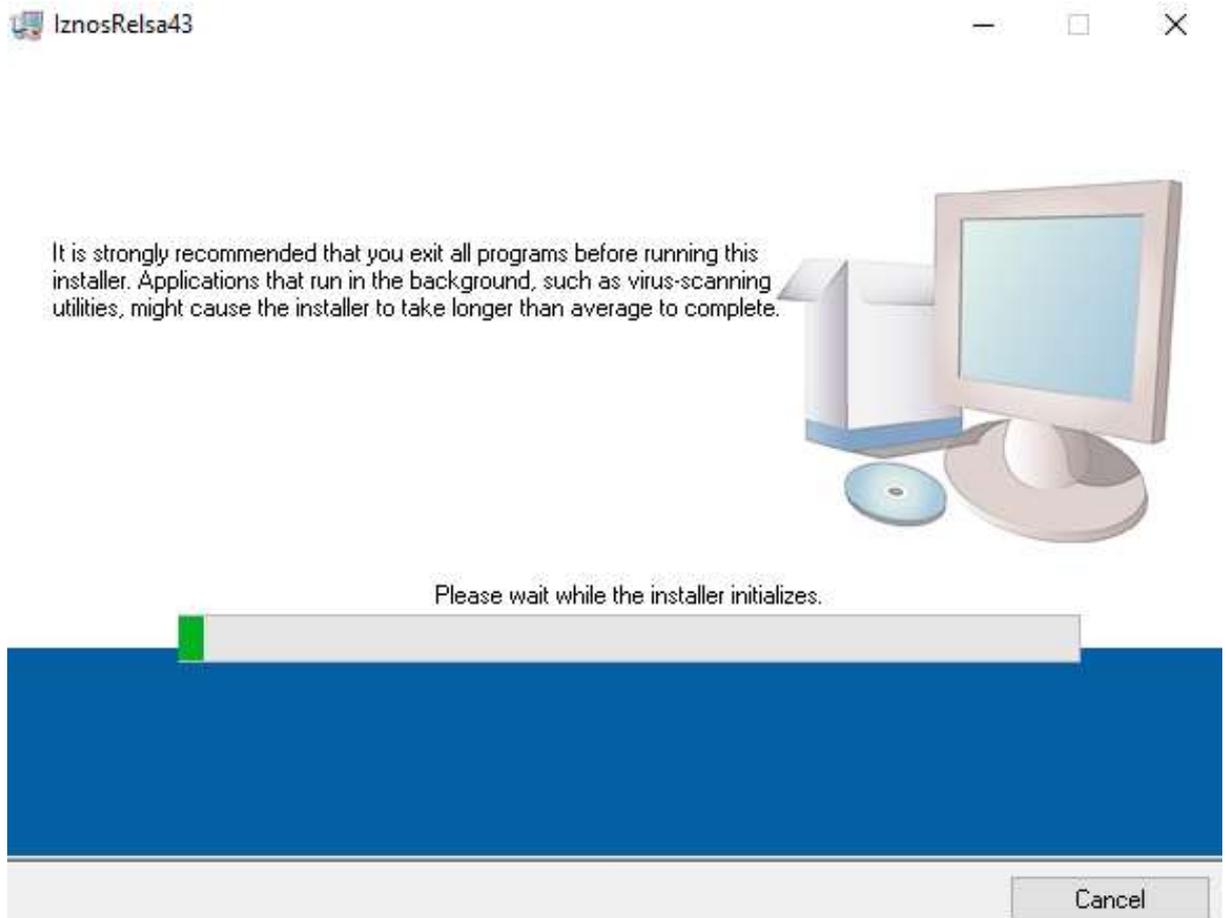


Рисунок А.5 – Начало установки программы расчета интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации.

Система по умолчанию предложит место установки на вашем компьютере. Для продолжения нажмите кнопку Next>> (см. рис. А.6).

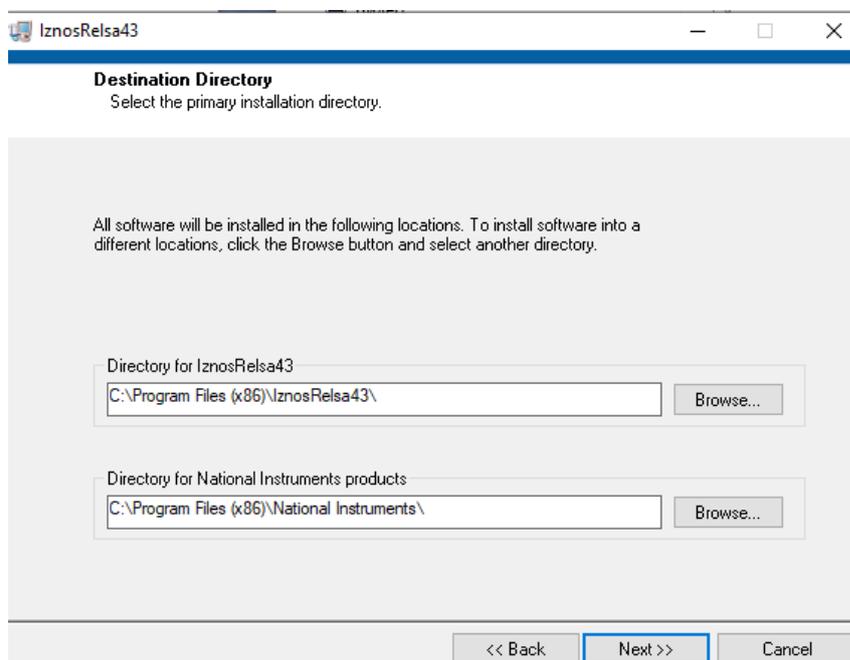


Рисунок А.6 – Выбор папки для установки программы расчета интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации на компьютере.

Выберите пункт I accept the License Agreement («Я принимаю условия данного лицензионного соглашения») и продолжите установку программы, нажав кнопку Next>> (см. рис. А.7).

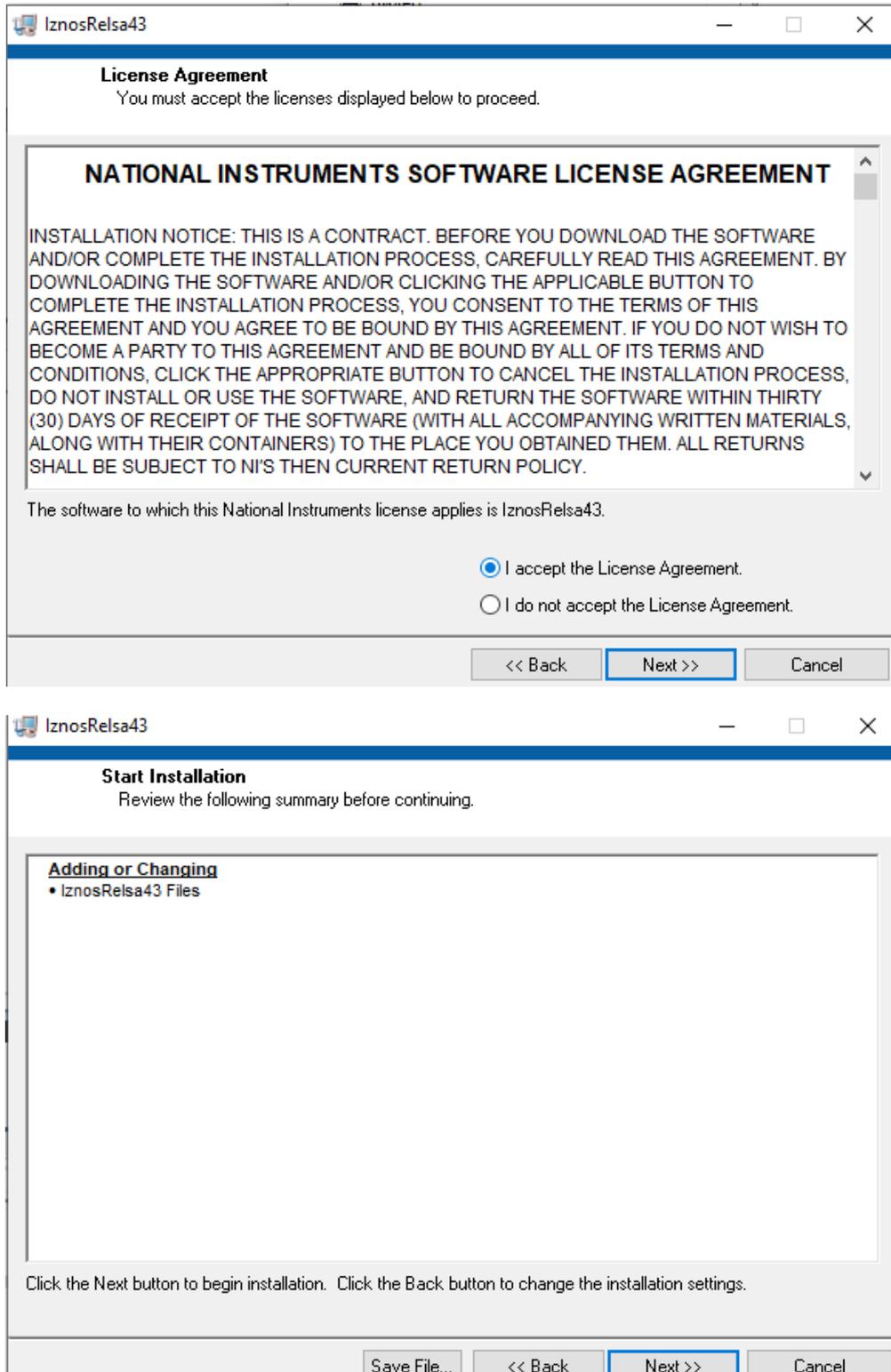


Рисунок А.7 – Этап установки программы расчета интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации.

Начнется процесс установки (см. рис. А.8).

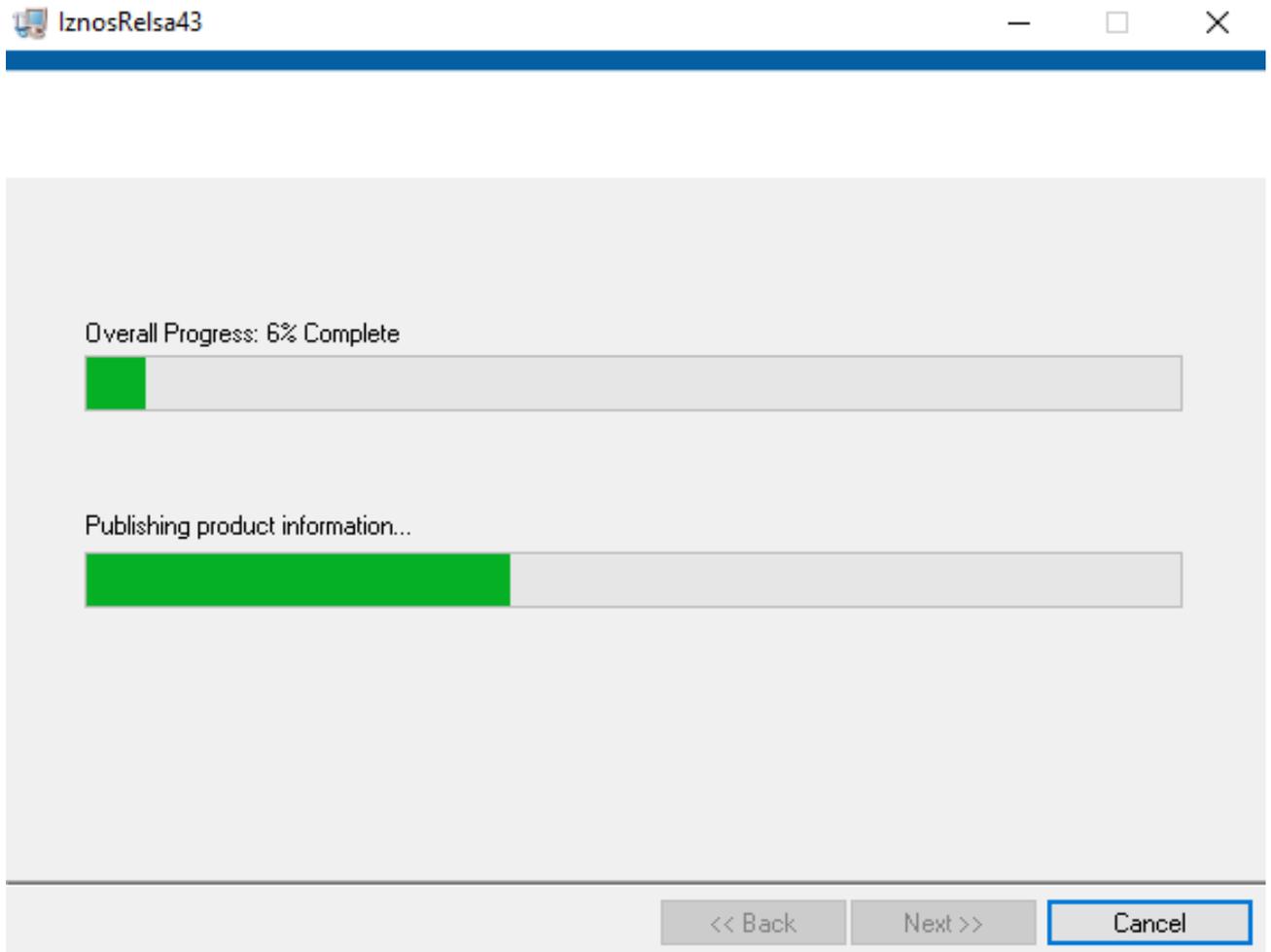


Рисунок А.8 – Процесс установки программы расчета интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации.

После успешного окончания установки система выдаст сообщение Installation Complete («Установка завершена»), нажмите кнопку Finish (см. рис. А.9).

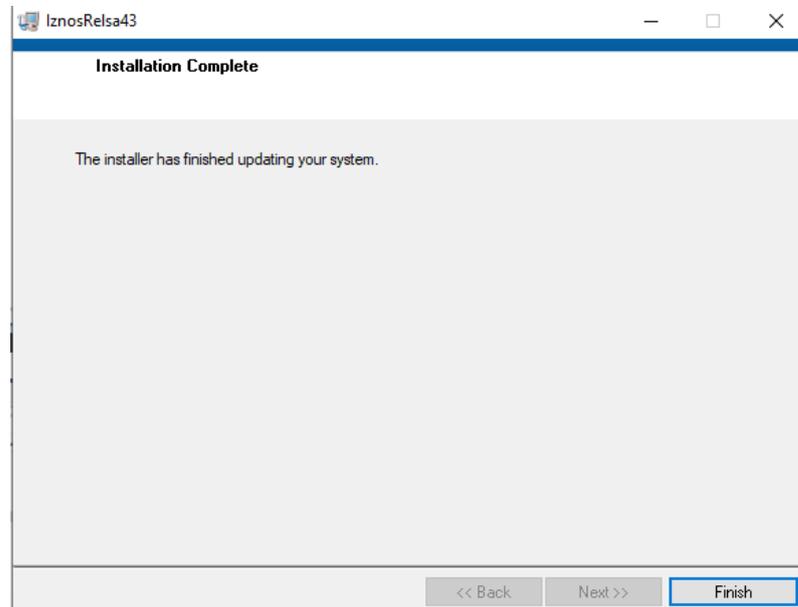


Рисунок А.9 – Завершение установки программы расчета интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации.

Система предложит вам перезагрузить компьютер. Выберите удобный для вас вариант: Restart («Выполнить перезагрузку сейчас») или Restart Later («Выполнить перезагрузку позже») (см. рис. А.10).

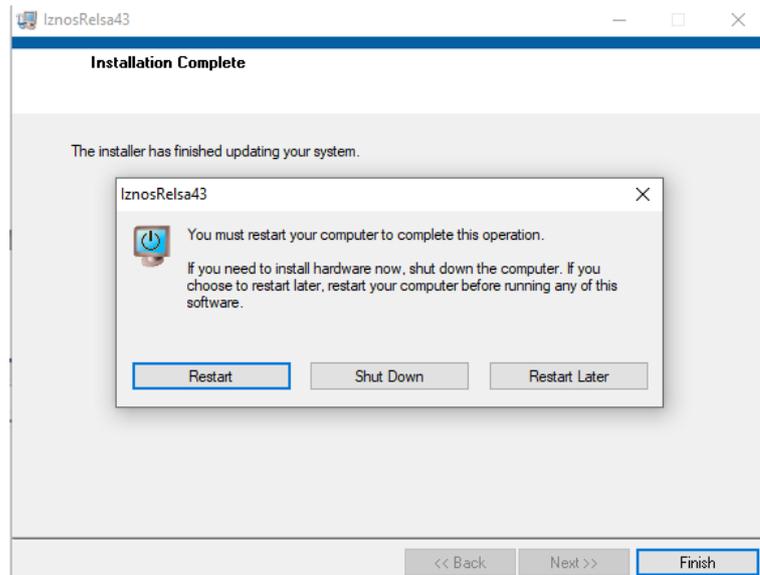


Рисунок А.10 – Выбор варианта перезагрузки компьютера после успешной установки программы расчета интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации.

После успешной установки запустите программу RailWear через меню «Пуск» или двойным нажатием левой кнопки мыши по иконке программы на рабочем столе.

Откроется диалоговое окно программы (см. рис. А.11).

RailWear

ПАРАМЕТРЫ МАКРОГЕОМЕТРИИ	
Радиус кривой, м:	300
Возвышение, мм:	100
Скорость движения, км/ч:	40
Уклон пути, ‰:	0
Тип рельса:	ДТ350
Тип скрепления:	КБ-65

ЭКИПАЖИ (ВЕСОВОЙ КОЭФФИЦИЕНТ)	
ЛОКОМОТИВЫ	<input checked="" type="radio"/> Серийные 0.08
	<input type="radio"/> Инновационные 0
ВАГОНЫ	<input checked="" type="radio"/> Грузовой вагон 0.91 <i>Ср. нагрузка на ось, т:</i> 23.5
	<input type="radio"/> Порожный 0
	<input checked="" type="radio"/> Пассажирский 0.01
	<input type="radio"/> Инновационный 0
СУММА ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ: 1	

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА	
ИНТЕНСИВНОСТЬ БОКОВОГО ИЗНОСА, мм/млн т:	0.128
ПРОПУЩЕННЫЙ ТОННАЖ, млн.т :	124.8
ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО ИЗНОСА НАРУЖНЕГО РЕЛЬСА, мм/млн т:	0.013
ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО ИЗНОСА ВНУТРЕННЕГО РЕЛЬСА, мм/млн т:	0.023

ЛУБРИКАЦИЯ

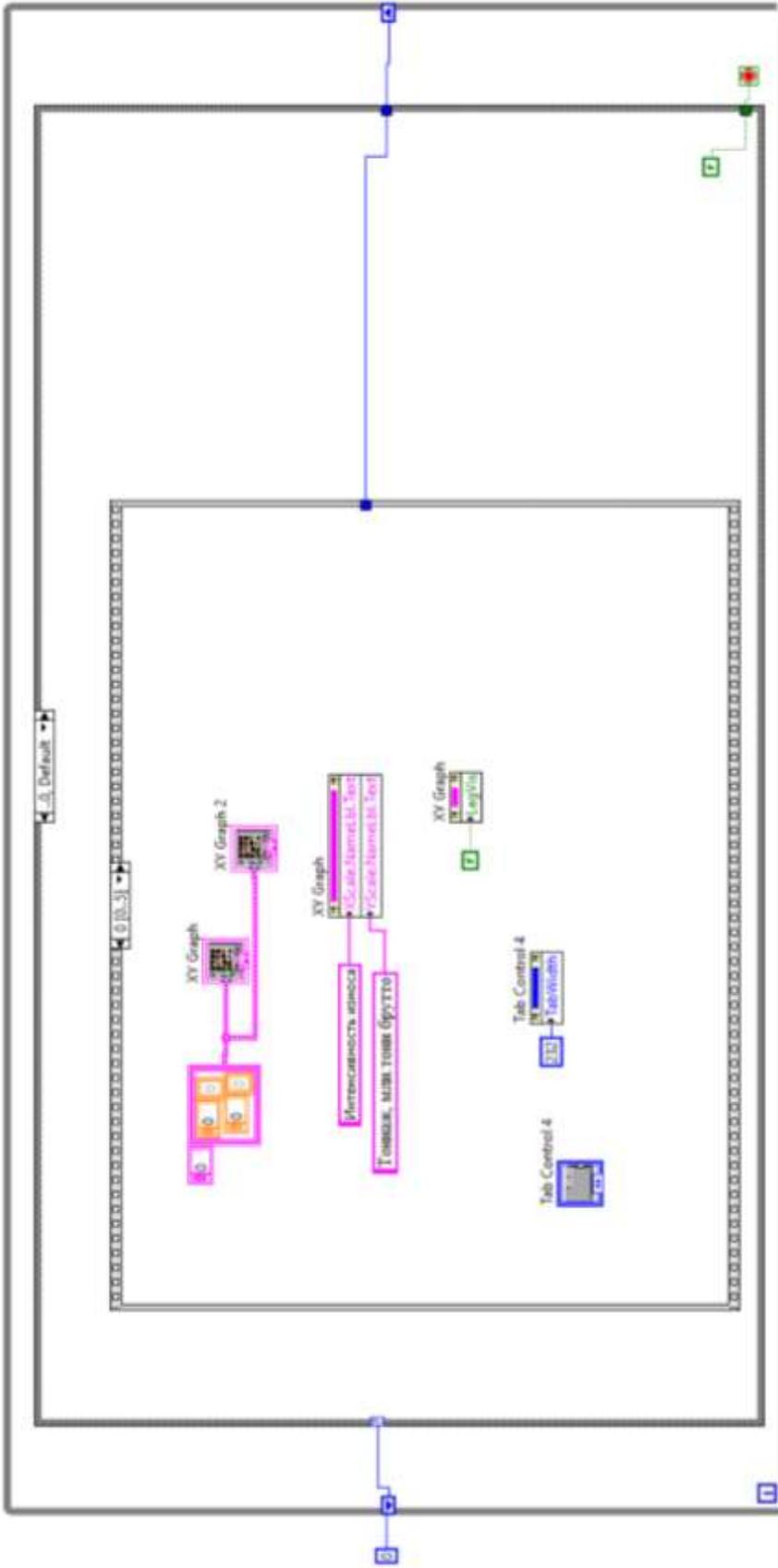
 **ПРОВЕСТИ РАСЧЕТ**  **ВЫХОД**

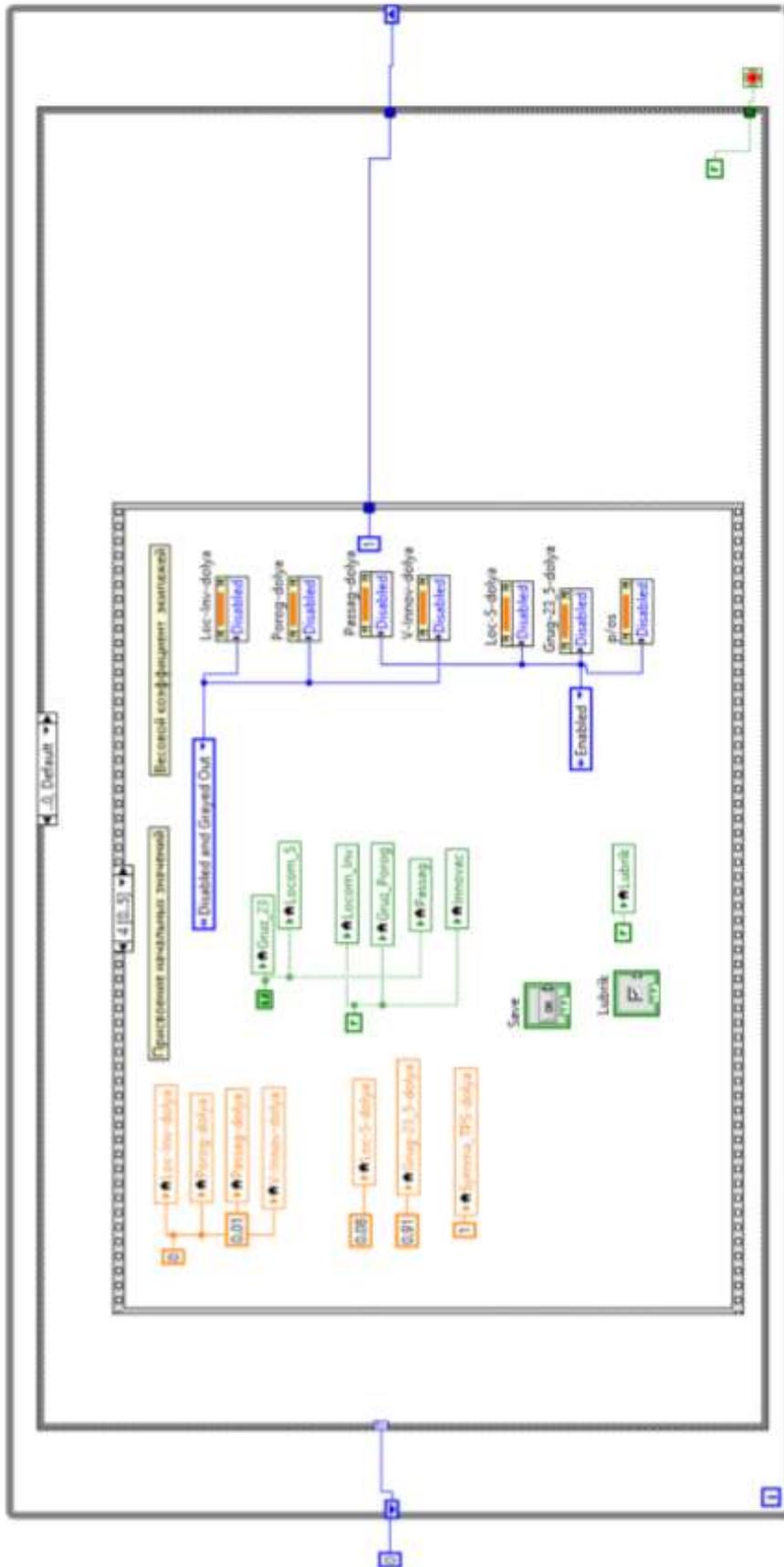
Рисунок А.11 – Основное диалоговое окно программы расчета интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации.

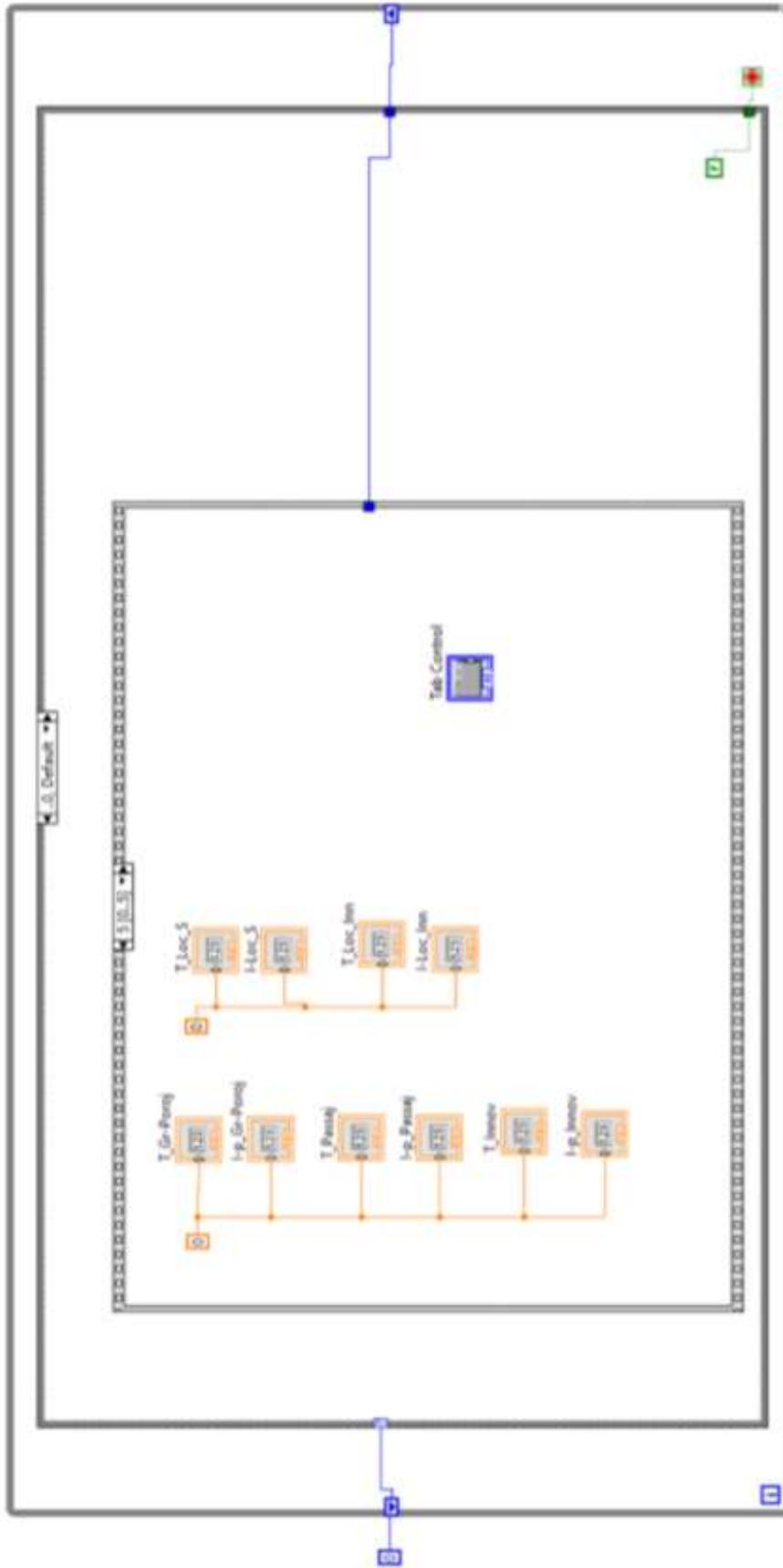
Для расчета износа рельса введите исходные данные и нажмите кнопку «Провести расчет». Для завершения работы программы нажмите кнопку «Выход».

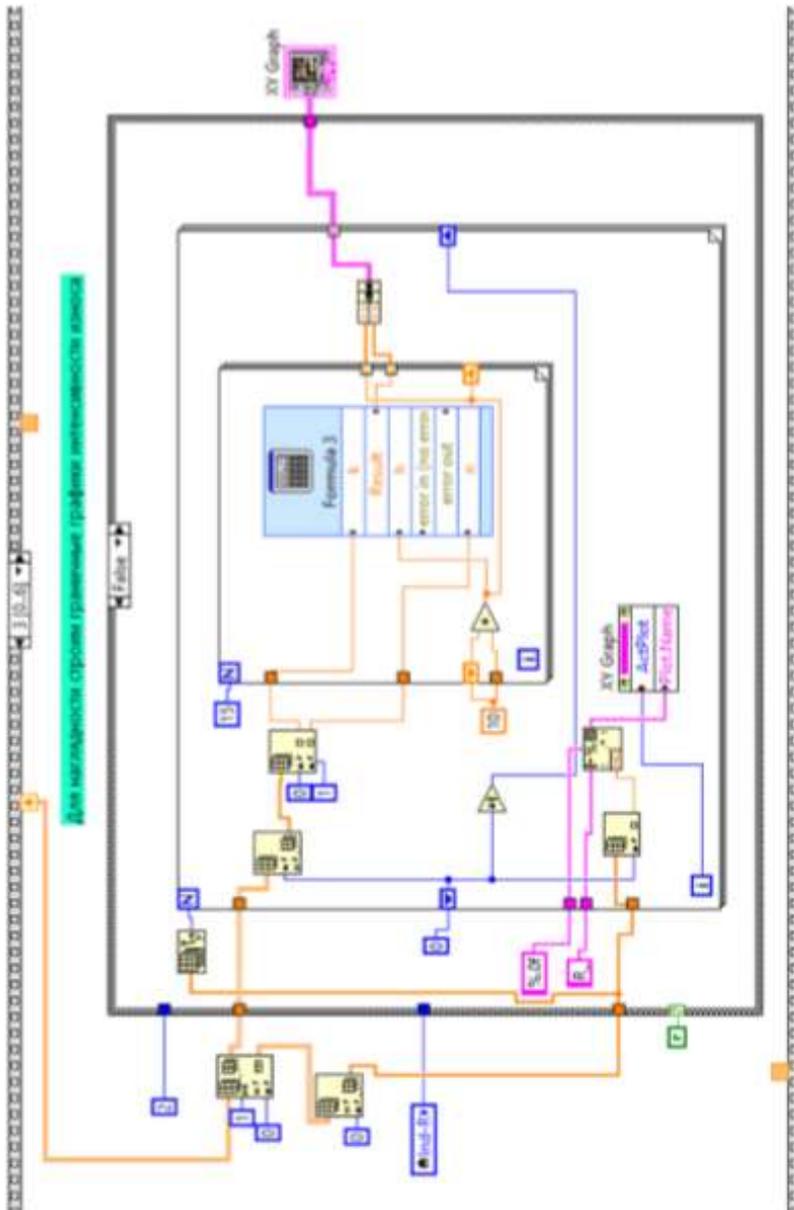
ПРИЛОЖЕНИЕ 5

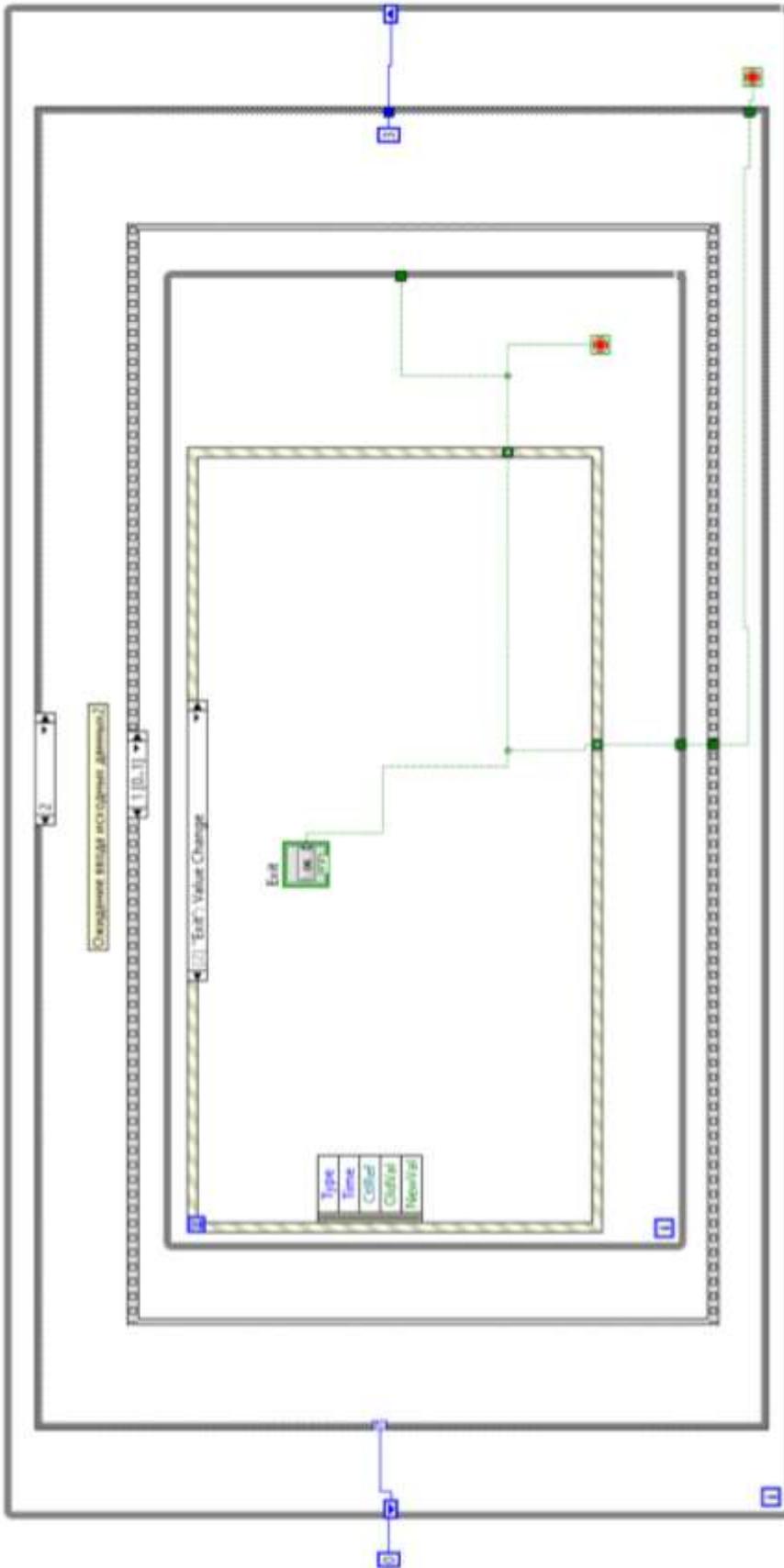
Программное обеспечение в среде графического программирования Lab View 2011.

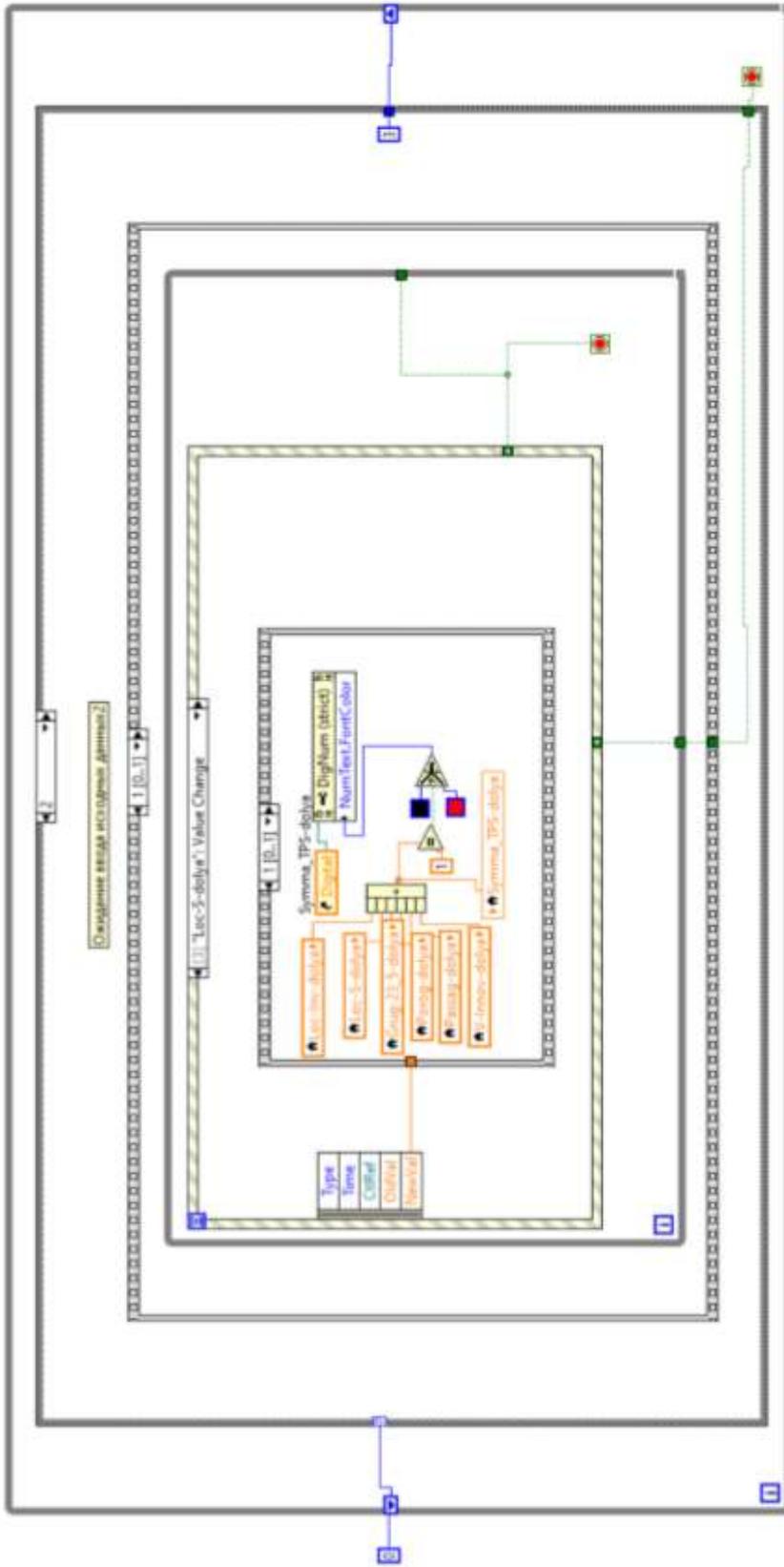


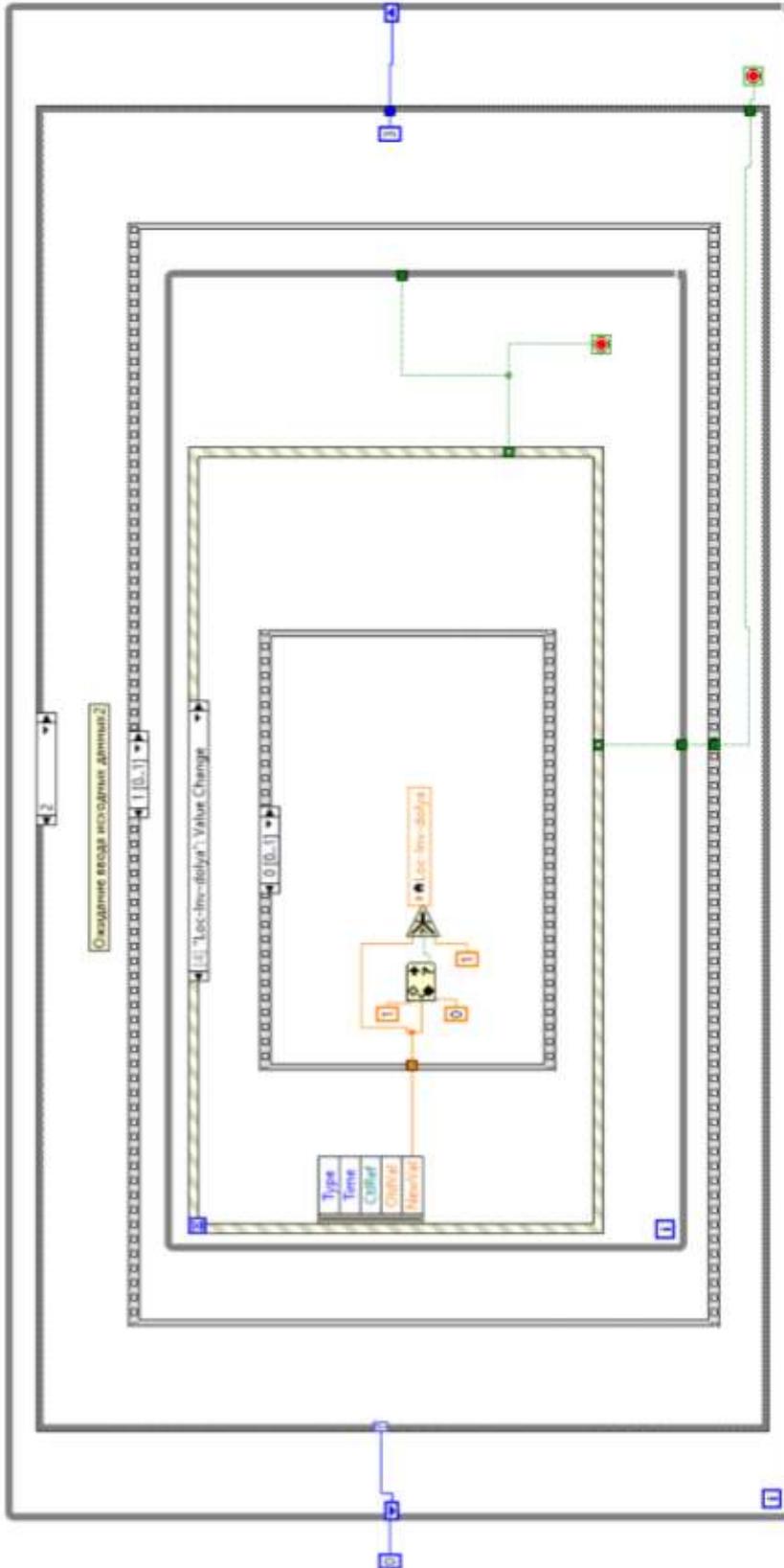


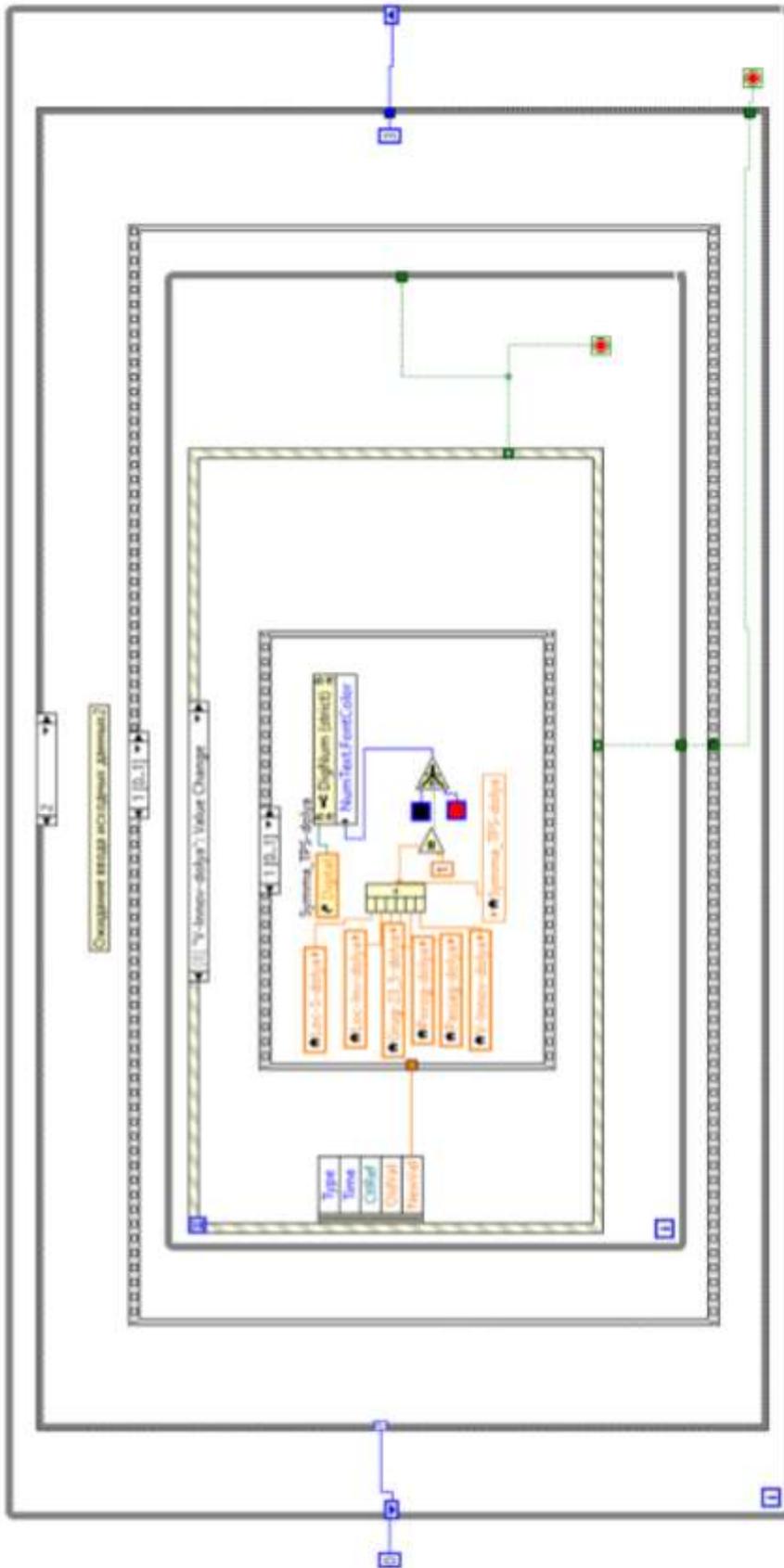


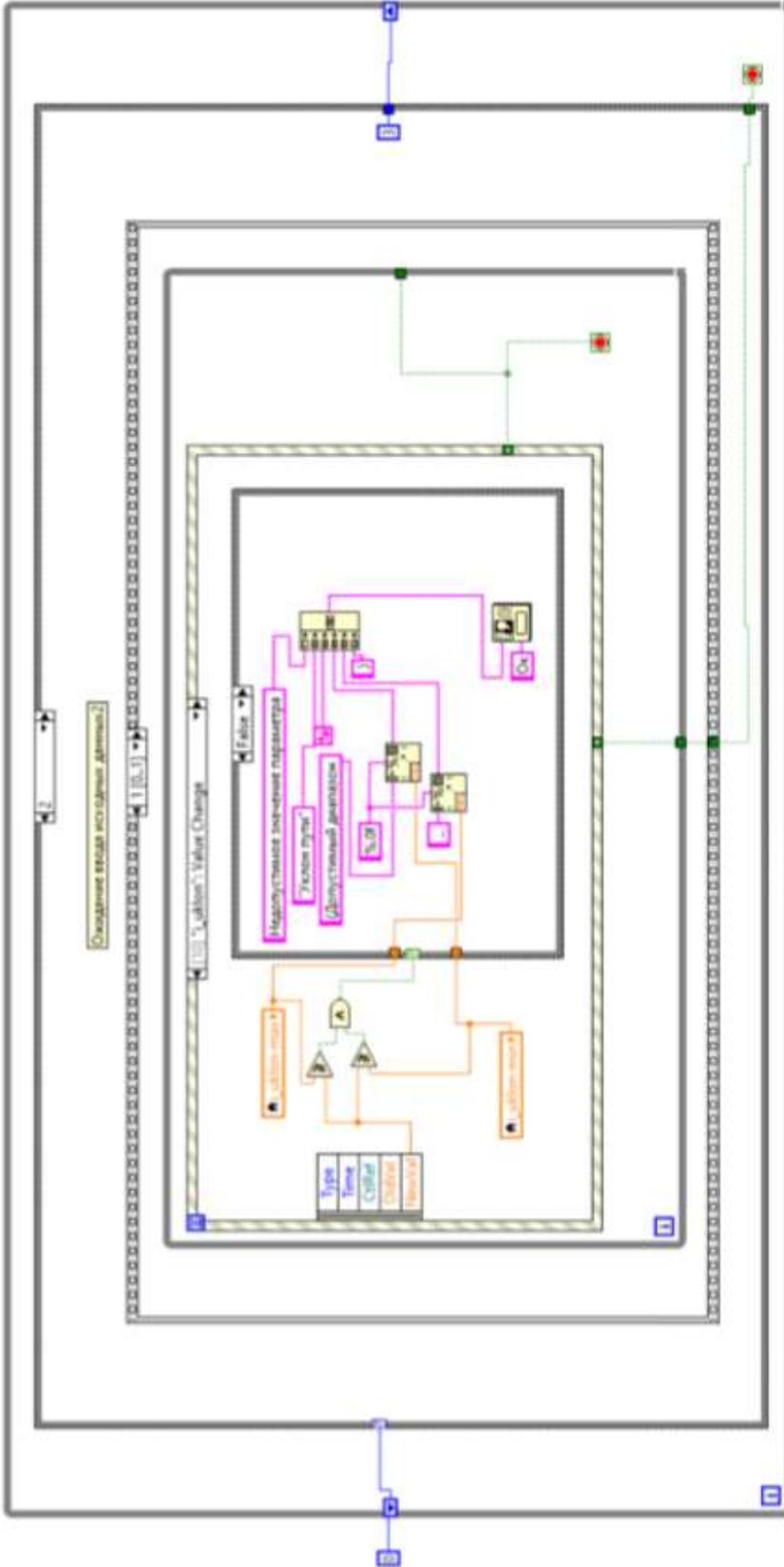


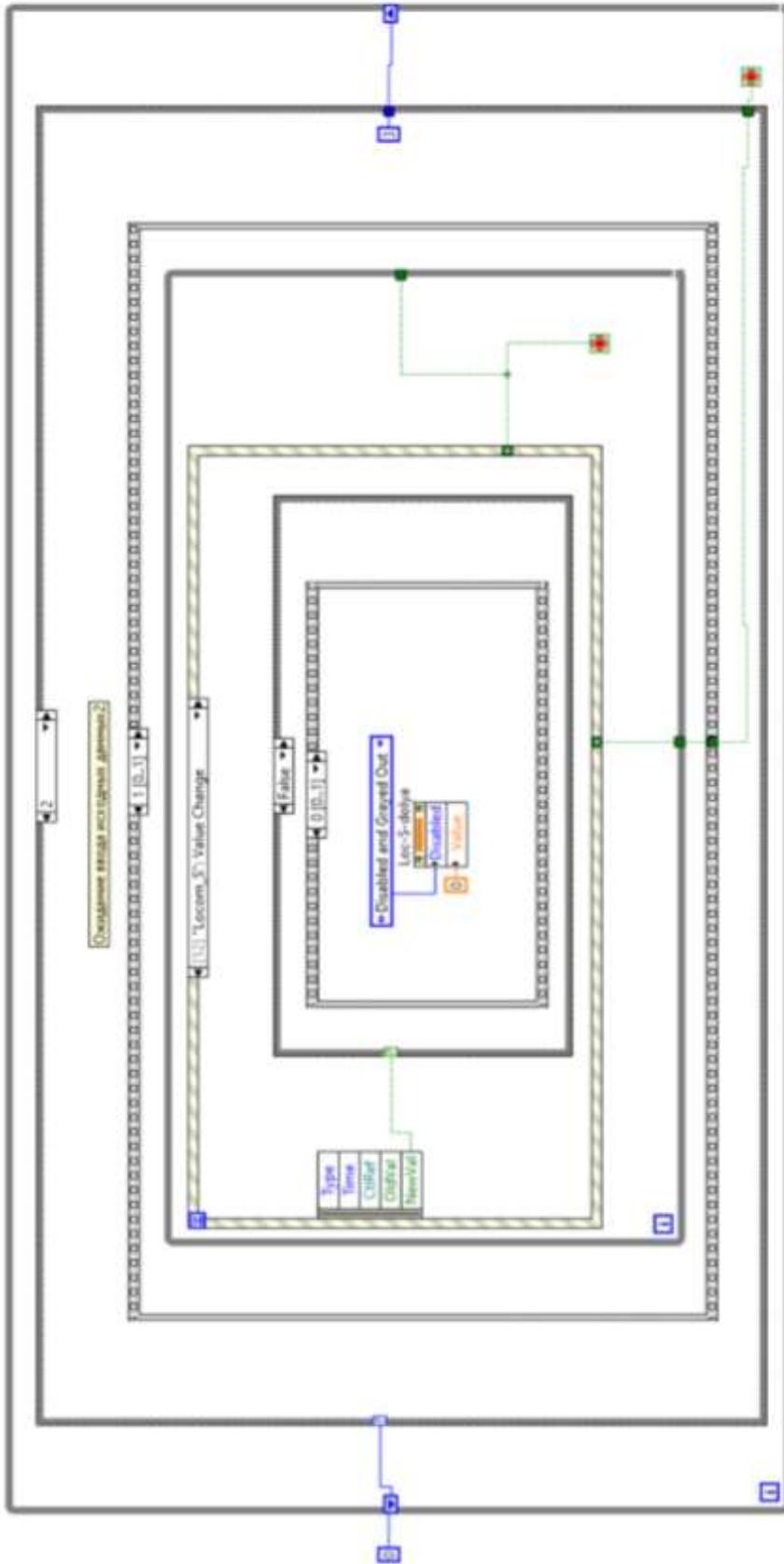


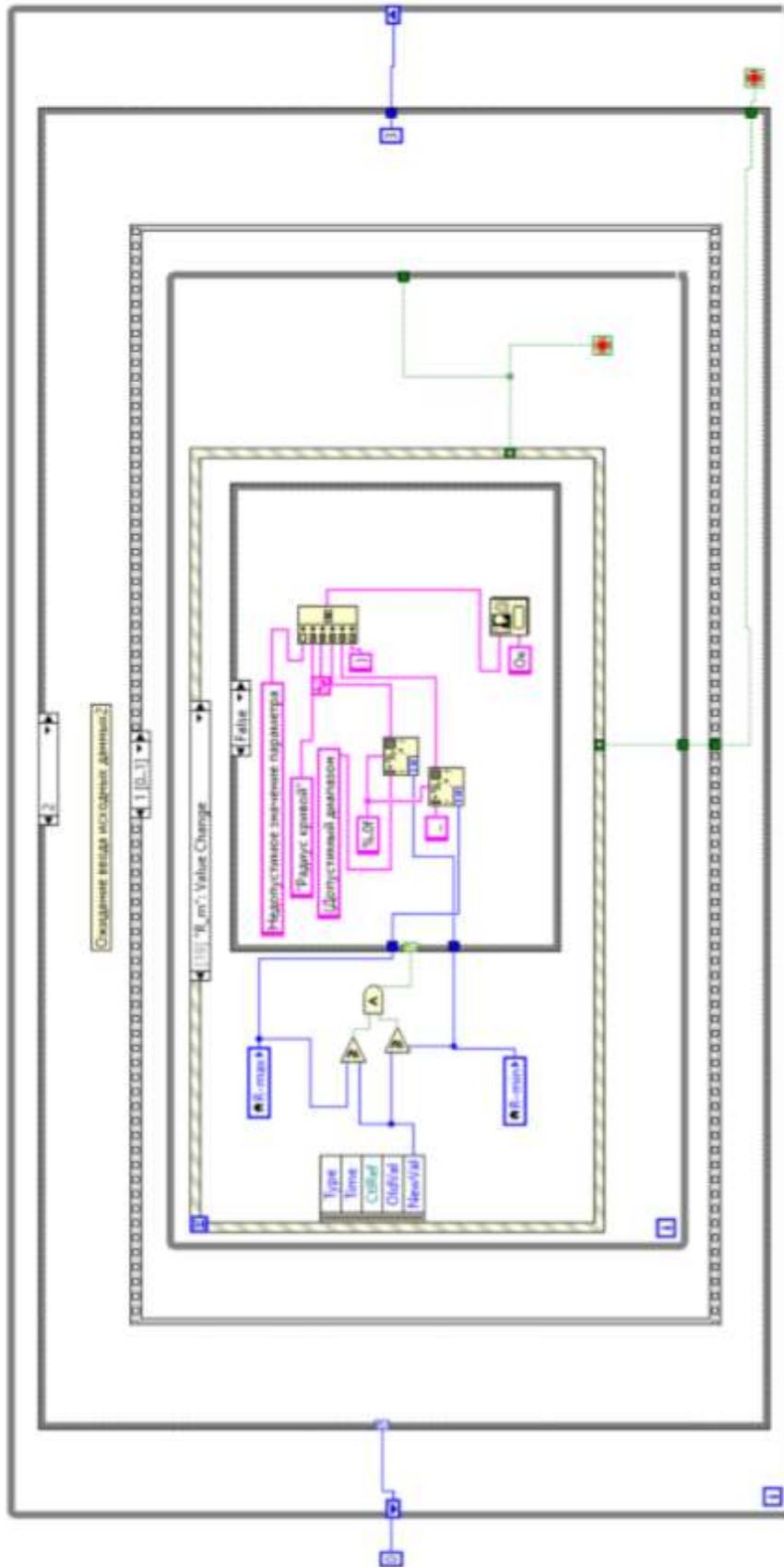


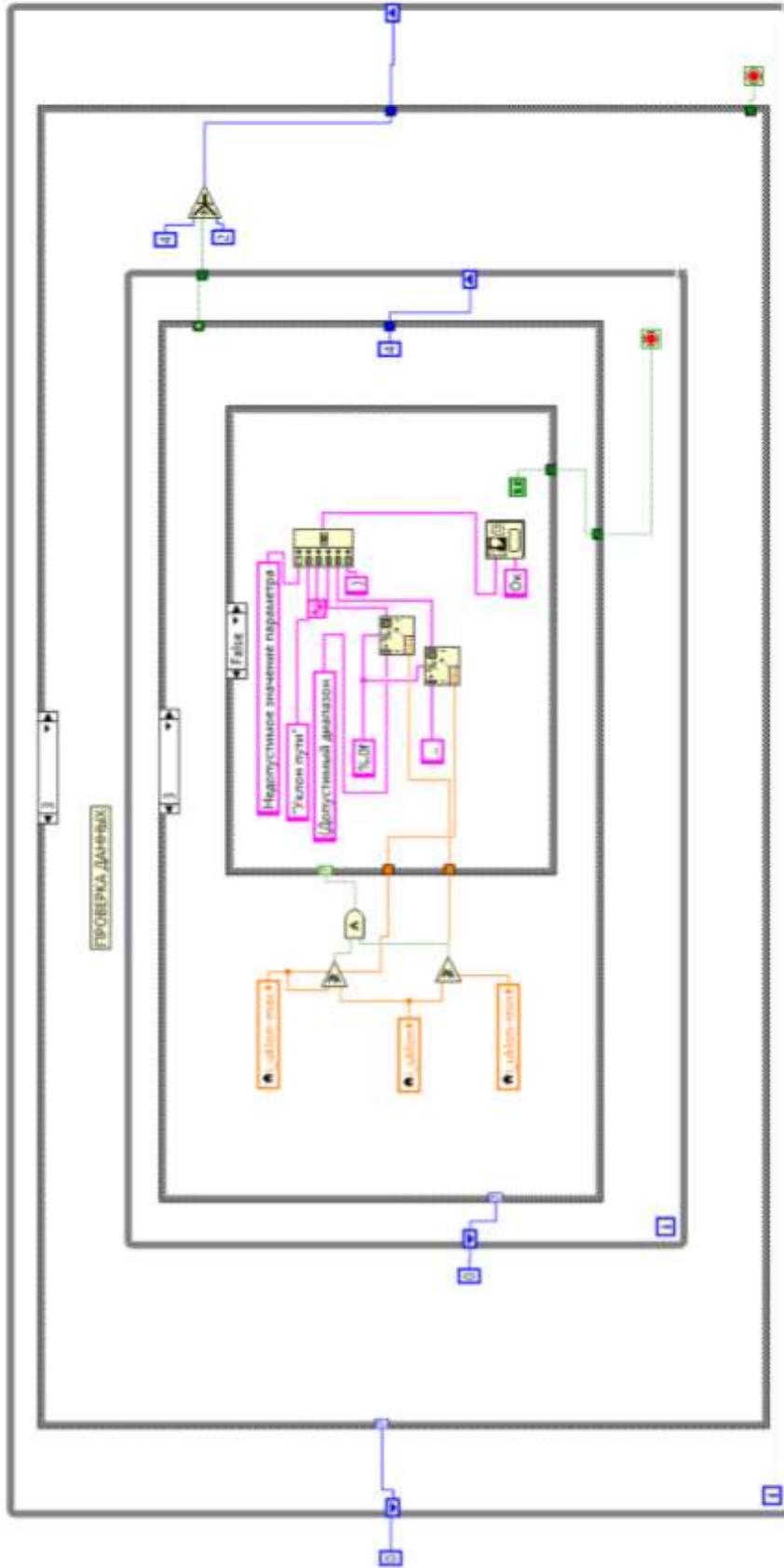


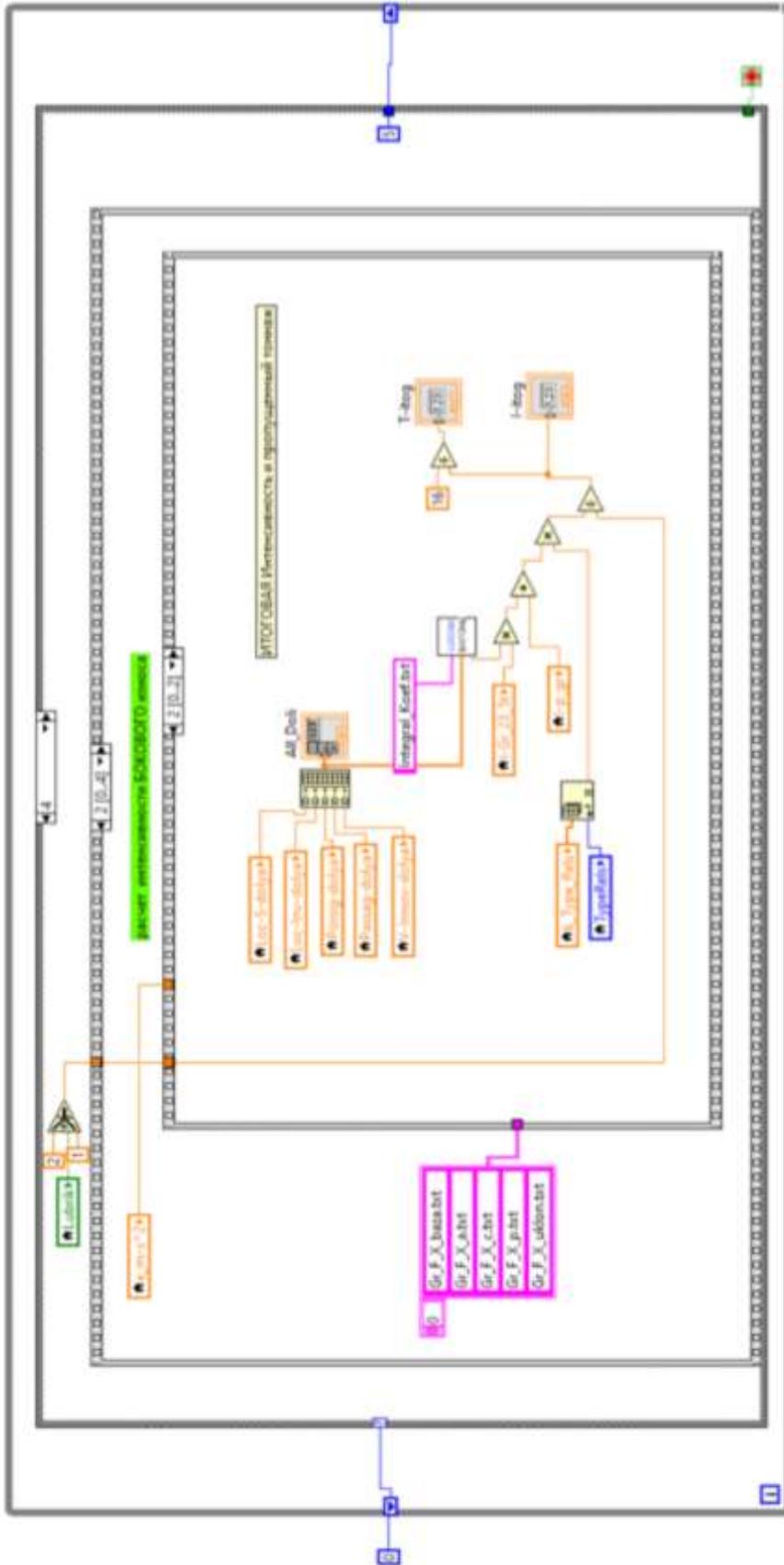


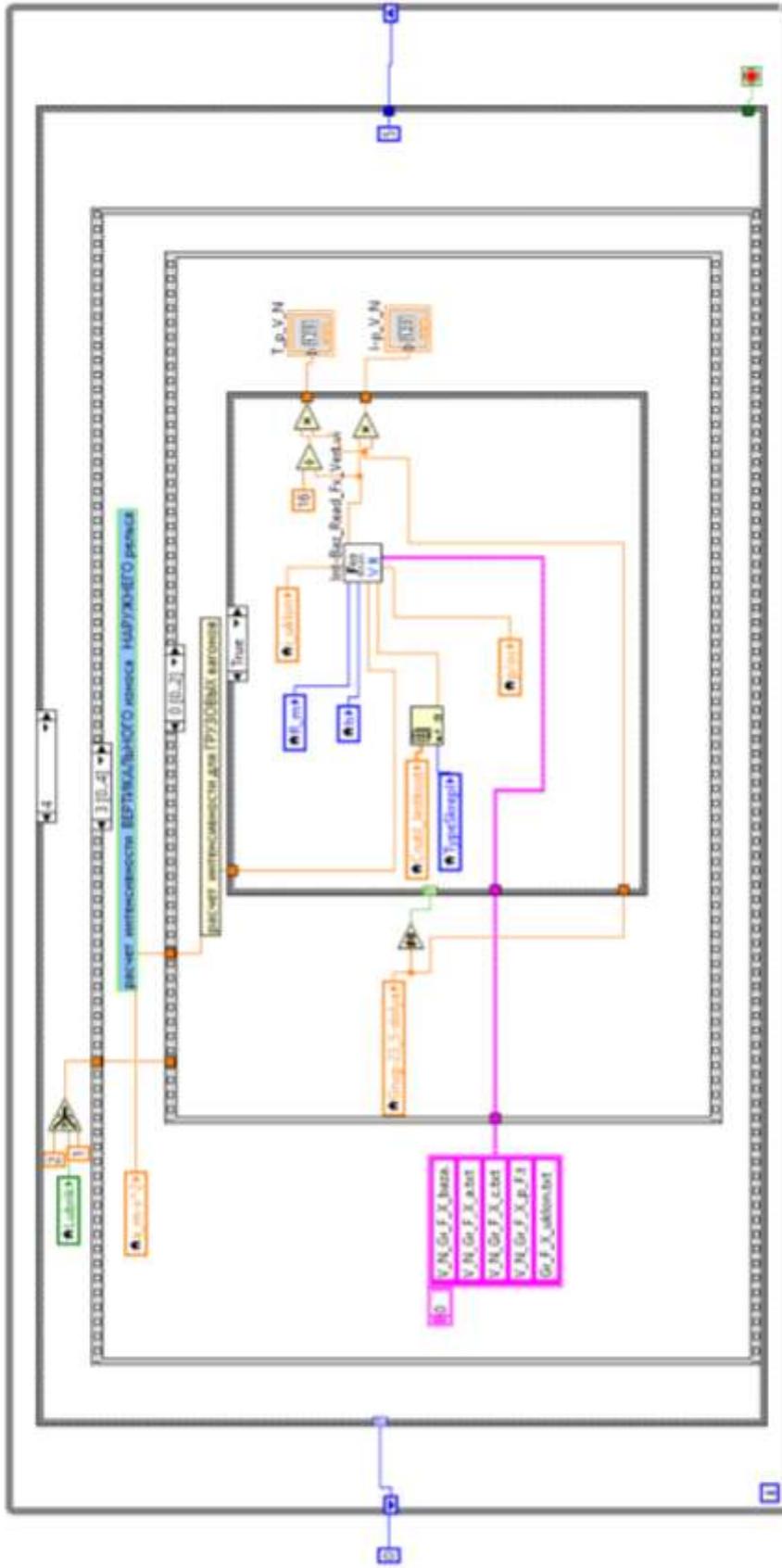












ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Верификация расчетных и экспериментальных данных по износу рельсов

Для верификации расчетов программы проведем сравнительный анализ расчетных интенсивностей износа и интенсивностей бокового износа в кривых различного радиуса, полученных по экспериментальным данным технического отдела Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской ДИ.

Для расчета бокового износа рельсов применяется формула, представленная в разд.2 Методики:

$$J_{\text{факт}}^{\text{бок}} = J_{\text{баз}}^{\text{бок}} \cdot K_p^{\text{бок}} \cdot K_{\text{п.с}}^{\text{бок}} \cdot K_{\text{луб.}}^{\text{бок}} \cdot K_{\text{н.у.}}^{\text{бок}} \cdot K_i^{\text{бок}} \cdot K_{\text{скр.}}^{\text{бок}}$$

Для примера рассмотрим первую кривую из табл. 1. Входными данными для расчета являются:

радиус кривой – 300 м;

возвышение наружного рельса – 105 мм;

вид уклона – спуск;

продольный уклон – 3,7 ‰;

средняя техническая скорость на участке – 43 км/ч;

тип скрепления – ЖБРШ-65;

категория рельса – ДТ-370ИК;

весовой коэффициент экипажей, эксплуатируемых на данном участке.

Тогда с учетом входных данных мы получим следующие значения коэффициентов и базовой интенсивности износа:

$J_{\text{баз}}^{\text{бок}}=0,1087$ – базовое значение интенсивности износа для $R=300$ м при возвышении $h=105$ мм;

$K_p^{\text{бок}} = 0,97$ – коэффициент, учитывающий тип скрепления;

$K_{\text{п.с.}}^{\text{инт.бок}}=1,01385$ – коэффициент, учитывающий тип подвижного состава (пример расчета см. Приложение 1 к Методике);

$K_{\text{луб.}}^{\text{бок}}=1$ – коэффициент, учитывающий лубрикацию (принимаем, что лубрикация не проводилась);

$K_i^{\text{бок}}=1,0354$ – коэффициент, учитывающий продольный профиль пути;

$K_{\text{скр.}}^{\text{бок}}=0,9908$ – коэффициент, учитывающий тип промежуточных скрепления;

$K_{\text{н.у.}}^{\text{бок}}=1,09587$ – коэффициент, учитывающий непогашенное ускорение, которое высчитывается по формуле

$$a_{\text{н.у.}} = \frac{V^2}{R} - \frac{gh}{S_p} = \frac{11,94^2}{300} - \frac{9,8 \cdot 0,105}{1,6} = 0,17$$

Таким образом, расчетное значение интенсивности бокового износа:

$$J_{\text{факт}}^{\text{бок}} = 0,1087 \cdot 0,97 \cdot 1,01385 \cdot 1 \cdot 1,09587 \cdot 1,0354 \cdot 0,9908 = 0,1202$$

Разность между расчетным и экспериментальным значениями интенсивности бокового износа:

$$\Delta = \left| \frac{0,1202}{0,1367} - 1 \right| * 100\% = 12,1\%$$

В таблице 1 приведены значения бокового износа рельсов в различных кривых участках пути по экспериментальным данным технического отдела Слюдянской дистанции пути Восточно-Сибирской ДИ, а также расчетные значения интенсивности износа и разность между ними. Как видно из таблицы разность между расчетной и фактической интенсивностью износа не превышает 20%.

Таблица 1 – Примеры расчетов

Радиус, м	Возвышение, мм	Вид уклона	Продольный уклон, ‰	Средняя техническая скорость по участку, км/ч	Тип скрепления	Категория рельса	Грузонапряженность, млн т брутто	Пропущенный тоннаж с последней смены рельса	Боковой износ, мм	Интенсивность бокового износа, мм/млн т брутто	Расчетная интенсивность износа, мм/млн т брутто	Разность между расчетной и фактической интенсивностью износа, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
300	105	Спуск	3,7	43	ЖБР-65	ДТ370ИК	169,5	117,0	16	0,1367	0,120	-12,1%
297	110	Спуск	3,3	43	ЖБРШ-65	ДТ370ИК	169,5	124,9	16,9	0,1353	0,125	-7,6%
297	105	Спуск	14,5	43	ЖБР-65	ДТ370ИК	169,5	111,9	17	0,1520	0,129	-15,1%
300	105	Спуск	16,8	43	ЖБР-65ПШМ	ДТ-70ИК	169,2	137,9	20,5	0,1487	0,125	-15,9%
297	110	Подъём	17,6	43	ЖБР-65ПШМ	ДТ370ИК	169,5	116,6	16	0,1373	0,13	-5,3%
293	110	Подъём	18,1	43	ЖБР-65ПШМ	ДТ370ИК	169,5	118,9	16	0,1346	0,13	-3,4%
300	105	Подъём	16	43	ЖБР-65ПШМ	ДТ370ИК	169,5	107,3	16	0,1492	0,124	-16,9%
296	110	Подъём	14,6	43	ЖБР-65ПШМ	ДТ370ИК	169,5	120,3	16	0,1330	0,129	-3,0%
293	110	Подъём	14,8	43	ЖБР-65ПШМ	ДТ370ИК	169,5	120,3	16	0,1330	0,129	-3,0%
300	105	Подъём	13,1	43	ЖБРШ-65	ДТ370ИК	169,5	150,0	15,8	0,1053	0,122	15,9%
300	105	Подъём	16,6	43	ЖБРШ-66	ДТ370ИК	169,5	150,0	18,8	0,1253	0,123	-1,8%
298	110	Подъём	15,1	43	ЖБРШ-65	ДТ370ИК	169,5	147,6	19	0,1287	0,128	-0,5%
300	105	Подъём	13,9	43	ЖБР-65ПШМ	ДТ350	169,5	142,4	17,3	0,1215	0,131	7,8%
300	105	Подъём	15,8	43	ЖБР-65ПШМ	ДТ350	169,5	145,8	17,8	0,1221	0,131	7,3%
296	110	Подъём	14,6	43	ЖБР-65ПШМ	ДТ350	169,5	134,7	16	0,1188	0,137	15,3%

Продолжение Таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
291	110	Подъём	16,3	43	ЖБР-65ПШМ	ДТ350	169,5	144,4	20	0,1385	0,137	-1,1%
295	110	Подъём	9,3	43	ЖБР-65ПШМ	ДТ350	169,5	135,1	18	0,1332	0,134	0,6%
293	110	Подъём	0,9	43	ЖБР-65ПШМ	ДТ350	169,5	128,5	17,7	0,1377	0,126	-8,5%
298	110	Спуск	2	43	ЖБРШ-65	ДТ350	169,5	133,7	16	0,1196	0,126	5,4%
297	110	Спуск	10,2	43	ЖБР-65	ДТ350	169,5	98,4	15,5	0,1574	0,14	-11,1%
294	110	Спуск	15,5	43	ЖБР-65	ДТ350	169,5	102,9	16	0,1555	0,143	-8,0%
300	105	Спуск	13,9	43	ЖБР-65	ДТ350	169,5	105,0	16	0,1525	0,136	-10,8%
300	105	Спуск	9,6	43	ЖБР-65	ДТ350	169,5	94,0	15	0,1595	0,133	-16,6%
297	110	Спуск	8,5	43	ЖБР-65	ДТ350	169,5	94,3	15	0,1591	0,138	-13,3%
300	105	Спуск	16,6	43	ЖБР-65ПШМ	ДТ350	169,2	134,9	15	0,1112	0,133	19,6%
298	105	Спуск	16,6	43	ЖБР-65ПШМ	ДТ350	169,2	120,1	17	0,1416	0,133	-6,1%
297	105	Спуск	16,6	43	ЖБР-65ПШМ	ДТ350	169,2	120,1	17	0,1416	0,133	-6,1%
603	35	Спуск	2,1	59	ЖБР-65	ДТ350	169,5	331,1	18	0,0544	0,044	-19,1%
500	50	Подъём	9,5	46	ЖБРШ-65	ДТ350	169,5	303,7	16	0,0527	0,058	10,1%
505	40	Спуск	11,4	58	ЖБР-65ПШМ	ДТ350	169,2	221,1	16	0,0724	0,059	-18,5%
397	70	Подъём	11,2	46	ЖБРШ-65	ДТ350	169,5	211,3	16	0,0757	0,08	5,7%
401	70	Подъём	13,7	70	ЖБРШ-65	ДТ350	169,5	208,5	16	0,0767	0,079	3,0%
597	30	Спуск	0,6	46	ЖБР-65ПШМ	ДТ370ИК	169,5	419,8	16	0,0381	0,037	-2,9%
597	30	Подъём	0,9	46	ЖБР-65ПШМ	ДТ370ИК	169,5	419,8	16	0,0381	0,037	-2,9%
495	50	Подъём	4,6	70	ЖБР-65ПШМ	ДТ370ИК	169,5	239,9	16	0,0667	0,069	3,4%

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Акт внедрения Программного обеспечения по методике прогнозирования износа рельсов разных категорий для разных эксплуатационных условий Московская ДИ, Голутвинская дистанция, ПЧ-7

Специализированная форма № ФОУ-26

		Форма по ОКУД	Код
Исполнитель	Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ») Банк: Филиал «Центральный» Банка ВТБ (ПАО) в г. Москве ИНН/КПП 502206713/502201001, ОКПО 93684924, ОГРН 1065022008116, 140-012, Московская обл., г. Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 410, корпус 30101810145	по ОКПО	0306839
		БЕ	
Заказчик	Управление пути и сооружений Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД» (наименование, реквизиты)	по ОКПО	
		БЕ	

АКТ

от «___» _____ 2022 г.

ввода в эксплуатацию Программы для ЭВМ «Программа расчёта интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации»
(наименование объекта)

По дополнительному соглашению № 1 от 11 мая 2021 г.
к договору от «10» июля 2020 г. № 3988963

работа «Разработка методик прогнозирования износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации», шифр работы П.267, категория НИР

Мы, нижеподписавшиеся, представители исполнителя в лице заместителя генерального директора по научной работе АО «ВНИКТИ» Лунина Андрея Александровича и представителя ПЧ-7 Московской ДИ в лице начальника Голутвинской дистанции пути Потапова Михаила Николаевича составили настоящий акт в том, что Программа для ЭВМ «Программа расчёта интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации» введена в эксплуатацию в ПЧ-7 Московской ДИ.

Приложение:

Программа для ЭВМ «Программа расчёта интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации»

От АО «ВНИКТИ»

Зам. генерального директора
по научной работе_____
А.А. Лунин

Зав. отделом пути и СПС

О.Г. Краснов

Зав. лабораторией

Г.С. Ноздрачев

От ПЧ-7 Московской ДИ

Начальник Голутвинской дистанции пути

М.Н. ПотаповНачальник ПТО Голутвинской дистанции
пути_____
А.В. Русанова

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Акт внедрения Программного обеспечения по методике прогнозирования износа рельсов разных категорий для разных эксплуатационных условий, Рязанская дистанция ПЧ-39 Московская ДИ

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Акт внедрения Программного обеспечения по методике прогнозирования износа рельсов разных категорий для разных эксплуатационных условий. Восточно-Сибирская ДИ, Слюдянская дистанция, ПЧ-9

Специализированная форма № ФОРМ-26

		Код
	Форма по ОКУД	0306839
	по ОКПО	
Исполнитель	Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ») Банк: Филиал «Центральный» Банка ВТБ (ПАО) в г. Москве ИНН/КПП 5022067103/502201001, ОКПО 93684924, ОГРН 1065022008116, 140402, Московская обл., г. Коломна, ул. Октябрьской революции, д.410, р/с 40702810320270000011 корр/с 30101810145250000411, БИК 044525411	БЕ
Заказчик	Управление пути и сооружений Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД»	по ОКПО
		БЕ
(наименование, реквизиты)		
(подразделение-балансодержатель)		

АКТ

от « » 2022 г.

ввода в эксплуатацию Программы для ЭВМ «Программа расчёта интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации»
(наименование объекта)

По дополнительному соглашению № 1 от 11 мая 2021 г.
к договору от «10» июля 2020 г. № 3988963

работа «Разработка методики прогнозирования износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации», шифр работы 11.267, категория НИР

Мы, нижеподписавшиеся, представители исполнителя в лице заместителя генерального директора по научной работе АО «ВНИКТИ» Лунина Андрея Александровича и представителя ПЧ-9 Восточно-Сибирской ДИ в лице начальника Слюдянской дистанции пути Симоненко Игоря Николаевича составили настоящий акт в том, что Программа для ЭВМ «Программа расчёта интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации» введена в эксплуатацию в ПЧ-9 Восточно-Сибирской ДИ.

Приложение:

Программа для ЭВМ «Программа расчёта интенсивности износа рельсов различных категорий качества в зависимости от условий эксплуатации»

От АО «ВНИКТИ»

Заместитель генерального директора
по научной работе

А.А. Лунин

Заведующий отделом пути и СПС

О.Г. Краснов

М.П.

От ПЧ-9 Восточно-Сибирской ДИ

Начальник Слюдянской дистанции
пути

И.Н. Симоненко

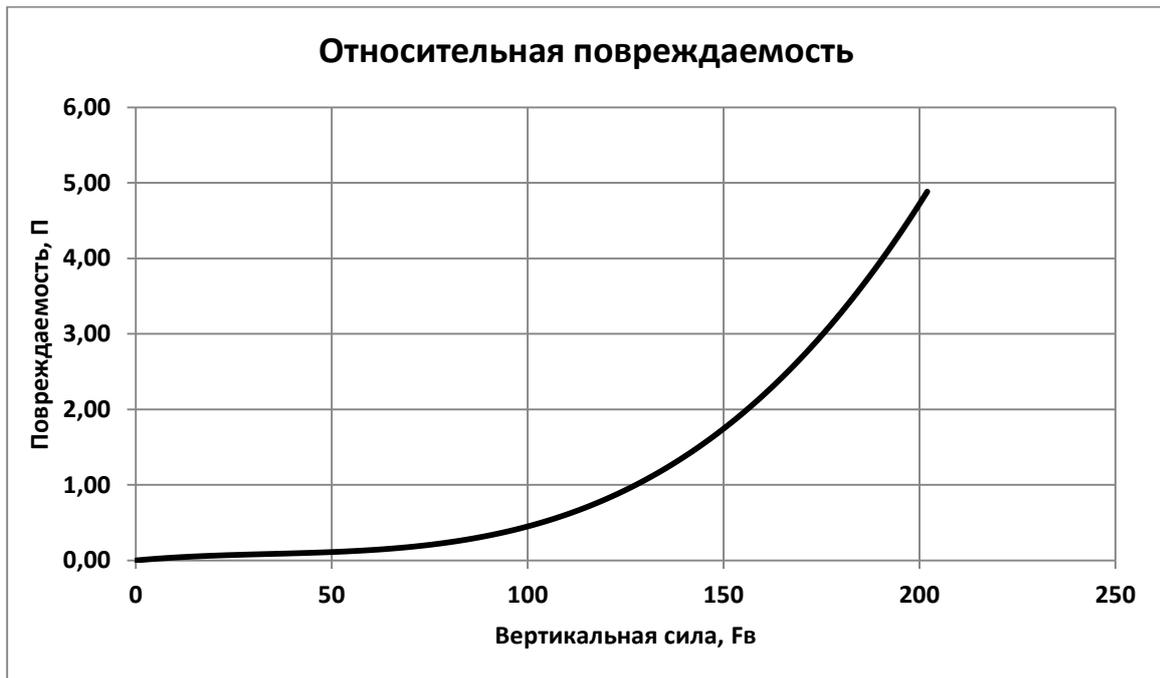
Начальник ПТО Слюдянской дистанции
пути

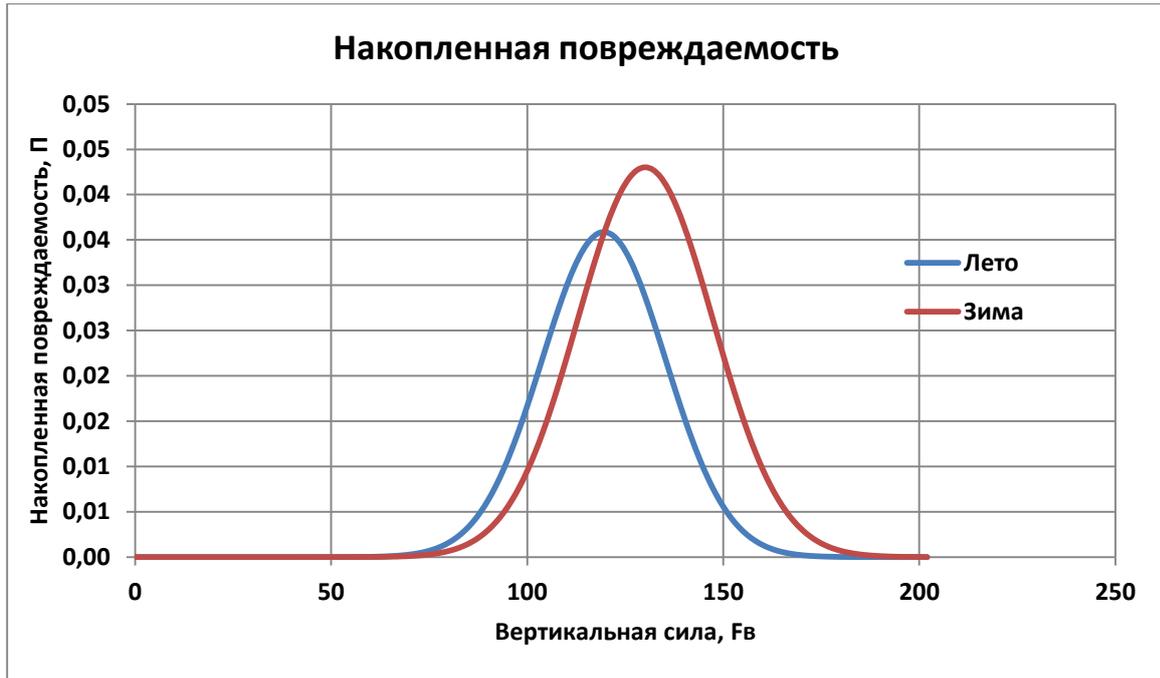
В.А. Малыгин

М.П.

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Расчет эквивалентной нагрузки и интегральной повреждаемости рельсов для условий Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ»





Лето						
F _в	P(F _в)	Π(F _в)	ΠΣ		F _в *P(F _в)	ΣF _в *P(F _в)
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,71014	0,00000	112,28000
2	0,00000	0,00921	0,00000		0,00000	
4	0,00000	0,01766	0,00000		0,00000	
6	0,00000	0,02541	0,00000		0,00000	
8	0,00000	0,03250	0,00000		0,00000	
10	0,00000	0,03897	0,00000		0,00000	
12	0,00000	0,04488	0,00000		0,00000	
14	0,00000	0,05026	0,00000		0,00000	
16	0,00000	0,05517	0,00000		0,00000	
18	0,00000	0,05966	0,00000		0,00000	
20	0,00000	0,06376	0,00000		0,00000	
22	0,00000	0,06753	0,00000		0,00000	
24	0,00000	0,07101	0,00000		0,00000	
26	0,00000	0,07425	0,00000		0,00000	
28	0,00000	0,07729	0,00000		0,00000	
30	0,00000	0,08019	0,00000		0,00000	
32	0,00000	0,08298	0,00000		0,00001	
34	0,00000	0,08572	0,00000		0,00001	
36	0,00000	0,08846	0,00000		0,00002	
38	0,00000	0,09123	0,00000		0,00005	
40	0,00000	0,09408	0,00000	0,00008		
F _в	P(F _в)	Π(F _в)	ΠΣ		F _в *P(F _в)	ΣF _в *P(F _в)
42	0,00000	0,09707	0,00000		0,00015	

44	0,00001	0,10023	0,00000		0,00027	
46	0,00001	0,10362	0,00000		0,00048	
48	0,00002	0,10727	0,00000		0,00083	
50	0,00003	0,11125	0,00000		0,00141	
52	0,00005	0,11559	0,00001		0,00235	
54	0,00007	0,12034	0,00001		0,00385	
56	0,00011	0,12555	0,00001		0,00621	
58	0,00017	0,13126	0,00002		0,00984	
60	0,00026	0,13752	0,00004		0,01535	
62	0,00038	0,14438	0,00005		0,02355	
64	0,00056	0,15188	0,00008		0,03554	
66	0,00080	0,16007	0,00013		0,05276	
68	0,00113	0,16900	0,00019		0,07706	
70	0,00158	0,17871	0,00028		0,11073	
72	0,00217	0,18925	0,00041		0,15656	
74	0,00294	0,20067	0,00059		0,21779	
76	0,00392	0,21301	0,00084		0,29811	
78	0,00515	0,22632	0,00117		0,40154	
80	0,00665	0,24064	0,00160		0,53224	
82	0,00847	0,25603	0,00217		0,69425	
84	0,01061	0,27252	0,00289		0,89120	
86	0,01309	0,29017	0,00380		1,12589	
88	0,01591	0,30903	0,00492		1,39986	
90	0,01903	0,32913	0,00626		1,71300	
92	0,02243	0,35053	0,00786		2,06310	
94	0,02602	0,37327	0,00971		2,44560	
96	0,02972	0,39739	0,01181		2,85339	
98	0,03344	0,42296	0,01414		3,27684	
100	0,03704	0,45000	0,01667		3,70402	
102	0,04040	0,47857	0,01934		4,12121	
104	0,04340	0,50872	0,02208		4,51353	
106	0,04590	0,54049	0,02481		4,86578	
108	0,04781	0,57392	0,02744		5,16347	
110	0,04903	0,60907	0,02986		5,39371	
112	0,04952	0,64598	0,03199		5,54622	
114	0,04925	0,68470	0,03372		5,61402	
116	0,04822	0,72527	0,03498		5,59402	
118	0,04650	0,76774	0,03570		5,48721	
120	0,04415	0,81216	0,03586		5,29859	
122	0,04129	0,85857	0,03545		5,03681	
124	0,03801	0,90703	0,03448		4,71346	
126	0,03446	0,95756	0,03300		4,34229	

FB	P(FB)	Π(FB)	ΠΣ	FB*P(FB)	ΣFB*P(FB)
----	-------	-------	----	----------	-----------

128	0,03077	1,01024	0,03108		3,93816	
130	0,02705	1,06509	0,02881		3,51617	
132	0,02341	1,12217	0,02627		3,09064	
134	0,01996	1,18152	0,02358		2,67445	
136	0,01675	1,24319	0,02083		2,27841	
138	0,01385	1,30723	0,01810		1,91091	
140	0,01127	1,37368	0,01548		1,57784	
142	0,00903	1,44259	0,01303		1,28264	
144	0,00713	1,51400	0,01079		1,02652	
146	0,00554	1,58797	0,00880		0,80882	
148	0,00424	1,66454	0,00706		0,62742	
150	0,00319	1,74375	0,00557		0,47918	
152	0,00237	1,82565	0,00433		0,36030	
154	0,00173	1,91030	0,00331		0,26672	
156	0,00125	1,99772	0,00249		0,19440	
158	0,00088	2,08798	0,00184		0,13949	
160	0,00062	2,18112	0,00134		0,09855	
162	0,00042	2,27718	0,00096		0,06855	
164	0,00029	2,37622	0,00068		0,04694	
166	0,00019	2,47827	0,00047		0,03165	
168	0,00013	2,58338	0,00032		0,02101	
170	0,00008	2,69161	0,00022		0,01373	
172	0,00005	2,80299	0,00014		0,00884	
174	0,00003	2,91758	0,00009		0,00560	
176	0,00002	3,03542	0,00006		0,00349	
178	0,00001	3,15656	0,00004		0,00215	
180	0,00001	3,28104	0,00002		0,00130	
182	0,00000	3,40891	0,00001		0,00077	
184	0,00000	3,54022	0,00001		0,00045	
186	0,00000	3,67501	0,00001		0,00026	
188	0,00000	3,81333	0,00000		0,00015	
190	0,00000	3,95523	0,00000		0,00008	
192	0,00000	4,10075	0,00000		0,00005	
194	0,00000	4,24994	0,00000		0,00002	
196	0,00000	4,40285	0,00000		0,00001	
198	0,00000	4,55952	0,00000		0,00001	
200	0,00000	4,72000	0,00000		0,00000	
202	0,00000	4,88434	0,00000		0,00000	

FB	P(FB)	Π(FB)	ΠΣ		FB*P(FB)	ΣFB*P(FB)
0	0,00000	0,00000	0,00000	0,93465	0,00000	121,81915
2	0,00000	0,00921	0,00000		0,00000	
4	0,00000	0,01766	0,00000		0,00000	
6	0,00000	0,02541	0,00000		0,00000	
8	0,00000	0,03250	0,00000		0,00000	
10	0,00000	0,03897	0,00000		0,00000	
12	0,00000	0,04488	0,00000		0,00000	
14	0,00000	0,05026	0,00000		0,00000	
16	0,00000	0,05517	0,00000		0,00000	
18	0,00000	0,05966	0,00000		0,00000	
20	0,00000	0,06376	0,00000		0,00000	
22	0,00000	0,06753	0,00000		0,00000	
24	0,00000	0,07101	0,00000		0,00000	
26	0,00000	0,07425	0,00000		0,00000	
28	0,00000	0,07729	0,00000		0,00000	
30	0,00000	0,08019	0,00000		0,00000	
32	0,00000	0,08298	0,00000		0,00000	
34	0,00000	0,08572	0,00000		0,00001	
36	0,00000	0,08846	0,00000		0,00001	
38	0,00000	0,09123	0,00000		0,00003	
40	0,00000	0,09408	0,00000		0,00004	
42	0,00000	0,09707	0,00000		0,00008	
44	0,00000	0,10023	0,00000		0,00014	
46	0,00001	0,10362	0,00000		0,00023	
48	0,00001	0,10727	0,00000		0,00039	
50	0,00001	0,11125	0,00000		0,00064	
52	0,00002	0,11559	0,00000		0,00104	
54	0,00003	0,12034	0,00000		0,00167	
56	0,00005	0,12555	0,00001	0,00264		
58	0,00007	0,13126	0,00001	0,00412		
60	0,00011	0,13752	0,00001	0,00634		
62	0,00016	0,14438	0,00002	0,00964		
64	0,00023	0,15188	0,00003	0,01444		
66	0,00032	0,16007	0,00005	0,02134		
68	0,00046	0,16900	0,00008	0,03111		
70	0,00064	0,17871	0,00011	0,04475		
72	0,00088	0,18925	0,00017	0,06350		
74	0,00120	0,20067	0,00024	0,08891		
76	0,00162	0,21301	0,00034	0,12284		
78	0,00215	0,22632	0,00049	0,16745		

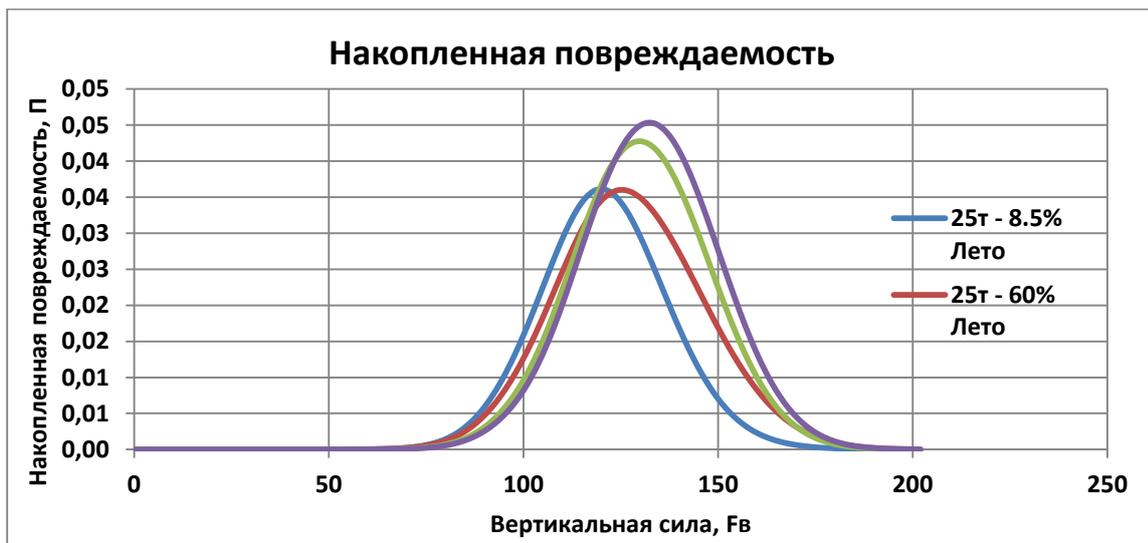
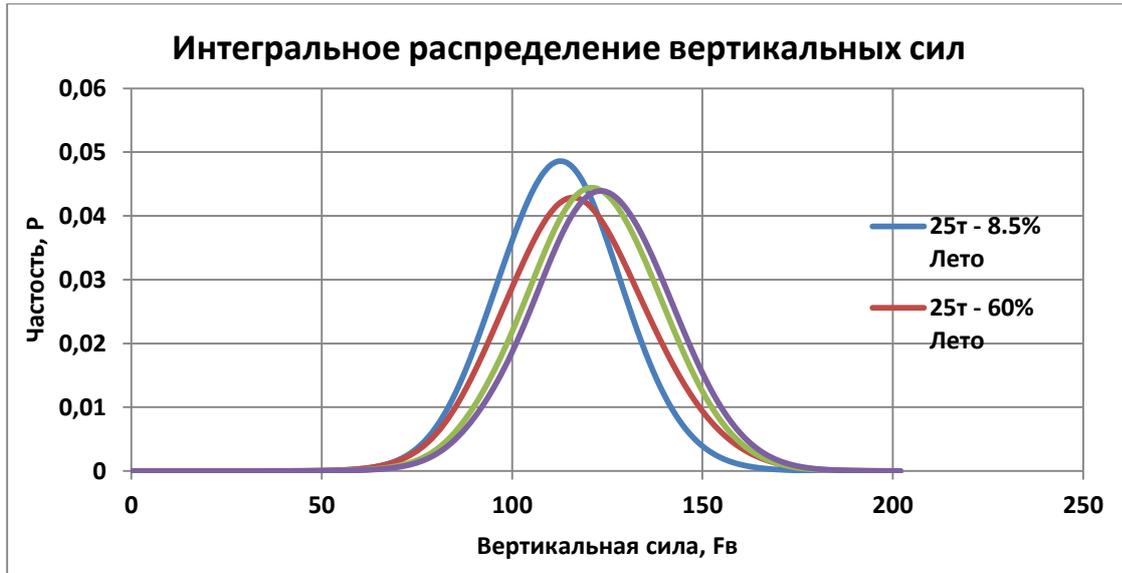
FB	P(FB)	Π(FB)	ΠΣ	FB*P(FB)	ΣFB*P(FB)
80	0,00282	0,24064	0,00068	0,22525	

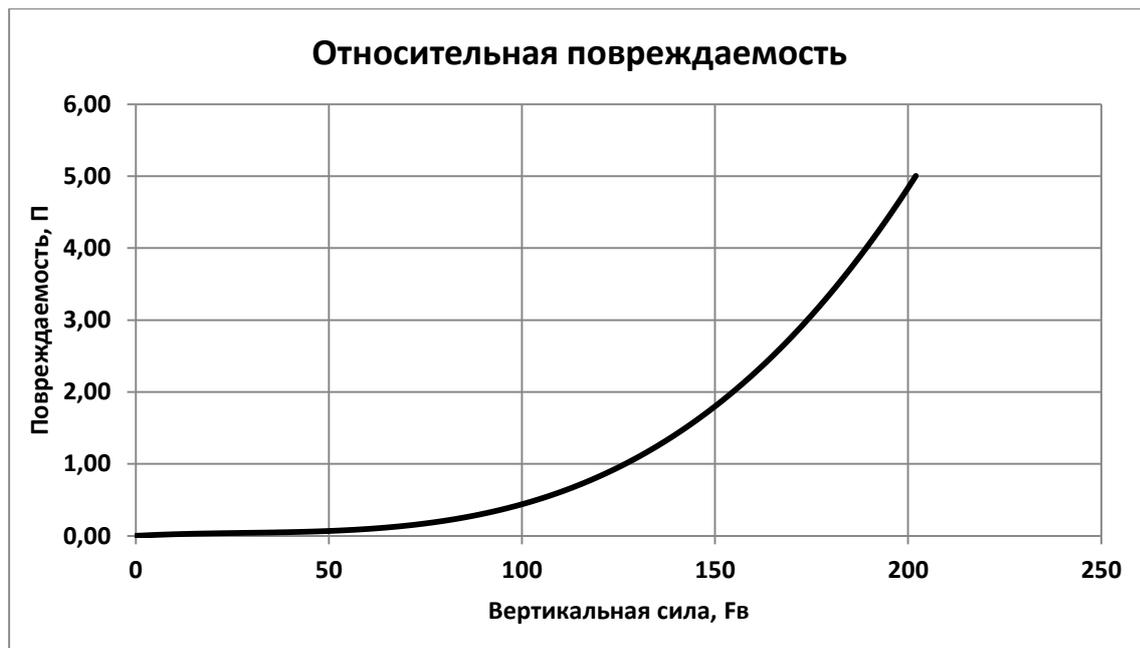
82	0,00365	0,25603	0,00093		0,29900	
84	0,00466	0,27252	0,00127		0,39167	
86	0,00589	0,29017	0,00171		0,50632	
88	0,00734	0,30903	0,00227		0,64593	
90	0,00904	0,32913	0,00297		0,81325	
92	0,01098	0,35053	0,00385		1,01052	
94	0,01318	0,37327	0,00492		1,23925	
96	0,01562	0,39739	0,00621		1,49994	
98	0,01828	0,42296	0,00773		1,79185	
100	0,02113	0,45000	0,00951		2,11273	
102	0,02411	0,47857	0,01154		2,45875	
104	0,02716	0,50872	0,01382		2,82433	
106	0,03021	0,54049	0,01633		3,20224	
108	0,03318	0,57392	0,01904		3,58374	
110	0,03599	0,60907	0,02192		3,95885	
112	0,03854	0,64598	0,02490		4,31675	
114	0,04076	0,68470	0,02791		4,64627	
116	0,04256	0,72527	0,03086		4,93648	
118	0,04388	0,76774	0,03368		5,17726	
120	0,04467	0,81216	0,03628		5,35989	
122	0,04490	0,85857	0,03855		5,47760	
124	0,04456	0,90703	0,04042		5,52594	
126	0,04368	0,95756	0,04182		5,50311	
128	0,04227	1,01024	0,04270		5,41002	
130	0,04039	1,06509	0,04302		5,25028	
132	0,03811	1,12217	0,04276		5,02993	
134	0,03550	1,18152	0,04194		4,75708	
136	0,03266	1,24319	0,04060		4,44140	
138	0,02966	1,30723	0,03878		4,09360	
140	0,02661	1,37368	0,03655		3,72475	
142	0,02356	1,44259	0,03399		3,34580	
144	0,02060	1,51400	0,03119		2,96698	
146	0,01779	1,58797	0,02825		2,59743	
148	0,01517	1,66454	0,02525		2,24487	
150	0,01277	1,74375	0,02227		1,91539	
152	0,01061	1,82565	0,01938		1,61341	
154	0,00871	1,91030	0,01664		1,34170	
156	0,00706	1,99772	0,01411		1,10152	
158	0,00565	2,08798	0,01180		0,89280	
160	0,00447	2,18112	0,00974		0,71441	
162	0,00348	2,27718	0,00793		0,56438	
164	0,00268	2,37622	0,00638		0,44018	
FB	P(FB)	Π(FB)		ΠΣ	FB*P(FB)	ΣFB*P(FB)
166	0,00204	2,47827	0,00506		0,33894	

168	0,00153	2,58338	0,00396		0,25766	
170	0,00114	2,69161	0,00306		0,19338	
172	0,00083	2,80299	0,00234		0,14329	
174	0,00060	2,91758	0,00176		0,10482	
176	0,00043	3,03542	0,00131		0,07571	
178	0,00030	3,15656	0,00096		0,05398	
180	0,00021	3,28104	0,00069		0,03800	
182	0,00015	3,40891	0,00049		0,02641	
184	0,00010	3,54022	0,00035		0,01813	
186	0,00007	3,67501	0,00024		0,01228	
188	0,00004	3,81333	0,00017		0,00821	
190	0,00003	3,95523	0,00011		0,00542	
192	0,00002	4,10075	0,00008		0,00354	
194	0,00001	4,24994	0,00005		0,00228	
196	0,00001	4,40285	0,00003		0,00145	
198	0,00000	4,55952	0,00002		0,00091	
200	0,00000	4,72000	0,00001		0,00056	
202	0,00000	4,88434	0,00000		0,00000	

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

Расчет эквивалентной нагрузки и относительной повреждаемости рельсов при 9% и 64% грузовых вагонов с осевой нагрузкой 245 кН в суточном пакете поездов в летних и зимних условиях пути в границах Зиловской дистанции пути Забайкальской ДИ





245кН - 9% Лето							
п	F _в	P(F _в)	Π(F _в)	ΠΣ		F _в *P(F _в)	ΣF _в *P(F _в)
1	0	3,32E-11	0,00000	0,00000	0,72690	0,00000	112,61054
2	2	6,59E-11	0,00548	0,00000		0,00000	
3	4	1,3E-10	0,01039	0,00000		0,00000	
4	6	2,54E-10	0,01478	0,00000		0,00000	
5	8	4,92E-10	0,01869	0,00000		0,00000	
6	10	9,46E-10	0,02217	0,00000		0,00000	
7	12	1,8E-09	0,02525	0,00000		0,00000	
8	14	3,39E-09	0,02798	0,00000		0,00000	
9	16	6,33E-09	0,03040	0,00000		0,00000	
10	18	1,17E-08	0,03257	0,00000		0,00000	
11	20	2,13E-08	0,03452	0,00000		0,00000	
12	22	3,84E-08	0,03630	0,00000		0,00000	
13	24	6,86E-08	0,03794	0,00000		0,00000	
14	26	1,21E-07	0,03951	0,00000		0,00000	
15	28	2,11E-07	0,04103	0,00000		0,00001	
16	30	3,63E-07	0,04256	0,00000		0,00001	
17	32	6,17E-07	0,04413	0,00000		0,00002	
18	34	1,04E-06	0,04579	0,00000		0,00004	
19	36	1,72E-06	0,04759	0,00000		0,00006	
20	38	2,83E-06	0,04956	0,00000		0,00011	
21	40	4,6E-06	0,05176	0,00000		0,00018	
22	42	7,38E-06	0,05422	0,00000		0,00031	
23	44	1,17E-05	0,05700	0,00000		0,00052	
24	46	1,84E-05	0,06013	0,00000		0,00085	

n	F _B	P(F _B)	Π(F _B)	ΠΣ	F _B *P(F _B)	ΣF _B *P(F _B)
25	48	2,85E-05	0,06366	0,00000	0,00137	
26	50	4,37E-05	0,06763	0,00000	0,00219	
27	52	6,63E-05	0,07208	0,00000	0,00345	
28	54	9,94E-05	0,07707	0,00001	0,00537	
29	56	0,000147	0,08262	0,00001	0,00825	
30	58	0,000216	0,08880	0,00002	0,01253	
31	60	0,000314	0,09564	0,00003	0,01882	
32	62	0,00045	0,10318	0,00005	0,02790	
33	64	0,000638	0,11148	0,00007	0,04084	
34	66	0,000895	0,12056	0,00011	0,05906	
35	68	0,001241	0,13049	0,00016	0,08439	
36	70	0,001702	0,14130	0,00024	0,11912	
37	72	0,002307	0,15303	0,00035	0,16609	
38	74	0,00309	0,16573	0,00051	0,22865	
39	76	0,004087	0,17944	0,00073	0,31065	
40	78	0,005336	0,19421	0,00104	0,41622	
41	80	0,006869	0,21008	0,00144	0,54952	
42	82	0,008711	0,22710	0,00198	0,71434	
43	84	0,010877	0,24530	0,00267	0,91364	
44	86	0,013362	0,26474	0,00354	1,14912	
45	88	0,016146	0,28545	0,00461	1,42086	
46	90	0,019191	0,30749	0,00590	1,72720	
47	92	0,022443	0,33088	0,00743	2,06476	
48	94	0,025837	0,35569	0,00919	2,42866	
49	96	0,029299	0,38195	0,01119	2,81270	
50	98	0,03275	0,40970	0,01342	3,20946	
51	100	0,036103	0,43900	0,01585	3,61030	
52	102	0,039266	0,46988	0,01845	4,00511	
53	104	0,042136	0,50239	0,02117	4,38216	
54	106	0,044606	0,53657	0,02393	4,72819	
55	108	0,046564	0,57246	0,02666	5,02887	
56	110	0,047907	0,61012	0,02923	5,26979	
57	112	0,048552	0,64957	0,03154	5,43784	
58	114	0,048446	0,69088	0,03347	5,52284	
59	116	0,047576	0,73408	0,03492	5,51885	
60	118	0,045976	0,77921	0,03582	5,42517	
61	120	0,043721	0,82632	0,03613	5,24652	
62	122	0,040922	0,87545	0,03583	4,99248	
63	124	0,037713	0,92666	0,03495	4,67641	
64	126	0,034237	0,97997	0,03355	4,31387	
65	128	0,030634	1,03544	0,03172	3,92113	
66	130	0,027029	1,09311	0,02955	3,51383	
67	132	0,02353	1,15301	0,02713	3,10594	

n	F _B	P(F _B)	Π(F _B)	ΠΣ	F _B *P(F _B)	ΣF _B *P(F _B)
68	134	0,020218	1,21521	0,02457	2,70920	
69	136	0,017154	1,27974	0,02195	2,33289	
70	138	0,014375	1,34664	0,01936	1,98380	
71	140	0,011903	1,41596	0,01685	1,66641	
72	142	0,009741	1,48774	0,01449	1,38318	
73	144	0,007881	1,56203	0,01231	1,13483	
74	146	0,006306	1,63887	0,01033	0,92067	
75	148	0,004993	1,71830	0,00858	0,73891	
76	150	0,003913	1,80038	0,00705	0,58698	
77	152	0,003038	1,88513	0,00573	0,46180	
78	154	0,002338	1,97261	0,00461	0,36005	
79	156	0,001785	2,06286	0,00368	0,27840	
80	158	0,001352	2,15592	0,00292	0,21363	
81	160	0,001018	2,25184	0,00229	0,16282	
82	162	0,000761	2,35066	0,00179	0,12332	
83	164	0,000566	2,45243	0,00139	0,09290	
84	166	0,000419	2,55719	0,00107	0,06963	
85	168	0,000309	2,66498	0,00082	0,05195	
86	170	0,000227	2,77585	0,00063	0,03859	
87	172	0,000166	2,88983	0,00048	0,02855	
88	174	0,000121	3,00699	0,00036	0,02103	
89	176	8,76E-05	3,12735	0,00027	0,01542	
90	178	6,32E-05	3,25097	0,00021	0,01126	
91	180	4,54E-05	3,37788	0,00015	0,00818	
92	182	3,24E-05	3,50813	0,00011	0,00590	
93	184	2,3E-05	3,64177	0,00008	0,00424	
94	186	1,62E-05	3,77884	0,00006	0,00302	
95	188	1,14E-05	3,91938	0,00004	0,00214	
96	190	7,91E-06	4,06344	0,00003	0,00150	
97	192	5,46E-06	4,21105	0,00002	0,00105	
98	194	3,73E-06	4,36227	0,00002	0,00072	
99	196	2,53E-06	4,51714	0,00001	0,00050	
100	198	1,7E-06	4,67570	0,00001	0,00034	
101	200	1,13E-06	4,83800	0,00001	0,00023	
102	202	5,22E-22	5,00408	0,00000	0,00000	

245кН - 64% Лето						
F _B	P(F _B)	Π(F _B)	ΠΣ		F _B *P(F _B)	ΣF _B *P(F _B)
0	1,53E-10	0,00000	0,00000	0,84907	0,00000	117,15813
2	2,89E-10	0,00548	0,00000		0,00000	
4	5,4E-10	0,01039	0,00000		0,00000	
6	1E-09	0,01478	0,00000		0,00000	
8	1,83E-09	0,01869	0,00000		0,00000	
10	3,33E-09	0,02217	0,00000		0,00000	
12	6E-09	0,02525	0,00000		0,00000	
14	1,07E-08	0,02798	0,00000		0,00000	
16	1,89E-08	0,03040	0,00000		0,00000	
18	3,3E-08	0,03257	0,00000		0,00000	
20	5,72E-08	0,03452	0,00000		0,00000	
22	9,8E-08	0,03630	0,00000		0,00000	
24	1,66E-07	0,03794	0,00000		0,00000	
26	2,79E-07	0,03951	0,00000		0,00001	
28	4,63E-07	0,04103	0,00000		0,00001	
30	7,61E-07	0,04256	0,00000		0,00002	
32	1,24E-06	0,04413	0,00000		0,00004	
34	1,99E-06	0,04579	0,00000		0,00007	
36	3,16E-06	0,04759	0,00000		0,00011	
38	4,97E-06	0,04956	0,00000		0,00019	
40	7,72E-06	0,05176	0,00000		0,00031	
42	1,19E-05	0,05422	0,00000		0,00050	
44	1,8E-05	0,05700	0,00000		0,00079	
46	2,71E-05	0,06013	0,00000		0,00125	
48	4,03E-05	0,06366	0,00000		0,00194	
50	5,93E-05	0,06763	0,00000		0,00297	
52	8,63E-05	0,07208	0,00001		0,00449	
54	0,000124	0,07707	0,00001		0,00671	
56	0,000177	0,08262	0,00001		0,00990	
58	0,000249	0,08880	0,00002		0,01445	
60	0,000348	0,09564	0,00003		0,02089	
62	0,000481	0,10318	0,00005		0,02983	
64	0,000659	0,11148	0,00007	0,04215		
66	0,000893	0,12056	0,00011	0,05894		
68	0,0012	0,13049	0,00016	0,08159		
70	0,001598	0,14130	0,00023	0,11186		
72	0,002109	0,15303	0,00032	0,15187		
74	0,002759	0,16573	0,00046	0,20414		
76	0,003573	0,17944	0,00064	0,27155		
78	0,004579	0,19421	0,00089	0,35719		
80	0,005802	0,21008	0,00122	0,46416		
82	0,007259	0,22710	0,00165	0,59521		

FB	P(FB)	Π(FB)	ΠΣ	FB*P(FB)	ΣFB*P(FB)
84	0,008958	0,24530	0,00220	0,75246	
86	0,010896	0,26474	0,00288	0,93704	
88	0,013056	0,28545	0,00373	1,14893	
90	0,015411	0,30749	0,00474	1,38701	
92	0,017926	0,33088	0,00593	1,64917	
94	0,02056	0,35569	0,00731	1,93268	
96	0,023275	0,38195	0,00889	2,23443	
98	0,02603	0,40970	0,01066	2,55097	
100	0,028783	0,43900	0,01264	2,87831	
102	0,031485	0,46988	0,01479	3,21148	
104	0,034077	0,50239	0,01712	3,54399	
106	0,036486	0,53657	0,01958	3,86750	
108	0,038628	0,57246	0,02211	4,17184	
110	0,040414	0,61012	0,02466	4,44559	
112	0,04176	0,64957	0,02713	4,67717	
114	0,042598	0,69088	0,02943	4,85612	
116	0,042883	0,73408	0,03148	4,97448	
118	0,042608	0,77921	0,03320	5,02771	
120	0,041793	0,82632	0,03453	5,01515	
122	0,04049	0,87545	0,03545	4,93980	
124	0,038771	0,92666	0,03593	4,80764	
126	0,036719	0,97997	0,03598	4,62663	
128	0,034419	1,03544	0,03564	4,40567	
130	0,031952	1,09311	0,03493	4,15380	
132	0,02939	1,15301	0,03389	3,87952	
134	0,026795	1,21521	0,03256	3,59057	
136	0,024219	1,27974	0,03099	3,29380	
138	0,021704	1,34664	0,02923	2,99521	
140	0,019286	1,41596	0,02731	2,70002	
142	0,016991	1,48774	0,02528	2,41274	
144	0,014842	1,56203	0,02318	2,13719	
146	0,012853	1,63887	0,02106	1,87648	
148	0,011034	1,71830	0,01896	1,63302	
150	0,00939	1,80038	0,01691	1,40855	
152	0,007922	1,88513	0,01493	1,20409	
154	0,006624	1,97261	0,01307	1,02009	
156	0,00549	2,06286	0,01132	0,85640	
158	0,004509	2,15592	0,00972	0,71245	
160	0,00367	2,25184	0,00827	0,58727	
162	0,002961	2,35066	0,00696	0,47961	
164	0,002366	2,45243	0,00580	0,38804	
166	0,001873	2,55719	0,00479	0,31099	

F _B	P(F _B)	Π(F _B)	ΠΣ	F _B *P(F _B)	ΣF _B *P(F _B)
168	0,00147	2,66498	0,00392	0,24688	
170	0,001142	2,77585	0,00317	0,19410	
172	0,000879	2,88983	0,00254	0,15113	
174	0,00067	3,00699	0,00201	0,11652	
176	0,000505	3,12735	0,00158	0,08895	
178	0,000378	3,25097	0,00123	0,06723	
180	0,000279	3,37788	0,00094	0,05031	
182	0,000205	3,50813	0,00072	0,03727	
184	0,000149	3,64177	0,00054	0,02733	
186	0,000107	3,77884	0,00040	0,01984	
188	7,58E-05	3,91938	0,00030	0,01425	
190	5,33E-05	4,06344	0,00022	0,01013	
192	3,72E-05	4,21105	0,00016	0,00713	
194	2,56E-05	4,36227	0,00011	0,00497	
196	1,75E-05	4,51714	0,00008	0,00343	
198	1,18E-05	4,67570	0,00006	0,00234	
200	7,89E-06	4,83800	0,00004	0,00158	
202	5,22E-22	5,00408	0,00000	0,00000	

245кН - 9% Зима						
F _B	P(F _B)	Π(F _B)	ΠΣ		F _B *P(F _B)	ΣF _B *P(F _B)
0	1,47E-11	0,00000	0,00000	0,94058	0,00000	121,33295
2	3,16E-11	0,00548	0,00000		0,00000	
4	6,7E-11	0,01039	0,00000		0,00000	
6	1,39E-10	0,01478	0,00000		0,00000	
8	2,86E-10	0,01869	0,00000		0,00000	
10	5,76E-10	0,02217	0,00000		0,00000	
12	1,14E-09	0,02525	0,00000		0,00000	
14	2,23E-09	0,02798	0,00000		0,00000	
16	4,28E-09	0,03040	0,00000		0,00000	
18	8,07E-09	0,03257	0,00000		0,00000	
20	1,5E-08	0,03452	0,00000		0,00000	
22	2,74E-08	0,03630	0,00000		0,00000	
24	4,94E-08	0,03794	0,00000		0,00000	
26	8,75E-08	0,03951	0,00000		0,00000	
28	1,53E-07	0,04103	0,00000		0,00000	
30	2,62E-07	0,04256	0,00000		0,00001	
32	4,43E-07	0,04413	0,00000		0,00001	
34	7,38E-07	0,04579	0,00000		0,00003	
36	1,21E-06	0,04759	0,00000		0,00004	
38	1,96E-06	0,04956	0,00000		0,00007	
40	3,12E-06	0,05176	0,00000		0,00012	

FB	P(FB)	Π(FB)	ΠΣ	FB*P(FB)	ΣFB*P(FB)
42	4,9E-06	0,05422	0,00000	0,00021	
44	7,6E-06	0,05700	0,00000	0,00033	
46	1,16E-05	0,06013	0,00000	0,00053	
48	1,75E-05	0,06366	0,00000	0,00084	
50	2,61E-05	0,06763	0,00000	0,00131	
52	3,85E-05	0,07208	0,00000	0,00200	
54	5,6E-05	0,07707	0,00000	0,00302	
56	8,06E-05	0,08262	0,00001	0,00451	
58	0,000115	0,08880	0,00001	0,00665	
60	0,000162	0,09564	0,00002	0,00973	
62	0,000227	0,10318	0,00002	0,01406	
64	0,000315	0,11148	0,00004	0,02013	
66	0,000433	0,12056	0,00005	0,02858	
68	0,000592	0,13049	0,00008	0,04027	
70	0,000805	0,14130	0,00011	0,05634	
72	0,001087	0,15303	0,00017	0,07825	
74	0,001458	0,16573	0,00024	0,10786	
76	0,001939	0,17944	0,00035	0,14740	
78	0,002557	0,19421	0,00050	0,19941	
80	0,003333	0,21008	0,00070	0,26662	
82	0,00429	0,22710	0,00097	0,35174	
84	0,005443	0,24530	0,00134	0,45721	
86	0,006802	0,26474	0,00180	0,58501	
88	0,00837	0,28545	0,00239	0,73656	
90	0,010142	0,30749	0,00312	0,91281	
92	0,012113	0,33088	0,00401	1,11439	
94	0,014275	0,35569	0,00508	1,34186	
96	0,016623	0,38195	0,00635	1,59585	
98	0,019152	0,40970	0,00785	1,87691	
100	0,02185	0,43900	0,00959	2,18502	
102	0,024695	0,46988	0,01160	2,51889	
104	0,027645	0,50239	0,01389	2,87506	
106	0,030635	0,53657	0,01644	3,24729	
108	0,033576	0,57246	0,01922	3,62626	
110	0,036363	0,61012	0,02219	3,99997	
112	0,038881	0,64957	0,02526	4,35469	
114	0,04102	0,69088	0,02834	4,67630	
116	0,042688	0,73408	0,03134	4,95175	
118	0,043816	0,77921	0,03414	5,17034	
120	0,044371	0,82632	0,03666	5,32451	
122	0,044345	0,87545	0,03882	5,41010	
124	0,043759	0,92666	0,04055	5,42618	

FB	P(FB)	Π(FB)	ΠΣ	FB*P(FB)	ΣFB*P(FB)
126	0,042655	0,97997	0,04180	5,37451	
128	0,041086	1,03544	0,04254	5,25897	
130	0,039115	1,09311	0,04276	5,08500	
132	0,036812	1,15301	0,04245	4,85921	
134	0,034247	1,21521	0,04162	4,58915	
136	0,031493	1,27974	0,04030	4,28308	
138	0,028622	1,34664	0,03854	3,94986	
140	0,025705	1,41596	0,03640	3,59865	
142	0,022807	1,48774	0,03393	3,23864	
144	0,019991	1,56203	0,03123	2,87867	
146	0,017307	1,63887	0,02836	2,52682	
148	0,014798	1,71830	0,02543	2,19016	
150	0,012496	1,80038	0,02250	1,87442	
152	0,010421	1,88513	0,01964	1,58392	
154	0,008581	1,97261	0,01693	1,32147	
156	0,006978	2,06286	0,01439	1,08853	
158	0,005603	2,15592	0,01208	0,88527	
160	0,004443	2,25184	0,01000	0,71082	
162	0,003478	2,35066	0,00818	0,56350	
164	0,002689	2,45243	0,00660	0,44104	
166	0,002053	2,55719	0,00525	0,34081	
168	0,001548	2,66498	0,00412	0,26002	
170	0,001152	2,77585	0,00320	0,19586	
172	0,000847	2,88983	0,00245	0,14566	
174	0,000615	3,00699	0,00185	0,10696	
176	0,000441	3,12735	0,00138	0,07754	
178	0,000312	3,25097	0,00101	0,05550	
180	0,000218	3,37788	0,00074	0,03922	
182	0,00015	3,50813	0,00053	0,02737	
184	0,000102	3,64177	0,00037	0,01885	
186	6,89E-05	3,77884	0,00026	0,01282	
188	4,58E-05	3,91938	0,00018	0,00861	
190	3E-05	4,06344	0,00012	0,00571	
192	1,95E-05	4,21105	0,00008	0,00374	
194	1,25E-05	4,36227	0,00005	0,00242	
196	7,86E-06	4,51714	0,00004	0,00154	
198	4,9E-06	4,67570	0,00002	0,00097	
200	3,02E-06	4,83800	0,00001	0,00060	
202	5,32E-22	5,00408	0,00000	0,00000	

245кН - 64% Зима						
FB	P(FB)	Π(FB)	ΠΣ		FB*P(FB)	ΣFB*P(FB)
0	1,34E-11	0,00000	0,00000	1,00229	0,00000	123,63949
2	2,89E-11	0,00548	0,00000		0,00000	
4	6,11E-11	0,01039	0,00000		0,00000	
6	1,27E-10	0,01478	0,00000		0,00000	
8	2,61E-10	0,01869	0,00000		0,00000	
10	5,25E-10	0,02217	0,00000		0,00000	
12	1,04E-09	0,02525	0,00000		0,00000	
14	2,03E-09	0,02798	0,00000		0,00000	
16	3,88E-09	0,03040	0,00000		0,00000	
18	7,32E-09	0,03257	0,00000		0,00000	
20	1,36E-08	0,03452	0,00000		0,00000	
22	2,47E-08	0,03630	0,00000		0,00000	
24	4,44E-08	0,03794	0,00000		0,00000	
26	7,83E-08	0,03951	0,00000		0,00000	
28	1,36E-07	0,04103	0,00000		0,00000	
30	2,32E-07	0,04256	0,00000		0,00001	
32	3,91E-07	0,04413	0,00000		0,00001	
34	6,47E-07	0,04579	0,00000		0,00002	
36	1,06E-06	0,04759	0,00000		0,00004	
38	1,7E-06	0,04956	0,00000		0,00006	
40	2,68E-06	0,05176	0,00000		0,00011	
42	4,18E-06	0,05422	0,00000		0,00018	
44	6,43E-06	0,05700	0,00000		0,00028	
46	9,74E-06	0,06013	0,00000		0,00045	
48	1,46E-05	0,06366	0,00000		0,00070	
50	2,15E-05	0,06763	0,00000		0,00107	
52	3,13E-05	0,07208	0,00000		0,00163	
54	4,51E-05	0,07707	0,00000		0,00244	
56	6,42E-05	0,08262	0,00001		0,00360	
58	9,05E-05	0,08880	0,00001		0,00525	
60	0,000127	0,09564	0,00001		0,00762	
62	0,000176	0,10318	0,00002		0,01092	
64	0,000243	0,11148	0,00003		0,01553	
66	0,000332	0,12056	0,00004		0,02194	
68	0,000454	0,13049	0,00006		0,03085	
70	0,000617	0,14130	0,00009		0,04316	
72	0,000835	0,15303	0,00013		0,06011	
74	0,001125	0,16573	0,00019		0,08327	
76	0,001508	0,17944	0,00027		0,11458	
78	0,002004	0,19421	0,00039		0,15628	
80	0,002635	0,21008	0,00055		0,21079	
82	0,003421	0,22710	0,00078		0,28054	

FB	P(FB)	Π(FB)	ΠΣ	FB*P(FB)	ΣFB*P(FB)
84	0,004378	0,24530	0,00107	0,36772	
86	0,005513	0,26474	0,00146	0,47414	
88	0,006832	0,28545	0,00195	0,60119	
90	0,008333	0,30749	0,00256	0,74995	
92	0,010015	0,33088	0,00331	0,92142	
94	0,011881	0,35569	0,00423	1,11684	
96	0,013936	0,38195	0,00532	1,33786	
98	0,016188	0,40970	0,00663	1,58639	
100	0,018641	0,43900	0,00818	1,86411	
102	0,02129	0,46988	0,01000	2,17163	
104	0,024111	0,50239	0,01211	2,50755	
106	0,027053	0,53657	0,01452	2,86763	
108	0,030041	0,57246	0,01720	3,24439	
110	0,032976	0,61012	0,02012	3,62733	
112	0,035748	0,64957	0,02322	4,00372	
114	0,038244	0,69088	0,02642	4,35986	
116	0,040366	0,73408	0,02963	4,68245	
118	0,042032	0,77921	0,03275	4,95983	
120	0,04319	0,82632	0,03569	5,18280	
122	0,043811	0,87545	0,03835	5,34495	
124	0,043892	0,92666	0,04067	5,44259	
126	0,043448	0,97997	0,04258	5,47442	
128	0,042508	1,03544	0,04401	5,44107	
130	0,041114	1,09311	0,04494	5,34481	
132	0,039313	1,15301	0,04533	5,18933	
134	0,037162	1,21521	0,04516	4,97971	
136	0,034723	1,27974	0,04444	4,72231	
138	0,032064	1,34664	0,04318	4,42477	
140	0,029255	1,41596	0,04142	4,09575	
142	0,026371	1,48774	0,03923	3,74463	
144	0,02348	1,56203	0,03668	3,38107	
146	0,020647	1,63887	0,03384	3,01452	
148	0,017931	1,71830	0,03081	2,65377	
150	0,015377	1,80038	0,02768	2,30654	
152	0,013021	1,88513	0,02455	1,97923	
154	0,010888	1,97261	0,02148	1,67670	
156	0,008989	2,06286	0,01854	1,40227	
158	0,007328	2,15592	0,01580	1,15777	
160	0,005898	2,25184	0,01328	0,94368	
162	0,004687	2,35066	0,01102	0,75933	
164	0,003678	2,45243	0,00902	0,60318	
166	0,002849	2,55719	0,00729	0,47301	

F _B	P(F _B)	Π(F _B)	ΠΣ	F _B *P(F _B)	ΣF _B *P(F _B)
168	0,00218	2,66498	0,00581	0,36618	
170	0,001646	2,77585	0,00457	0,27986	
172	0,001228	2,88983	0,00355	0,21114	
174	0,000904	3,00699	0,00272	0,15726	
176	0,000657	3,12735	0,00205	0,11563	
178	0,000472	3,25097	0,00153	0,08393	
180	0,000334	3,37788	0,00113	0,06014	
182	0,000234	3,50813	0,00082	0,04254	
184	0,000161	3,64177	0,00059	0,02971	
186	0,00011	3,77884	0,00042	0,02048	
188	7,41E-05	3,91938	0,00029	0,01394	
190	4,93E-05	4,06344	0,00020	0,00937	
192	3,24E-05	4,21105	0,00014	0,00621	
194	2,1E-05	4,36227	0,00009	0,00407	
196	1,34E-05	4,51714	0,00006	0,00263	
198	8,47E-06	4,67570	0,00004	0,00168	
200	5,28E-06	4,83800	0,00003	0,00106	
202	5,32E-22	5,00408	0,00000	0,00000	