

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

На правах рукописи



Семёнов Евгений Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЛЬСОВОГО ХОЗЯЙСТВА
В МОСКОВСКОМ МЕТРОПОЛИТЕНЕ**

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Замуховский Александр Владимирович

Москва – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	10
1.1 Анализ нормативно-технической базы рельсового хозяйства метрополитена, её сравнение с нормативно-технической базой ОАО «РЖД».....	18
1.1.1 Структура обозначения дефектов рельсов.....	20
1.1.2 Сравнение каталогов дефектов метрополитена и ОАО «РЖД»	22
1.1.3 Признаки дефектных и остродефектных рельсов.....	23
1.1.4 Маркировка дефектных и остродефектных рельсов.....	25
1.2 Анализ выхода рельсов по дефектам.....	26
1.3 Действующие критерии предельного состояния рельсов.....	29
1.4 Анализ методов прогнозирования состояния рельсового хозяйства...	31
1.5 Анализ дефектоскопии рельсов в метрополитене и ее отличие от дефектоскопии в ОАО «РЖД».....	36
1.6 Выводы к главе 1.....	39
2 АНАЛИЗ РЕЛЬСОВОГО ХОЗЯЙСТВА МЕТРОПОЛИТЕНА.....	41
2.1 Анализ протяженности рельсов по типу.....	41
2.2 Анализ протяженности рельсов в зависимости от плана пути.....	42
2.3 Анализ протяженности рельсов по комбинатам-изготовителям.....	44
2.4 Анализ протяженности рельсов по категории.....	47
2.5 Анализ рельсового хозяйства.....	49
2.6 Анализ удельного выхода рельсов в зависимости от пропущенного тоннажа.....	50
2.7 Выводы к главе 2.....	59
3 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЛЬСОВОГО ХОЗЯЙСТВА ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ СРОКОВ СЛУЖБЫ РЕЛЬСОВ.....	62
3.1 Анализ показателей надежности.....	62

3.2	Обзор функций распределения для прогнозирования отказов рельсов.....	65
3.2.1	Описание нормального распределения для прогнозирования выхода рельсов.....	66
3.2.2	Описание распределения Вейбулла для прогнозирования выхода рельсов.....	68
3.2.3	Описание экспоненциального распределения для прогнозирования выхода рельсов.....	69
3.2.4	Описание степенного распределения для прогнозирования выхода рельсов.....	69
3.2.5	Оценка достоверности математической модели.....	70
3.3	Выбор нулевой гипотезы для прогнозирования выхода рельсов.....	72
3.4	Пересмотр критериев нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов.....	84
3.4.1	Пересмотр критериев нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов типа Р50.....	85
3.4.2	Пересмотр критериев нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов типа Р65.....	89
3.5	Экономическая эффективность повышения нормативной наработки тоннажа при назначении сплошной смены рельсов.....	94
3.5.1	Общие положения.....	94
3.5.2	Расчет экономической эффективности повышения нормативной наработки тоннажа.....	94
3.6	Разработка методики по корректировке периодичности контроля рельсов.....	99
3.6.1	Общие положения.....	99
3.6.2	Порядок перехода к расчетной периодичности.....	103
3.6.3	Оценка эффективности проводимых проверок.....	107
3.7	Выводы к главе 3.....	110

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ РЕЛЬСОВ НА БАЗЕ ИХ ФАКТИЧЕСКОГО ВЫХОДА.....	112
4.1 Общие положения.....	112
4.2 Определение сроков сплошной смены рельсов типа Р65.....	114
4.3 Выводы к главе 4.....	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	125
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	127
Приложение А – Программный код для нахождения принадлежности рельса к типу плана пути и пропущенного тоннажа.....	140
Приложение Б – Расчет выхода рельса по различным законам распределения	143
Приложение В – Протокол совещания начальника Службы пути и искусственных сооружений Дирекции инфраструктуры ГУП «Московский метрополитен» № П-01-03/37 от 31.03.21 г.....	151

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Рельсы являются наиболее дорогим элементом верхнего строения пути, при этом, непосредственно влияющим на обеспечение безопасности движения поездов. Поэтому, продление их нормативного срока службы при обеспечении безопасности движения поездов является актуальной задачей путевого хозяйства метрополитена.

Текущий критерий одиночного удельного выхода рельсов (далее – выхода рельсов), при котором назначается сплошная смена – 3 шт./км в сумме за срок службы. С момента обоснования этого критерия прошло более 50 лет. С тех пор качество рельсовой стали значительно улучшено. Несколько раз изменялись государственные стандарты, в результате чего требования к рельсам существенно ужесточены. Кроме того, на всех новых линиях укладывают рельсы типа Р65 категорий ОТ и ДТ, вследствие чего растет доля рельсов более высокого качества стали.

Исходя из этого, актуальным является научное обоснование значения критерия выхода рельсов, которое дает возможность корректировки значений нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов в сторону увеличения.

Степень разработанности темы исследования. Одними из первых, кто провели исследования в области рельсового хозяйства были А.А. Холодецкий [1] и К. Цеглинский [2]. Также, стоит сказать о выдающемся отечественном ученом Г.М. Шахунянце, который провел исследования в области обоснования срока службы железнодорожных рельсов [3, 4]. На основе экспериментальных и расчетных данных он предложил и обосновал методику определения срока службы рельсов по износу и повреждаемости.

Другим крупным ученым, который обобщил опыт повышения надежности рельсов, является В.С. Лысюк [5 – 7]. На базе исследования системы «колесо-рельс» им сформулированы физические основы повреждения рельсов в процессе эксплуатации. На основе собственных, а также отечественных и зарубежных

исследований В.С. Лысюк обосновал практические рекомендации по повышению безотказности и долговечности рельсов за счет улучшения условий их силового контактирования с колесами и совершенствования системы диагностики.

Необходимо отметить многочисленные работы по исследованию дефектов рельсов профессора Е.А. Шура [8 – 12], который занимается совершенствованием системы рельсового хозяйства.

Кроме того, стоит упомянуть профессора А.Я. Когана [13 – 15], автора множества трудов по вопросам динамики пути и подвижного состава, который в своих работах затрагивал рельсовое хозяйство.

Также, стоит упомянуть О.Г. Краснова, работы которого посвящены прогнозированию износа и контактно-усталостной повреждаемости рельсов [16 – 22].

Также стоит отметить работы А.Ю. Абдурашитова [9, 10, 12, 23 – 30] по прочности и трещиностойкости рельсов, системе ведения путевого хозяйства и повышению надежности рельсов.

Большое количество исследований дефектов рельсов провели А.И. Борц [9 – 11, 31] и К.Л. Заграничек [10, 11, 32].

Значительный вклад в совершенствование путевого хозяйства, в том числе в области статистического анализа рельсового хозяйства и вопросах дефектоскопии внес В.Б. Каменский [33 – 42]. Статистическим анализом рельсового хозяйства также занимались такие ученые, как Н.И. Карпущенко [43, 44] и М.И. Титаренко [45 – 47].

Разработки по определению показателей надежности пути (одним из которых является интенсивность отказов по ГОСТ 27.002-2015 [48]) на магистральных железных дорогах статистическим методом содержатся в трудах А.М. Замышляева [49 – 52, 54], Е.Н. Розенберга [51, 53], И.Н. Розенберга [51, 52], В.А. Гапановича [53, 54], И.Б. Шубинского [53, 54].

Фундаментальные труды по определению эксплуатационной надежности технических систем принадлежат В.А. Акимову [55], А.А. Кокушину [56], В.Р. Матвеевскому [57], А.Н. Чебоксарову [58].

Переходя к вопросам дефектоскопии рельсов, стоит выделить такого ученого как А.А. Марков [59 – 66], работы которого посвящены методам обнаружения и анализу дефектов рельсов.

Ученые из США J.W. Palese, A.M. Zarembski провели ряд исследований по развитию дефектов рельсов и их прогнозированию [67 – 69].

Однако в проведенных исследованиях практически не рассмотрены вопросы эксплуатации рельсов в условиях метрополитенов.

Объектом исследования являются железнодорожные рельсы метрополитена.

Предмет исследования – интенсивность возникновения дефектных рельсов метрополитена.

Цель исследования заключается в повышении эффективности рельсового хозяйства за счет научного обоснования наработки тоннажа до сплошной смены рельсов в метрополитене.

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

- 1) определение выхода рельсов в зависимости от следующих характеристик: тип рельса, план пути, категория рельсов;
- 2) обоснование изменения нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов в метрополитене;
- 3) разработка методики назначения сплошной смены рельсов по фактическому значению выхода рельсов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) установлено, что условия эксплуатации рельсов в метрополитене в отличие от магистральных железных дорог, такие как однородность подвижного состава и его скоростей, определяющие возвышение наружного рельса в кривых, приводят к тому, что основной причиной развития дефектов является недостаточная контактно-усталостная прочность рельсового металла (91,5 %), а развитие дефектов рельсов, обусловленных их износом незначительно и составляет 1,3 %;

2) выявлено, что установленные причины выхода рельсов по дефектам в метрополитене в отличие от магистральных железных дорог определяются категорией рельсов (видом термоупрочнения) и мало зависят от их типа (P50 или P65);

3) впервые для Московского метрополитена получены функции распределения одиночного удельного выхода рельсов в зависимости от пропущенного тоннажа для различных диапазонов плана пути, типов и категорий рельсов;

4) обосновано увеличение значения критерия «одиночный удельный выход рельсов» при условии обеспечения безопасности движения поездов;

5) обосновано увеличение показателя нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов;

6) разработан и научно обоснован предиктивный подход к назначению сплошной смены рельсов по их фактическому выходу с учетом увеличения протяженности полигона Московского метрополитена и применения рельсов новых категорий.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Продление жизненного цикла рельсов за счет обоснованного увеличения показателей нормативной наработки тоннажа до их сплошной смены, основанное на статистическом анализе данных по выходу рельсов.

Разработана методика предиктивного назначения сплошной смены рельсов на основе анализа их фактического состояния (дефектности) в условиях увеличения протяженности полигона Московского метрополитена и применения термоупрочненных рельсов.

Методология и методы исследования. Исследования эмпирического характера главным образом заключаются в наблюдении за работой рельсов с различными характеристиками в различных эксплуатационных условиях метрополитена посредством анализа данных, полученных от сертифицированных средств диагностики пути.

Теоретические исследования заключаются в применении положений математической статистики и теории вероятности для определения функциональных зависимостей показателей работы рельсов, вычисления их прогнозных значений и их дальнейшего сравнения.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Обоснование критерия «одиночный удельный выход рельсов» при обеспечении безопасности движения поездов;
- 2) Определение зависимостей выхода рельсов на основе данных, полученных от сертифицированных средств диагностики пути;
- 3) Обоснование критерия нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов;
- 4) Методика назначения сплошной смены рельсов по их фактическому выходу.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность научных исследований и заключений основана на корректном использовании численных методов, базирующихся на теоретических подходах и принципах математической статистики, а также на систематизации данных, полученных с использованием сертифицированных мобильных средств диагностики пути.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- III Международная выставка-конференция «ИНТЕРМЕТРО» «Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых технологий» (Москва, РУТ (МИИТ), 2019 год).

- XVIII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути» памяти Г.М. Шахунянца (Москва, РУТ (МИИТ), 2021 год).

- Международная научно-практическая конференция «Железнодорожный транспорт и технологии (Railway transport and technologies, RTT-2021)» (Екатеринбург, УрГУПС, 2021 год).

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [70], требует интенсивного развития транспортной инфраструктуры городских агломераций, в том числе метрополитенов, которые по праву занимают одно из ведущих мест в массовых городских пассажирских перевозках. По состоянию на 01.01.2023 общая протяженность линий метрополитена составила 460,5 км с 263 станциями, не включая монорельс и Московское центральное кольцо (далее – МЦК). К 2033 году по планам Правительства Москвы должны быть построены и открыты ещё 39 станций. Летом 2023 года шли работы по строительству 15 новых станций и укладке 35 км новых линий [71].

Московский метрополитен – рельсовый внеуличный (преимущественно подземный) городской общественный транспорт на электрической тяге, находящийся в Москве и частично в Московской области. Он является исторически первым и крупнейшим метрополитеном в СССР, России и странах СНГ. Московское метро – шестое в мире по интенсивности использования после метрополитенов Пекина, Токио, Шанхая, Сеула и Гуанчжоу; четвертое в мире и первое в Европе – по длине эксплуатируемых линий [72].

Первая линия открылась 15 мая 1935 года и шла от станции «Сокольники» до станции «Охотный Ряд» с ответвлением на «Парк культуры» и «Смоленскую» [73]. На главных путях укладывались рельсы типа Р50, а на парковых – Р43. Ширина колеи на прямых участках составляла 1524 мм, что встречается на некоторых линиях и по сей день [74].

Пассажиропоток метрополитена является одним из самых высоких в мире. По количеству пассажиров, перевозимых в год, он уступает только перечисленным ранее метрополитенам. Доля метрополитена в перевозке пассажиров среди предприятий пассажирского транспорта Москвы составляет 48 % [75].

На рисунке 1.1 показано изменение грузонапряженности по линиям метрополитена в период с 1991 по 2020 годы.

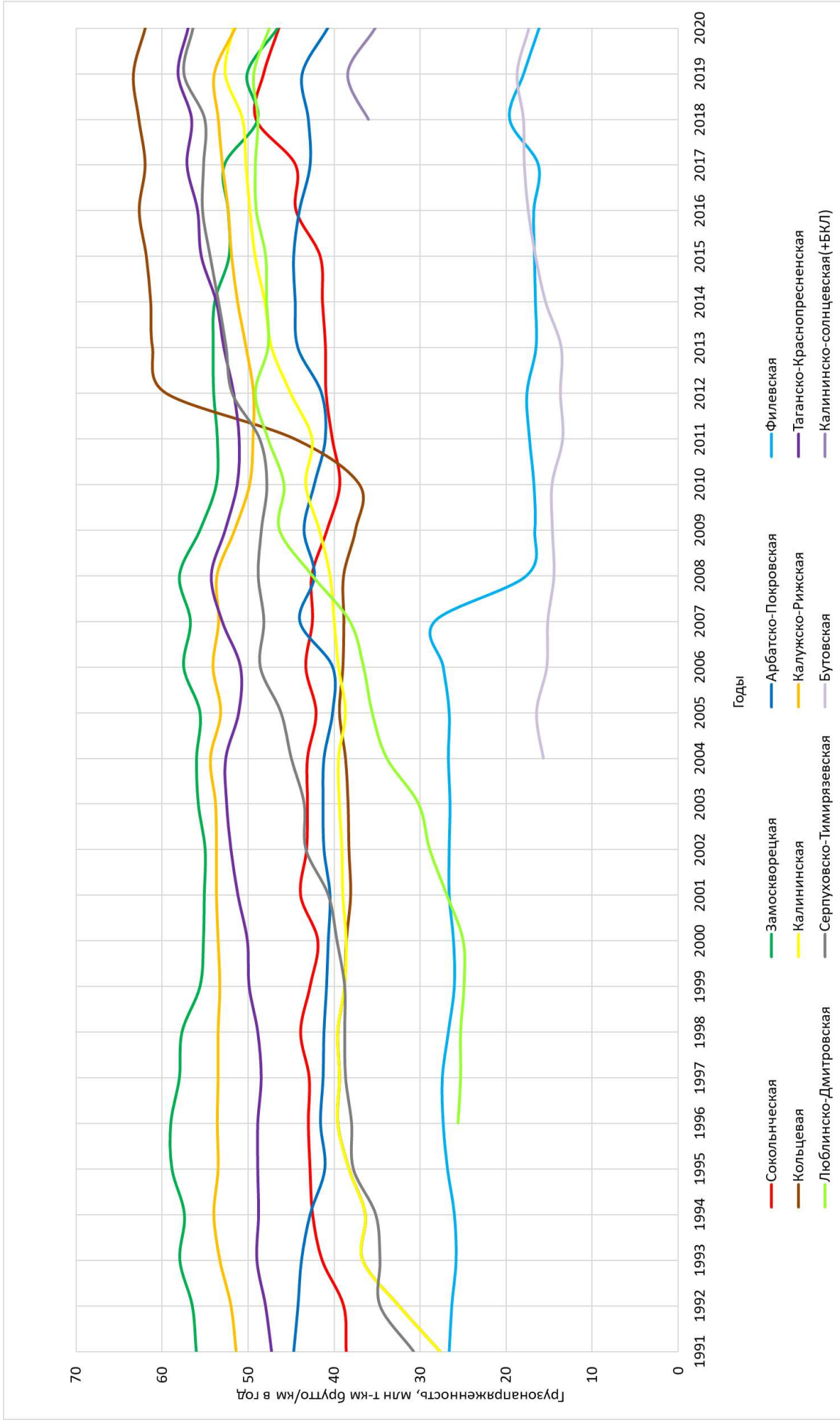


Рисунок 1.1 – График изменения грузонапряженности в период с 1991 по 2020 годы

Анализ изменения грузонапряженности линий метрополитена показывает планомерный ежегодный рост грузонапряженности почти по всем линиям метрополитена. Самый большой рост наблюдается на Кольцевой линии – 124 %. На Калининской линии с 1991 года грузонапряженность увеличилась на 87 %, на Люблинско-Дмитровской линии с момента введения в эксплуатацию грузонапряженность увеличилась на 86 %, на Серпуховско-Тимирязевской - на 83 %, на Сокольнической – на 21 %, на Таганско-Краснопресненской – на 20 %. На остальных линиях изменение грузонапряженности составляет менее 20 %. Рост грузонапряженности на Кольцевой линии можно связать с тем, что в конце 2000-х – начале 2010-х годов население города увеличивалось значительно больше, чем в предыдущие годы, а рост на остальных линиях также с развитием близлежащих к станциям районов [76]. Падение грузонапряженности в 2008 году на Филевской линии связано с введением дополнительной ветки Киевская-Международная. Падение общей грузонапряженности в 2020 году связано со сложной эпидемиологической ситуацией в городе. На рисунке 1.2 показан график изменения средней грузонапряженности по годам.

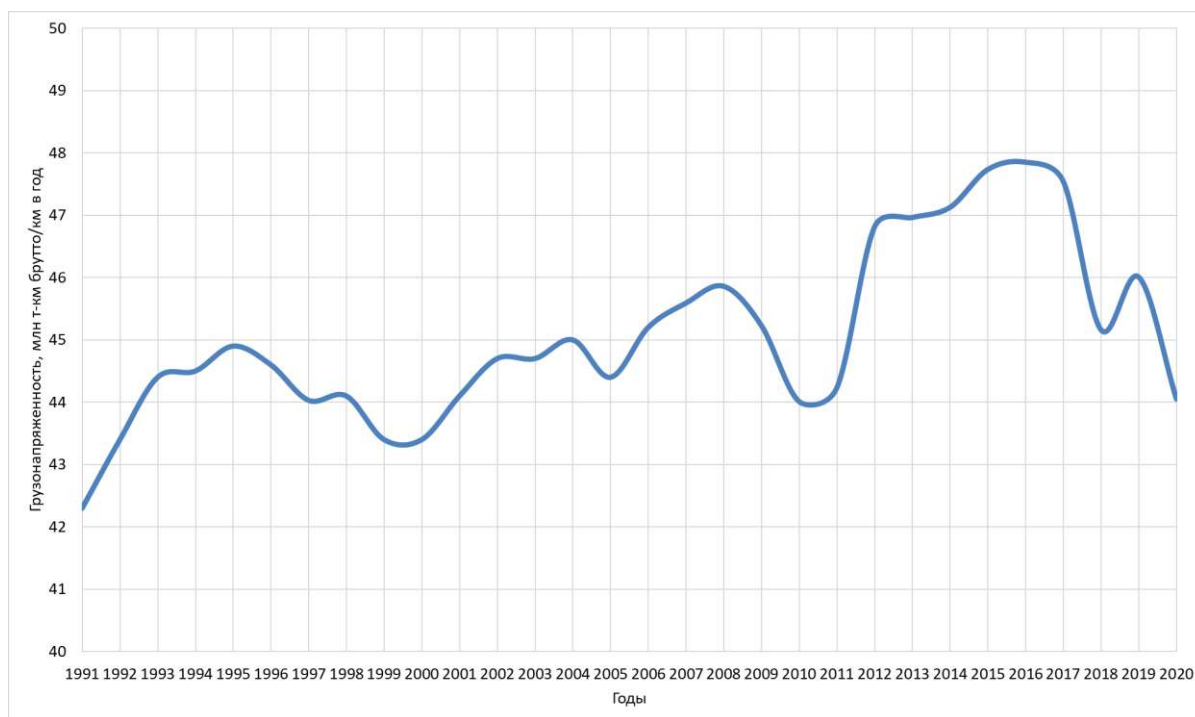


Рисунок 1.2 – Изменение средней грузонапряженности в период с 1991 по 2020
ГОДЫ

Анализируя график, можно сделать вывод, что грузонапряженность росла планомерно до 2016 года, далее она стала уменьшаться, это связано с введением в эксплуатацию МЦК, которое позволило разгрузить метрополитен.

Вся инфраструктура метрополитена, в том числе верхнее строение пути, испытывают интенсивные нагрузки. Служба пути и искусственных сооружений продолжает обеспечивать высокий уровень безопасности движения поездов при неизменном, и даже сокращающемся, интервале времени на техническое обслуживание инфраструктуры [77]. Однако, не исключена такая ситуация, когда состояние пути потребует повышенных трудовых и материальных затрат. Проводились попытки актуализации строительных норм для метрополитена [78].

Ввиду короткого интервала времени на текущее содержание пути [79], основные затраты по времени приходятся на выправку пути [80], вследствие чего, контроль за рельсовым хозяйством, под которым подразумевают непосредственно рельсы, лежащие в пути, причины и интенсивность возникновения отказов рельсов, вопросы дефектоскопии, требует более тщательной проработки.

Ведущими организациями в РФ по вопросам верхнего строения пути метрополитена и его надежности являются АО «ВНИИЖТ» и ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ). Именно в стенах данных институтов и при их непосредственном научном сопровождении было проведено множество, как лабораторных, так и численных экспериментов, связанных с рельсовым хозяйством, которые сохраняют свою актуальность по сегодняшний день.

Еще в середине XX века выдающийся отечественный ученый Г.М. Шахунянц на основе экспериментальных и расчетных данных предложил и обосновал методику определения срока службы рельсов по износу и повреждаемости. Также, он обосновал критерий смены рельсов по их одиночному выходу [3, 4].

Одним из первых, кто обобщил опыт по повышению надежности рельсов, является В.С. Лысюк. В своих работах [5 – 7] он приводил результаты анализа условий силового контакта системы «колесо-рельс», оценил причины повреждения рельсов в процессе эксплуатации. На основе собственных, а также отечественных и зарубежных исследований обосновал практические рекомендации по

повышению безотказности и долговечности рельсов за счет улучшения условий их силового контактирования с колесами и совершенствования системы диагностики.

Также необходимо отметить, такого ученого, как Е.А. Шур, который также является автором многих работ по исследованию дефектов рельсов [9 – 12]. Также он занимался совершенствованием системы рельсового хозяйства. Большое внимание он уделил повреждениям рельсов в своей работе [8].

Стоит упомянуть профессора А.Я. Когана, автора трудов [13 – 15], по вопросам динамики пути и подвижного состава, который в своих работах затрагивал рельсовое хозяйство.

Также, стоит упомянуть труды О.Г. Краснова, которые посвящены прогнозированию износа и контактно-усталостной повреждаемости рельсов [16 – 21]. В работе [22] он основе комплексных теоретических и экспериментальных исследований получил новые научно обоснованные технические и технологические решения по снижению износа и контактно-усталостной повреждаемости рельсов для условий интенсификации грузового движения.

Кроме того, необходимо отметить А.Ю. Абдурашитова, который является автором многих публикаций в отечественных и зарубежных изданиях по прочности и трещиностойкости рельсов, системе ведения путевого хозяйства и повышению надежности рельсов. Этому посвящены его работы [9, 10, 12, 23 – 30]. Под его руководством было проведено множество лабораторных и численных экспериментов по взаимодействию системы «колесо-рельс». Также во многих работах он уделял внимание продлению срока службы рельсов и исследованию дефектов рельсов.

Кроме того, среди ученых АО «ВНИИЖТ», следует принять во внимание А.И. Борца, труды которого посвящены исследованиям дефектов рельсов. В своих работах он выдвигал предложения по корректировке классификации дефектов рельсов, сфер применения рельсов различных категорий [9 – 11, 31].

Большое количество работ, посвященных исследованию дефектов рельсов, принадлежат ученым К.Л. Заграничку [10, 11, 32], В.А. Рейхарту [32, 81], А.И. Козыреву [82, 83], М.Х. Ахметзянову [84].

Отдельно следует отметить труды В.Б. Каменского, который является автором множества работ по совершенствованию путевого хозяйства, в том числе статистическому анализу рельсового хозяйства, вопросам дефектоскопии [34 – 42]. Главный его труд [33] посвящен рассмотрению проблем путевого хозяйства и путям их решения. Его труды являются источником неопределимой информации для производственников и путейцев.

В том числе, следует отметить ряд ученых, выполнивших статистический анализ рельсового хозяйства, среди которых следует отметить Н.И. Карпущенко [43, 44] и М.И. Титаренко [45 – 47]. В их трудах выполнена оценка надежности и прогнозирование выхода рельсов в различных условиях эксплуатации.

Также, необходимо упомянуть ученых, которые создали и развили методы статистического анализа путевой инфраструктуры на магистральных железных дорогах. Большой вклад в создание и внедрение концепции УРРАН («Комплексное управление ресурсами, рисками, анализ надежности на всех этапах жизненного цикла»), на магистральных железных дорогах ОАО «РЖД» внесли В.А. Гапанович, А.М. Замышляев, Е.Н. Розенберг, И.Н. Розенберг, И.Б. Шубинский. Концепция УРРАН, часть положений из методических указаний которой применяются в данном исследовании, позволяет определять и контролировать основные показатели надежности на железнодорожном транспорте [49 – 54].

Методы статистического анализа путевой инфраструктуры концепции УРРАН основаны на положениях теории надежности. Актуальные труды по надежности машин, механизмов и технических систем принадлежат В.А. Акимову [55], А.А. Кокушину [56], В.Р. Матвеевскому [57], А.Н. Чебоксарову [58].

Вопросами дефектоскопии занимался ученый А.А. Марков [59 – 66], работы которого посвящены методам обнаружения и анализу дефектов рельсов.

Кроме того, дефектоскопия рельсов на магистральных дорогах ОАО РЖД затронута в статьях Д.Н. Мирошникова [85], М.Н. Шилова [86], В.Н. Воробьева [87], С.Л. Молоткова [88], А.Н. Яблонского [89].

На большинстве железных дорог мира специалисты пришли к убеждению, что все отказы пути являются следствием постепенного накопления повреждений.

Оценка интенсивности использования рельсов по всем показателям в итоге сводится к оценке грузонапряжённости и эквивалентного значения динамических нагрузок на путь. Установлено, что на участках с одинаковой грузонапряженностью и прочими равными условиями повреждения и расстройтва пути, накапливаемые за период пропуска одинакового тоннажа, тем больше, чем выше статические осевые нагрузки при одинаковой скорости движения поездов или чем выше скорости при одинаковых статических осевых нагрузка. Одной из главных задач при определении необходимого соответствия между интенсивностью использования рельсов, их прочностью и надежностью является задача определения изменения потока отказов и срока службы рельсов в результате изменения интенсивности их использования, исходя из условия, что накапливаемое за срок службы количество отказов рельсов не должно превышать допускаемую величину. На железных дорогах США в среднем обнаруживают 1,36 дефектных рельсов на 1 км главного пути [90]. Рекомендуется на участках с грузонапряженностью более 10 млн т брутто в год планировать сплошную смену рельсов на участке при отказе в среднем 0,8 рельсов на 1 км пути в год [91].

В США были сделаны попытки использования метода оценки усталостной долговечности инженерных конструкций для оценки усталостной долговечности рельсов. В практике инженерных расчетов ресурса конструкций, подвергающихся нестационарному нагружению, в США получила распространение гипотеза Майнера, которую используют для расчетов срока службы рельсов. Срок службы рельсов по тоннажу наработки T_i определяют по формуле [5, 92]

$$T_i = T_0 * \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^{\gamma-1}, \quad (1.1)$$

где T_0 – срок службы рельсов при базовых осевых нагрузках, млн т брутто;

P_i и P_0 – повышенные и базовые осевые нагрузки;

γ – показатель степени, принимаемый равным 4.

Большие исследования по интенсивности развития дефектов в рельсах были проведены Центром транспортных технологий (ТТСИ) на полигоне для ускоренных

эксплуатационных испытаний пути и подвижного состава (FAST) в США. Были получены зависимости роста поперечных дефектов от пропущенного тоннажа [93].

Проведенные к Королевском Университете Кингстона в Канаде исследования разрушения рельсов позволили установить значение максимальной динамической силы, при которой рельс с известным дефектом может разрушиться [5].

Переходя к контролю состояния рельсов, остановимся на опыте США, где в последнее время для планирования контроля состояния рельсов стали использоваться вероятностные модели. Так, на некоторых дорогах США в основе модели используют распределение Вейбулла. Про этом учитывают интенсивность развития усталостных дефектов до размеров, приводящих к излому [67 – 69].

Используя данные по ранее обнаруженным дефектам и изломам, установили зависимость частоты проверок от общей наработки рельсов, исходя из верхнего предела периодичности контроля и выхода рельсов по опасным дефектам. Была определена взаимосвязь общей наработки рельсов и числа проверок. Для этих целей на дорогах США используются специальные номограммы, были разработаны специальные программы для планирования периодичности контроля рельсов. На наиболее близкой к отечественным условиям дороге «Юнион Пасифик» частота проверок не превышает 12 раз в год. На железных дорогах Франции периодичность контроля рельсов от 6 месяцев до 6 лет. В Германии магистральные линии обследуются с интервалом 1-3 раза в год [66].

Благодаря работам отечественных и зарубежных специалистов было проведено множество исследований по повышению эффективности рельсового хозяйства, разработаны методики и концепции, применение которых к полигону путей метрополитена даст возможность оценить их надежность и эффект от внедрения.

1.1 Анализ нормативно-технической базы рельсового хозяйства метрополитена, её сравнение с нормативно-технической базой ОАО «РЖД»

Под воздействием поездов, климатических и других факторов в рельсах в процессе эксплуатации по мере наработки тоннажа, измеряемого в млн т брутто, происходят процессы износа, смятия, коррозии и усталости металла, в том числе контактной, изгибной и коррозионной усталости, описанные в [94]. В результате протекания этих процессов в рельсах образуются различные дефекты. Дефект рельса характеризуется отклонениями от установленных норм его геометрических параметров или прочности, соблюдение которых обеспечивает работоспособное состояние рельса в установленных условиях эксплуатации. К дефектам рельсов относятся: выкрашивания, выколы, трещины, изломы, все виды износа, пластические деформации в виде смятия, сплывов металла головки рельса, коррозия, механические повреждения, величины которых превышают нормированные значения. Отказ рельса вызывается дефектом, при котором исключается пропуск поездов (полный отказ, например, при изломе рельса) или возникает необходимость в ограничении скоростей движения поездов (частичный отказ, например, образование волнообразных неровностей на поверхности катания головки рельса и т.п.).

Классификация и каталог дефектов рельсов [94] предназначены для правильного определения кода дефектов в рельсах, основной причины их появления и развития, а также для принятия мер по безопасной эксплуатации рельсов, для статистического учета поврежденных рельсов, для анализа уровня эксплуатационной стойкости и надежности рельсов. В каталоге дефектов рельсов представлены способы их выявления.

Все дефекты в зависимости от их типа, расположения по сечению рельса, основных причин их происхождения и места расположения по длине рельса имеют свой цифровой код.

Поврежденные рельсы в зависимости от степени опасности дефектов [94] подразделяются на две категории: остродефектные (ОДР) и дефектные (ДР).

К остродефектным рельсам относятся рельсы с изломами, выколами и трещинами, которые могут привести к внезапным разрушениям. Остродефектные рельсы непосредственно угрожают безопасности движения поездов из-за непредсказуемости последствий разрушений рельсов и поэтому требуют изъятия их из пути после обнаружения дефекта без промедления в соответствии с установленным порядком.

По остродефектным рельсам пропуск поездов производится в соответствии с нормами, приведенными далее.

Дефектные рельсы, как правило, не препятствуют пропуску поездов, но иногда требуют ограничения скоростей. В связи с возможностью визуального наблюдения за развитием этих дефектов, изменение их размеров в большинстве случаев можно прогнозировать. При обнаружении дефектного рельса осуществляют его ежедневное наблюдение в ночные технологические окна.

В зависимости от вида и степени развития дефектов на поверхности катания головки, на шейке или подошве для дефектных рельсов устанавливается соответствующий порядок их изъятия из пути от смены в плановом порядке до смены в первоочередном порядке.

По дефектным рельсам на срок до устранения дефекта или смены дефектных рельсов иногда устанавливаются ограничения скорости движения поездов с учетом конкретных условий состояния пути.

Все остродефектные рельсы, внутренние дефекты в которых обнаружены при дефектоскопировании, после изъятия из пути подвергаются обязательному вскрытию для подтверждения вида дефекта. Доллом рельсов для вскрытия дефектов должен производиться:

- для метрополитена: средствами рельсосварочной станции Службы Пути или ВНИИЖТ;
- для ОАО «РЖД»: средствами дистанций пути.

При анализе вскрытых дефектов должно быть обращено внимание на источник (фокус) зарождения дефекта, на его место расположения и ориентацию в рельсе, на характер развития дефекта.

- для метрополитена: результаты вскрытия фиксируются в специальном журнале и передаются вместе с цифровыми фотографиями для анализа в Дефектоскопную станцию или Центр Диагностики Службы пути и искусственных сооружений;

- для ОАО «РЖД»: вид излома рельса фотографирует цифровым фотоаппаратом работник дистанции пути. результаты вскрытия острodefектного рельса фиксируются в специальном журнале и передаются вместе с цифровыми фотографиями для анализа в Центры диагностики и мониторинга.

1.1.1 Структура обозначения дефектов рельсов

Как для метрополитена, так и для ОАО «РЖД» все дефекты рельсов в классификации кодированы трехзначным числом. В соответствии с [94, 95] использована следующая структура кодового обозначения:

- первая цифра кода определяет группу дефектов по месту появления дефекта по элементам сечения рельса (головка, шейка, подошва, всё сечение);

- вторая цифра определяет вид (тип) дефекта рельсов с учетом основной причины его зарождения и развития;

- третья цифра указывает на место расположения дефекта по длине рельса.

Первые две цифры кода дефектов рельсов отделяются от третьей цифры точкой.

Группа дефектов и место их появления по элементам сечения рельса (головка, шейка, подошва, все сечение) определяются следующими цифрами (первый знак):

1 – трещины и выкрашивания металла на поверхности катания головки рельса;

2 – поперечные трещины в головке рельса;

3 – продольные трещины в головке рельса и в зоне перехода головки в шейку в стыке;

4 – пластические деформации (смятие), вертикальный, боковой и неравномерный износ головки рельса (длинные волны и короткие волны-рифли);

5 – дефекты и повреждения шейки рельса;

6 – дефекты и повреждения подошвы рельса;

7 – изломы рельса по всему сечению;

8 – изгибы рельса в вертикальной и горизонтальной плоскостях;

9 – прочие дефекты и повреждения рельса, включая коррозию подошвы и шейки.

Вид (тип) дефекта рельсов, определяемый основной причиной его зарождения и развития (второй знак), обозначается следующими цифрами:

0 – дефекты, связанные с нарушениями технологии изготовления рельсов;

1 – дефекты, зависящие от недостаточно высокого металлургического качества рельсовой стали (например, от местных скоплений неметаллических включений, вытянутых вдоль направления прокатки в виде дорожек-строчек) и недостаточной прочности рельсового металла, приведшие к отказам рельсов после пропуска гарантийного тоннажа (после окончания срока гарантии);

2 – дефекты, зависящие от недостаточно высокого металлургического качества рельсовой стали (например, от местных скоплений неметаллических включений, вытянутых вдоль направления прокатки в виде дорожек-строчек) и недостаточной прочности рельсового металла, приведшие к отказам рельсов до пропуска гарантийного тоннажа (в пределах срока гарантии);

3 – дефекты в зоне болтовых стыков, связанные с повышенным динамическим воздействием колёс на путь, с нарушением требований инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути; с нарушениями технологии обработки болтовых отверстий и торцов рельсов металлургическими комбинатами, линейными подразделениями и промышленными предприятиями путевого хозяйства дорог;

4 – дефекты, связанные с ненормативным специфическим воздействием подвижного состава на рельсы (боксование, юз, ползуны и др.), в том числе из-за нарушения режимов вождения поездов или из-за недостатков подвижного состава;

5 – дефекты рельсов, полученные в результате ненормативных механических воздействий на рельсы (удар инструментом, рельса о рельс и т.п.);

6 – дефекты в зоне сварных стыков, связанные с недостатками и нарушениями технологии сварки рельсов и обработки сварных стыков, приведшие к отказам рельсов после пропуска гарантийного тоннажа;

7 – дефекты в зоне сварных стыков, связанные с недостатками и нарушениями технологии сварки рельсов и обработки сварных стыков, приведшие к отказам рельсов до пропуска гарантийного тоннажа;

8 – дефекты, связанные с недостатками и нарушениями технологии наплавки рельсов, приварки рельсовых соединителей и другие дефекты;

9 – дефекты, вызванные коррозионной усталостью, контроленепригодностью рельсов, и изломы без усталостных трещин.

Цифровое обозначение места расположения дефекта (третья цифра в номере дефекта) принято следующим:

0 – по всей длине рельса;

1 – в болтовом стыке на расстоянии 750 мм и менее от торца рельса;

2 – вне болтового стыка на расстоянии более 750 мм от торца рельса;

3 – в сварном стыке, полученном электроконтактной сваркой;

4 – в сварном стыке, полученном алюминотермитной сваркой.

1.1.2 Сравнение каталогов дефектов метрополитена и ОАО «РЖД»

Анализируя каталоги дефектов метрополитена [93] и ОАО «РЖД» [95] можно сделать следующие выводы:

- для дефектов первой и четвертой группы причины их появления и развития, а также способы выявления будут примерно одинаковы, различия будут лишь в указаниях по эксплуатации дефектных рельсов, причиной которых являются различные скорости движения, вследствие чего вводится различная градация ограничения скоростей. Кроме того, в каталоге ОАО «РЖД» вводятся

дополнительные критерии оценки дефекта, при которых рельс считается остродефектным.

- описание дефектов 2, 3 и 5-8 групп (за исключением дефекта 64.1-2) не имеют значительных расхождений в каталогах дефектов метрополитена и ОАО «РЖД»;

- дефекты 9 группы имеют различия в их кодах: в метрополитене используется следующее обозначение дефекта: 98.Г1-5, 98.Ш1-5, 98.П1-5 (по всей длине рельса 98.0, в стыке 98.1, вне стыка 98.2, в сварных стыках 98.3 – 98.5, Г – в головке рельса, Ш – в шейке рельса, П – в подошве рельса), а в ОАО «РЖД» другие обозначения: по всей длине рельса используется код 98.0, в стыке 98.1, вне стыка 98.2, 98.3, 98.4. Для дефекта 99 в каталоге ОАО «РЖД» добавляются 2 дополнительных кода, связанных с контактной (99.3) и алюмотермитной сваркой (99.4).

1.1.3 Признаки дефектных и остродефектных рельсов

Признаки, определяющие остродефектные рельсы в главных, приёмootправочных и станционных путях одинаковы для метрополитена и для ОАО «РЖД».

Основными признаками, определяющими остродефектные рельсы в главных и приёмootправочных путях, являются:

а) поперечные или наклонные, видимые или внутренние (выявленные дефектоскопными средствами) трещины в головке независимо от их размера, относящиеся ко всем дефектам второй группы (20, 21, 22, 24, 25, 26, 27) и некоторые дефекты третьей группы (31; 33; 38);

б) трещины в шейке рельса, видимые или внутренние (выявленные дефектоскопными средствами), независимо от их ориентации и размеров (дефекты 50; 53; 55; 56; 57);

в) продольные и поперечные, видимые или внутренние (выявленные дефектоскопными средствами), трещины в подошве, независимо от размеров, в том

числе трещины коррозионно-усталостного происхождения, выколы части подошвы рельса (дефекты 60, 65, 66, 67, 69);

г) изломы рельса (дефекты 70; 71; 72; 73; 74; 75; 76; 77; 79; 99);

д) наличие у рельсов независимо от их длины отрубленных (неопиленных) или отрезанных газопламенным способом концов, а также прожжённых отверстий;

е) рельсы с другими дефектами, необходимость немедленной смены которых устанавливается дорожным мастером (дефект 99).

Признаками, определяющими остродефектные рельсы в станционных путях, являются:

а) рельсы с вертикальным износом, при котором реборды колес подвижного состава задевают гайки путевых болтов;

б) рельсы с разрушением головки, шейки или подошвы, с выколом подошвы;

в) рельсы с поперечным изломом и поперечной трещиной, вышедшей на поверхность профиля рельса;

г) рельсы с отрубленными (неопиленными) отрезанными газопламенным способом концами независимо от длины, а также рельсы с прожженными отверстиями;

д) рельсы с другими дефектами, необходимость немедленной смены которых устанавливается дорожным мастером.

Другими признаками, определяющими дефектные рельсы являются:

а) рельсы, имеющие износ, превышающий нормативы, приведенные в таблице 1.1 (для метрополитена);

Таблица 1.1 – Приведенный или боковой износ головки, при превышении которого рельсы считаются дефектными

Пути, на которых эксплуатируются рельсы	Тип рельсов			
	Р65	Р50	Р43	1-а
Главные (в том числе в границах станций), станционные (приемоотправочные пути для оборота и отстоя составов), специального назначения (соединительные ветви)	12	10	-	8
Парковые и деповские	16	13	9	9

б) рельсы с трещинами в головке, шейке, подошве и местах перехода шейки в головку и подошву вне зоны стыков;

в) рельсы с поперечным изломом по дефектам 70, 71, 72, 74, 75, 76, 77, 79 с раскрытием зазора не более 25 мм и с поперечной трещиной, вышедшей на поверхность профиля рельса, если дефект расположен не ближе 2,5 м от торца рельса, с установленными шестидырными накладками на 4 крайних болта;

г) рельсы с выколом подошвы;

д) рельсы с провисшими концами, включая смятие, на 8 мм и более, а также с уширением головки внутрь колеи, которое делает невозможным содержание ее по ширине в пределах допусков, а на горочных путях может приводить к заклиниванию тормозных башмаков;

е) рельсы короче 4,5 м (исключая рельсы на стрелочных переводах, длина которых установлена эapurой).

Для подтверждения или опровержения правильности классификации дефектов в рельсах, снятых по показаниям дефектоскопов, все рельсы с внутренними дефектами, изъятые из эксплуатации, должны быть доломаны до вскрытия дефекта. Вид излома рельса фотографируется цифровой фотокамерой. Результаты долома должны быть оформлены в виде протокола за подписью дорожного мастера и вместе с цифровыми фотографиями переданы:

- для метрополитена: в Диагностический центр Службы пути и искусственных сооружений;

- для ОАО «РЖД» в Дорожный центр диагностики.

1.1.4 Маркировка дефектных и острodefектных рельсов

Для метрополитена и ОАО «РЖД» требования к маркировке дефектных и острodefектных рельсов одинаковы.

Острodefектные и дефектные рельсы, выявленные при дефектоскопном или другом контроле, маркируются непосредственно после обнаружения дефекта следующим образом:

- на шейке с внутренней стороны колеи на расстоянии около 1 м от левого по ходу километров стыка (зазора) светлой масляной краской наносят: для остродефектных рельсов – два, а для дефектных рельсов – один крест;

- на шейке рядом с дефектом с той стороны, с которой виден дефект (или всегда с внутренней стороны колеи, если дефект обнаружен дефектоскопными средствами), маркировка повторяется с указанием через наклонную черту кода дефекта.

Если дефект распространен по всей длине рельса (например, износ), то в середине рельса указывают номер кода этого дефекта с черточками, соответственно перед и после кода (-44.0-).

Если дефект расположен на левом конце в пределах стыка, то код дефекта ставят рядом с первой маркировкой и вторую маркировку не делают.

При расположении дефекта на правом конце рельса в пределах стыка, дополнительно к первой маркировке повторяют ее на правом конце с указанием кода дефекта.

При обнаружении дефекта, по которому рельс признают остродефектным, маркировку делают сразу же после обнаружения дефекта.

1.2 Анализ выхода рельсов по дефектам

Большинство работ по анализу дефектов [9 – 11, 24, 26, 32, 34, 36, 37, 43, 46, 82, 83, 85, 97, 98] затрагивают условия эксплуатации рельсов в условиях ОАО «РЖД». Выход по кодам дефектов в ОАО «РЖД» [28] имеют ряд различий от Московского метрополитена. Эти различия показаны далее.

По данным о выходе рельсов за 2014-2019 годы, полученным в центре диагностики и мониторинга объектов инфраструктуры Московского метрополитена, был проведен анализ выхода рельсов в зависимости от их дефекта. График приведен на рисунке 1.3.

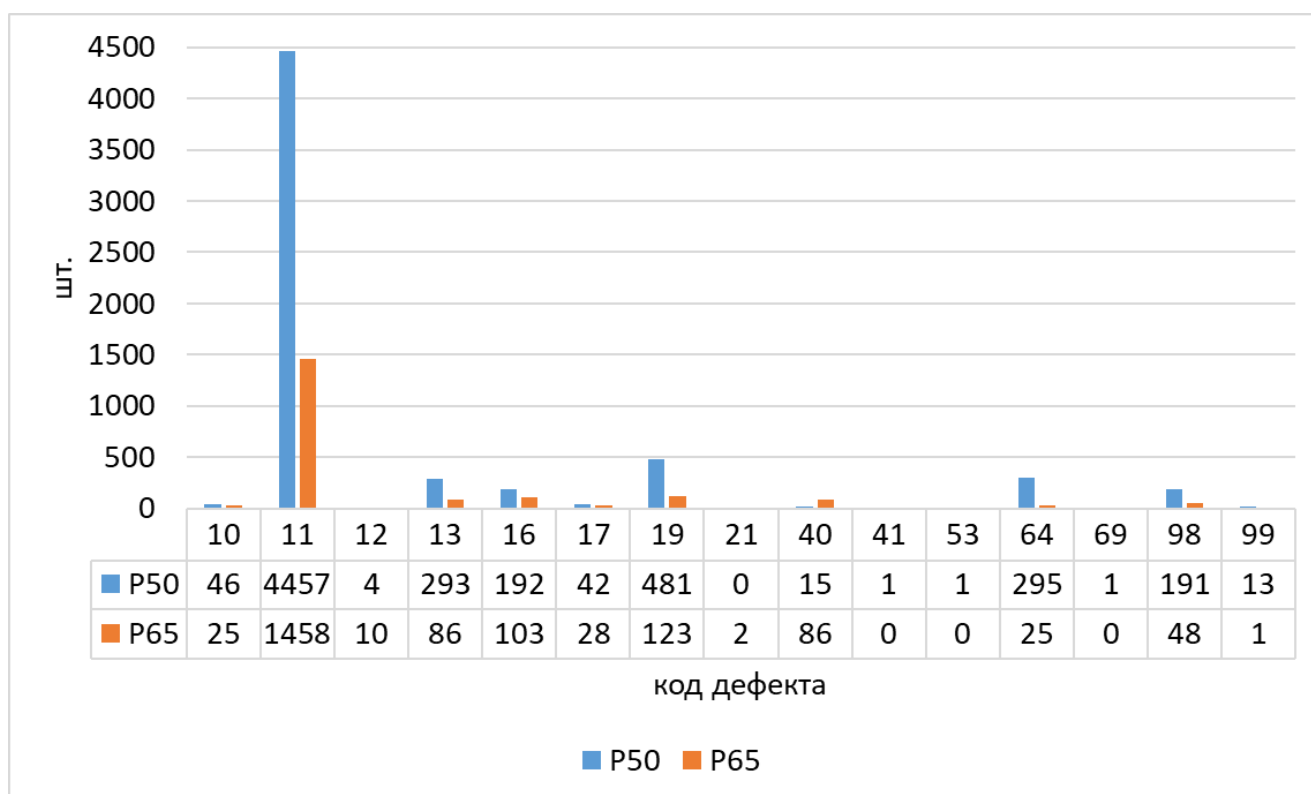


Рисунок 1.3 – Распределение рельсов по коду дефекта в период с 2014 по 2019
годы

Распределение рельсов по коду дефекта показало, что наиболее распространенным является 11 код дефекта (73,7 % от общего количества замененных рельсов). Он образуется в рабочей части головки рельса, когда металл под действием знакопеременных поездных нагрузок работает в зоне ограниченной выносливости. Количество замененных рельсов по дефектам 1 группы составляет 91,5 % от общего количества.

На рисунке 1.4 показано распределение лежащих в пути рельсов на железных дорогах общего пользования в 2022 году. Из графика видно, примерное равенство дефектов 1 и 4 группы (суммарно 34125 шт. к 35641 шт., соответственно). Кроме того, на рисунке 1.5 показано распределение замененных и лежащих дефектных рельсов на железных дорогах общего пользования в период с 2019 по 2022 годы. Преобладание дефектов 1 группы более существенно, однако среднее значение в период с 2019 по 2022 годы составляет 49,0 % от всех лежащих и замененных рельсов (на 2022 год это значение составляет 51,5 %).

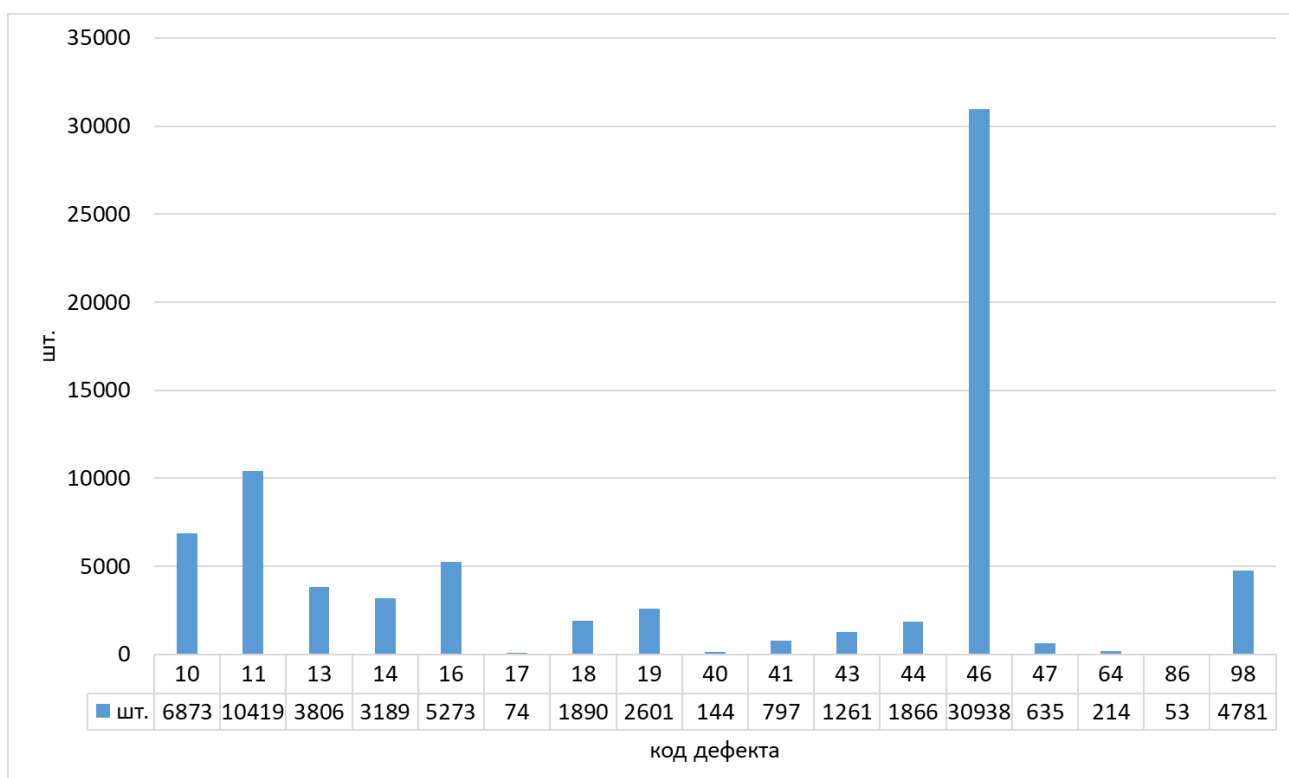


Рисунок 1.4 – Распределение лежащих в пути рельсов по коду дефекта на железных дорогах общего пользования в 2022 году

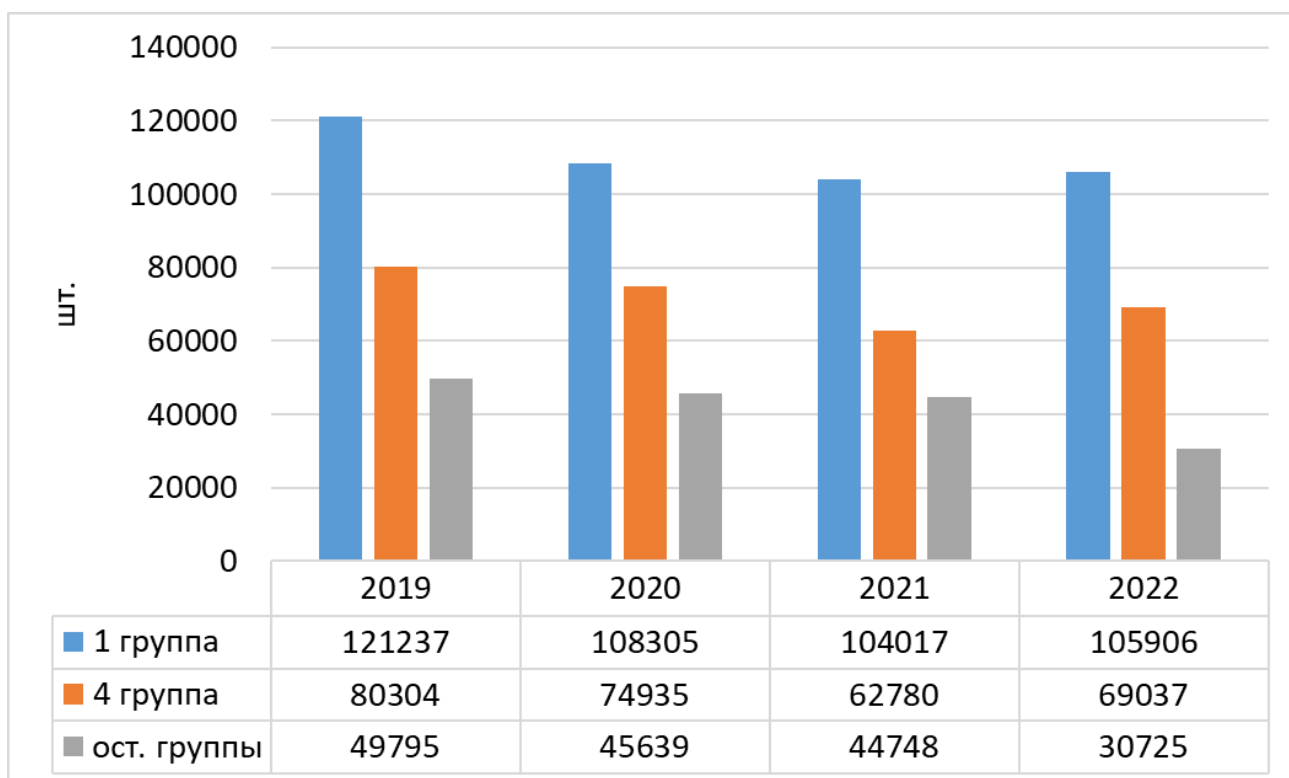


Рисунок 1.5 – Распределение замененных и лежащих дефектных рельсов на железных дорогах общего пользования в период с 2019 по 2022 годы

Кроме того, следует отметить, что количество рельсов, замененных по 4 группе дефектов (пластические деформации и износ головки рельсов) составляет всего 1,3 % от общего количества замененных рельсов в метрополитене, что существенно меньше, чем на железных дорогах общего пользования, где среднее значение в период с 2019 по 2022 годы составляет 32,0 % (на 2022 год это значение составляет 33,6 %).

Практически полное отсутствие дефектов рельсов 4 группы в метрополитене обусловлено использованием однотипного подвижного состава и возвышением наружного рельса, при котором не будет возникать непогашенное ускорение, а на железных дорогах общего пользования смешанное движение с разными нагрузками на ось и скоростями, которые отличаются от средневзвешенных. Основная группа дефектов, по которым меняются рельсы – первая (трещины и выкрашивания металла на поверхности катания головки рельса).

1.3 Действующие критерии предельного состояния рельсов

В соответствии с ГОСТ 27.002-2015 [48] предельным состоянием называется состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна. А критерием предельного состояния называется признак или совокупность признаков предельного состояния объекта, в данном случае рельсов.

Основным критерием предельного состояния при назначении капитального ремонта пути является одиночный выход рельсов (в сумме за срок службы - в среднем на участке капитального ремонта пути) 3 и более шт./км [99]. Необходимо отметить, что данный критерий был обоснован в 1960-х годах, когда в путь укладывали, в основном, незакаленные рельсы типа Р50. С тех пор качество рельсовой стали значительно улучшено. Несколько раз изменялись государственные стандарты, в результате чего требования к рельсам существенно ужесточены. Исходя из этого, появляется возможность пересмотра данного критерия. Обоснование более высокого значения критерия одиночного удельного выхода рельсов даст возможность корректировки значений нормативной

наработки тоннажа сплошной смены рельсов в сторону увеличения. Действующие нормы наработки (пропущенного) тоннажа в соответствии с [99], приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Нормативная наработка тоннажа до сплошной смены рельсов

Нормативный тоннаж, млн т брутто	Тип рельса	План пути
150	P50	радиус 300 м и менее
210	P50	радиус от 301 до 599м
225	P65	радиус 300 м и менее
315	P65	радиус от 301 до 599м
345	P50	радиус от 600 до 799м
400	P50	радиус от 800м и более
450	P65	радиус от 600м и более
470	P50	Прямые
520	P65	Прямые

В соответствии с правилами назначения ремонтов железнодорожного пути [100], основными критериями назначения капитального ремонта пути 1 и 2 уровня являются пропущенных тоннаж или срок службы в годах, а также одиночный выход дефектных (остродефектных) рельсов в сумме за срок службы в среднем на участке ремонта. Данный критерий зависит от класса пути, и для пути 1 класса он составляет 4 шт./км, для пути 2-3 класса – 6 шт./км. А нормативная наработка тоннажа при сплошной смене рельсов не зависит от плана пути, в отличие от норм в метрополитене.

Анализ действующих критериев назначения капитального ремонта пути в метрополитене и на железных дорогах общего пользования показал наличие более жестких норм в метрополитене по критерию «одиночный выход рельсов» – 3 шт./км, в то время, как на железных дорогах общего пользования данный критерий для пути 1 класса он составляет 4 шт./км. Кроме того, в метрополитене нормативная наработка тоннажа до сплошной смены рельсов меньше, чем на железных дорогах общего пользования, где данное значение зависит от класса, группы, категории и типа подрельсового основания пути и составляет 700 млн т брутто для бесстыкового пути и 600 млн т брутто для звеньевых пути.

В соответствии с [95] старогодные рельсы допускается укладывать в главные пути только в том случае, если пропущенный тоннаж не превышает значений, указанных в таблице 1.3 и разница в износе соседних рельсов по высоте и ширине головки не более 1 мм. Такие рельсы можно использовать только для одиночной смены.

Таблица 1.3 – Предельные значения пропущенного тоннажа по старогдным рельсам, пригодным к укладке в покилометровый запас, млн т брутто

Тип рельса	Прямые и кривые радиусом 601 м и более	Кривые радиусом от 600 до 301 м	Кривые радиусом от 300 м и менее
Р65	225	140	100
Р50	150	105	75

На парковых, прочих и путях специального назначения допускается укладывать старогдные рельсы, изъятые из главных путей без учета пропущенного тоннажа по фактическому состоянию рельсов. Состояние старогдных рельсов для укладки в станционные пути определяется комиссией, назначенной начальником Службы пути и искусственных сооружений.

1.4 Анализ методов прогнозирования состояния рельсового хозяйства

Основным методом прогнозирования состояния рельсового хозяйства является концепция УРРАН, применяемая в ОАО «РЖД». Система УРРАН – это технология управления надежностью, ресурсами и функциональной безопасностью на железнодорожном транспорте. Система УРРАН обеспечивает практическое управление ресурсами, рисками, надежностью и функциональной безопасностью на сети железных дорог ОАО «РЖД». Эта система позволяет в условиях дефицита финансовых средств увеличивать назначенный срок службы объектов железнодорожного транспорта до предельного состояния.

Система УРРАН (Управление рисками, ресурсами на этапах жизненного цикла на основе анализа надежности) построена на основе системы RAMS (безотказности, готовности, ремонтпригодности и безопасности) и системы LCC (стоимости жизненного цикла), а также новых информационных технологий поддержки принятия решений, распределенных информационных систем оперативного сбора и анализа данных и новой нормативной базы [54].

Применение методов управления рисками в составе комплексной методологии УРРАН позволяет контролировать и поэтапно минимизировать риски в порядке их значимости. Система управления рисками служит мощным инструментом, содействующим повышению операционных показателей железнодорожного транспорта. Внедрение методологии УРРАН в Московском метрополитене описано в работе Д.А. Погосяна [80]. Автор данной работы также будет использовать некоторые положения УРРАН для оценки работы рельсового хозяйства.

В своей работе [4] профессор Г.М. Шахунянц получил зависимости срока службы рельсов по одиночному выходу. Величина пропущенного тоннажа, по которой назначается первая сплошная смена рельсов, зависит от многих факторов и ее определяют формуле

$$T = h * \sqrt[4]{\frac{T_{0H}}{T_0}} * \sqrt{\frac{r * P_{дн}}{r_H * P_d}} * q^3 * \prod_{i=1}^{i=n} \lambda_i, \quad (1.2)$$

где h – коэффициент, зависящий от типа и категории рельсов;

T_{0H} – наибольшая грузонапряженность, допустимая для каждого типа рельсов, млн т-км брутто/км в год;

T_0 – грузонапряженность, млн т-км брутто/км в год;

r и P_d – средневзвешенные по тоннажу значения радиуса колеса динамической нагрузки на оси подвижного состава, обращающегося на участке, для которого определяется срок службы рельсов по одиночному выходу;

r_H и $P_{дн}$ – нормативные значения r и P_d ;

q – масса рельса, кг;

λ_i – коэффициенты, учета влияния различных факторов.

А суммарный одиночный выход γ и выход γ_1 в последний год перед сплошной сменой рельсов определяют по формулам

$$\gamma = \frac{C^2 * B}{h} * \frac{T^2 * r_H * P_D}{r * P_{дн} * q^5 * \prod_{i=1}^{i=n} \lambda_i}, \quad (1.3)$$

$$\gamma_1 = 2 * \frac{T_0}{T} * \gamma, \quad (1.4)$$

где B и C параметры, зависящие от условий эксплуатации;

T – пропущенный тоннаж на участке, для которого определяется срок службы рельсов по одиночному выходу.

Другой подход определения срока службы рельсов по фактическому состоянию описан в учебнике профессора Т.Г. Яковлевой [101]. В качестве теоретического распределения наработки до отказа принят нормальный закон распределения, который часто хорошо согласуется с экспериментальными данными при испытаниях на надежность. Плотность вероятности центрированной нормированной функции задают уравнением

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{(t-T_{cp})^2}{2*\sigma_t^2}}. \quad (1.5)$$

А интегральная функция уравнением

$$F_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-T_{cp})^2}{2*\sigma_t^2}} dx, \quad (1.6)$$

где t – время безотказной работы;

T_{cp} – средняя наработка до первого отказа;

σ_t – среднее квадратическое отклонение отказов рельсов.

Значения функции $F_0(x)$ приведены в специальных таблицах. Имея параметры T_{cp} и σ_t можно для любой наработки t_i определить вероятность отказа и количество отказавших рельсов на 1 км пути

$$n(t_i) = F(t_i) * n_p = F_0 * \frac{(t - T_{cp})}{\sigma_t} * n_p, \quad (1.7)$$

где n_p – количество рельсов на 1 км пути.

Данные зависимости использованы для расчетов в работе [102].

В.С. Лысюк в своей работе [5] при прогнозировании отказов предлагает определять прогнозное значение наработки тоннажа до сплошной смены рельсов по формуле

$$T = \sqrt{\frac{[h]^{\frac{n}{m}}}{A * \left(\frac{P_i}{P_0}\right)^n}}, \quad (1.8)$$

где A , m , n – параметры, определяемые экспериментально;

$[h]$ – допускаемое количество одиночных отказов, шт./км;

P_i и P_0 – повышенные и базовые осевые нагрузки, соответственно.

Другой подход к определению интенсивности появления отказов описан в работах В.П. Бельтюкова [103] и И.А. Симонюка [104]. Функция интенсивности накопления остаточных деформаций верхнего строения железнодорожного пути, с учетом периодов приработки, нормальной эксплуатации пути и периода интенсивных отказов с учетом полноты восстановления, будет иметь вид

$$\Omega(x) = B \frac{m}{t_0} x^{m-1} + C + A \left[1 - e^{-(x/\beta)^\alpha} \right] \left(\frac{\eta}{\frac{x}{\beta} \ln \eta + 1} \right), \quad (1.9)$$

где t_0 – параметр масштаба в периоде приработки;

m – параметр формы в периоде приработки;

x – пропущенный тоннаж, млн. т. брутто (или время, годы);

B – коэффициент, учитывающий многоэлементность верхнего строения пути, как системы;

C – постоянная составляющая интенсивности отказов, не зависящая от интенсивности движения поездов;

A – коэффициент, учитывающий многоэлементность системы;

α – параметры формы при периоде ухудшения состояния пути;

β – параметр масштаба (соответствует среднему сроку наработки на отказ;

η – параметр полноты восстановления.

Переходя к вопросам оптимизации контроля рельсов, следует обратить внимание на работу В.Б. Каменского [33], в которой он, проанализировав зарубежный опыт, предложил методику оптимизации периодичности контроля рельсов. Он выдвинул гипотезу, что выход острodefектных рельсов подчиняется показательному закону и вывел количественное соотношение между продолжительностью цикла контроля $T_{ц}$ и выходом острodefектных рельсов

$$T_{ц} = -t_{ц} * \ln(1 - e^{-P}), \quad (1.10)$$

где $t_{ц}$ – средняя продолжительность цикла контроля в выборке;

P – математическое ожидание числа острodefектных рельсов, выявленных на контролируемом участке.

Исходя из допустимого размера трещины, вероятности ее обнаружения в зависимости от степени развития и допустимого уровня наколенной вероятности им был проведен расчет числа проверок в цикле, необходимых для надежного выявления острodefектного рельса. Исходя из вышесказанного была предложена методика корректировки проверок исходя из предшествующего выхода рельсов, положения которой могут быть использованы для эксплуатационных условий метрополитена.

Благодаря работам отечественных и зарубежных специалистов был проведен большой анализ работы рельсового хозяйства в различных эксплуатационных условиях, которая позволит оценить различия между ними на магистральных железных дорогах и в метрополитене, и исходя из этого повысить эффективность рельсового хозяйства в метрополитене.

1.5 Анализ дефектоскопии рельсов в метрополитене и ее отличие от дефектоскопии в ОАО «РЖД»

Выявление дефектов в рельсах производится средствами дефектоскопии с использованием методов неразрушающего контроля. Дефектоскопия рельсов включает оценку их качества в процессе изготовления, в эксплуатационных условиях, а также на рельсосварочных предприятиях, производящих сварку новых и ремонт старогодных рельсов, и направлена на своевременное обнаружение главным образом внутренних скрытых дефектов. Учет выхода рельсов в дефектные и анализ результатов дефектоскопического исследования позволяет определить распределение дефектов по видам, выявить причины их образования в зависимости от эксплуатационных условий и качества металла; разрабатывать мероприятия по повышению прочностных характеристик и качества изготовления рельсов, продлению сроков службы и повышению общей надежности пути, по совершенствованию методов и средств рельсовой дефектоскопии [105].

На дорогах ОАО «РЖД» дефектоскопия рельсов регламентируется положением [106].

Расчет периодичности контроля выполняется с учетом:

- среднего значения выхода остродефектных рельсов (ОДР) на 1 км;
- пропущенного тоннажа;
- наибольшей установленной скорости движения пассажирских и грузовых поездов;
- грузонапряженности на участке контроля;
- протяженности участка контроля.

При расчете периодичности контроля используются данные журналов учета покилометрового выхода ОДР по участкам контроля и смены ОДР по ПЧ.

Для создания базы данных, анализа и расчета периодичности контроля рельсов, а также ее корректировки ведется учет ОДР и изломов рельсов по форме ПУ-2А.

Расчет периодичности контроля назначается в соответствии с методикой, изложенной в [33].

Неразрушающий контроль за рельсами ведется при помощи: дефектоскопных автомотрис, дефектоскопов-путеизмерителей, совмещенных вагонов-дефектоскопов, мобильных дефектоскопных лабораторий, съемных двухниточных дефектоскопов или однопиточных дефектоскопов.

В метрополитене нет четкой инструкции по дефектоскопии рельсов, поэтому периодичность контроля установлена начальником Службы Пути и искусственных сооружений и приведена в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Периодичность контроля рельсов в метрополитене

Грузонапряженность, млн т брутто/км в год	<50	≥50	Рельсы с перепробегом
Количество проверок в месяц (поездами- лабораториями «Синергия»/ съемными дефектоскопами)	4 (2/2)	6 (3/3), (4/2) или (2/4)	8 (4/4)

До введения в эксплуатацию поездов-лабораторий «Синергия» дефектоскопию рельсов совершали вагоны-дефектоскопы. В Московском метрополитене вагон-дефектоскоп появился в 1975 году. Это был вагон метро типа «А» № 1031 1935 года постройки. В его салоне было несколько комнат. Одна из них была комнатой контроля. Одна тележка была дефектоскопной, вторая основной. Эксплуатировался до 1999 года в депо "Красная Пресня". С 1999 по 2012 годы в этом же депо эксплуатировался дефектоскоп № 9425, переоборудованный из вагона серии 81-714. В депо "Владыкино" было два вагона-дефектоскопа серии 81-717 № 9267 и № 9279. Вагон № 9267 был списан в 1996 году, вагон № 9279 в 2015 году был передан в депо "Калужское" [107].

Однако, активное расширение сети метрополитена, продление существующих линий и строительство новых вызвало необходимость в разработке и внедрении современных средств диагностики пути метрополитена для повышения надежности работы основной транспортной системы города и

обеспечения безопасности пассажиров. Для этого по заказу Московского метрополитена был создан уникальный диагностический комплекс-лаборатория «Синергия-1», в котором разместились все необходимые приборы для диагностики состояния путевого хозяйства. 8 августа 2013 года состоялся первый рабочий выезд диагностического вагона «Синергия-1», в ходе которого им было обследовано состояние путей на Сокольнической линии.

С апреля 2013 года новый диагностический комплекс «Синергия-1», поступивший в электродепо «Красная Пресня», проходит опытную эксплуатацию, которую планируется завершить к 1 сентября. В рамках опытной эксплуатации оборудования диагностического вагона в июле 2013 года прошли испытания инфракрасного термографа – прибора, определяющего тепловое состояние всей аппаратуры, размещенной в тоннелях метрополитена. В настоящее время принимается решение о возможности постоянного применения инфракрасного термографа в составе диагностического оборудования вагона-лаборатории.

В отличие от существующего в метрополитене вагона-путеизмерителя, новый диагностический комплекс осуществляет проверку не только геометрических параметров рельсовой колеи, но также производит ультразвуковую дефектоскопию рельсов всех типов для выявления в них дефектов и повреждений, проверку габаритов различного оборудования, размещенного в тоннелях метрополитена, в том числе габаритов и температуры контактного рельса.

Диагностический комплекс «Синергия-1» - единственный в России вагон-лаборатория, который позволяет контролировать все объекты железнодорожной структуры метрополитена. Позднее, на помощь комплексу «Синергия-1» пришел комплекс «Синергия-2», который существенно облегчил задачу планирования текущих ремонтов и повысил безопасность движения поездов [108].

Наиболее распространённые съёмные дефектоскопы, используемые в Московском метрополитене – это дефектоскопы научного производственного предприятия РДМ. Используются следующие модели:

Ультразвуковой дефектоскоп УДС2-РДМ-12: предназначен для обнаружения, регистрации и расшифровки сигналов от дефектов в рельсах

железнодорожных путей на участках, проверка которых одновременно по двум нитям затруднена или небезопасна.

Ультразвуковой дефектоскоп УДС2-РДМ-22: предназначен для обнаружения дефектов в обеих нитях железнодорожного пути по всей длине и сечению рельса, за исключением перьев подошвы, при сплошном контроле со скоростью движения до 4 км/ч, а также для выборочного ручного контроля сварных стыков, отдельных сечений и участков рельса, определения координат обнаруженных дефектов и их условной протяженности.

Ультразвуковой дефектоскоп УДС2М-35 предназначен для ультразвукового контроля сварных стыков рельсов на рельсосварочных предприятиях и в пути, а также для вторичного контроля рельсов [109].

1.6 Выводы по главе 1

1) С увеличением грузонапряженности и интенсивности движения поездов время на текущее содержание пути остается неизменным – ночное технологическое окно, продолжительностью, в среднем, 2 часа 15 минут. Причем, основные затраты по времени приходятся на выправку пути вследствие чего, контроль за рельсовым хозяйством требует более тщательного подхода.

2) Одним из ключевых отличий нормативно-технической базы рельсового хозяйства метрополитена от нормативно-технической базы для железных дорог общего пользования является то, что все дефектные рельсы в метрополитене подлежат замене в плановом порядке, и исходя из современных реалий, обнаруженный в пути дефектный рельс заменяют в течение месяца с момента обнаружения.

3) Распределение рельсов по коду дефекта показало, что наиболее распространенным является 11 код дефекта (73,7 % от общего количества замененных рельсов). Количество замененных рельсов по дефектам 1 группы составляет 91,5 % от общего количества в то время, как на железных дорогах общего пользования на 2022 год – 51,5 %. Кроме того, количество рельсов, замененных по 4 группе дефектов составляет всего 1,3 % от общего количества

замененных рельсов в метрополитене, что существенно меньше, чем на железных дорогах общего пользования, где это значение составляет 33,6 % на 2022 год. Практически полное отсутствие дефектов рельсов 4 группы в метрополитене обусловлено использованием однотипного подвижного состава и возвышением наружного рельса, при котором не будет возникать непогашенное ускорение, а на железных дорогах общего пользования применяется смешанное движение с разными нагрузками на ось и скоростями, которые отличаются от средневзвешенных. Основная группа дефектов, по которым меняются рельсы – первая (трещины и выкрашивания металла на поверхности катания головки рельса).

4) Основным критерием предельного состояния при назначении капитального ремонта пути является одиночный выход рельсов (в сумме за срок службы - в среднем на участке капитального ремонта пути) 3 и более шт./км. Данный критерий был обоснован в 1960 годах, когда в путь укладывали, в основном, незакаленные рельсы типа Р50. С тех пор качество рельсовой стали значительно улучшено. Несколько раз изменялись государственные стандарты, в результате чего требования к рельсам существенно ужесточены. Исходя из этого, появляется возможность пересмотра данного критерия. Обоснование более высокого значения выхода рельсов, даст возможность корректировки значений нормативной наработки тоннажа сплошной смены рельсов в сторону увеличения.

5) Текущая периодичность дефектоскопии рельсов, в целом, удовлетворяет специфическим условиям эксплуатации пути метрополитена. Однако, данный вопрос следует изучить более детально и разработать подходы к назначению периодичности дефектоскопии рельсов по ретроспективному анализу выхода рельсов.

6) Вышеперечисленные выводы подтверждают необходимость повышения эффективности рельсового хозяйства метрополитена за счет изменения действующих критериев выхода рельсов и нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов.

7) Дальнейший подход к назначению сплошной смены рельсов также может заключаться в использовании нового методического инструмента для определения этих сроков на базе анализа их фактического выхода по мере наработки тоннажа.

2 АНАЛИЗ РЕЛЬСОВОГО ХОЗЯЙСТВА МЕТРОПОЛИТЕНА

В первой главе работы проведен обзор рельсового хозяйства метрополитена, кроме того, был выполнен сравнительный анализ выхода рельсов в метрополитене и на железных дорогах общего пользования, который показал различия в количественном соотношении дефектов различных групп.

В данном разделе представлен анализ рельсового хозяйства метрополитена в зависимости от различных эксплуатационных характеристик, из которых выделены основные для дальнейшего анализа. Также были получены аппроксимирующие функции удельного выхода рельсов в зависимости от пропущенного тоннажа.

2.1 Анализ протяженности рельсов по типу

В метрополитене укладывают два типа рельсов: Р50 и Р65 длиной 12,5 и 25 м. В таблице 2.1 приведены значения протяженности эксплуатируемых рельсов в зависимости от их типа по годам. На рисунке 2.1 показан график изменения протяженности рельсов в зависимости от их типа по годам.

Таблица 2.1 – Протяженность рельсов в зависимости от их типа, км пути

Тип, годы	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Р50	412,8					
Р65	209,7	211,8	250,8	271,5	280,1	310,7

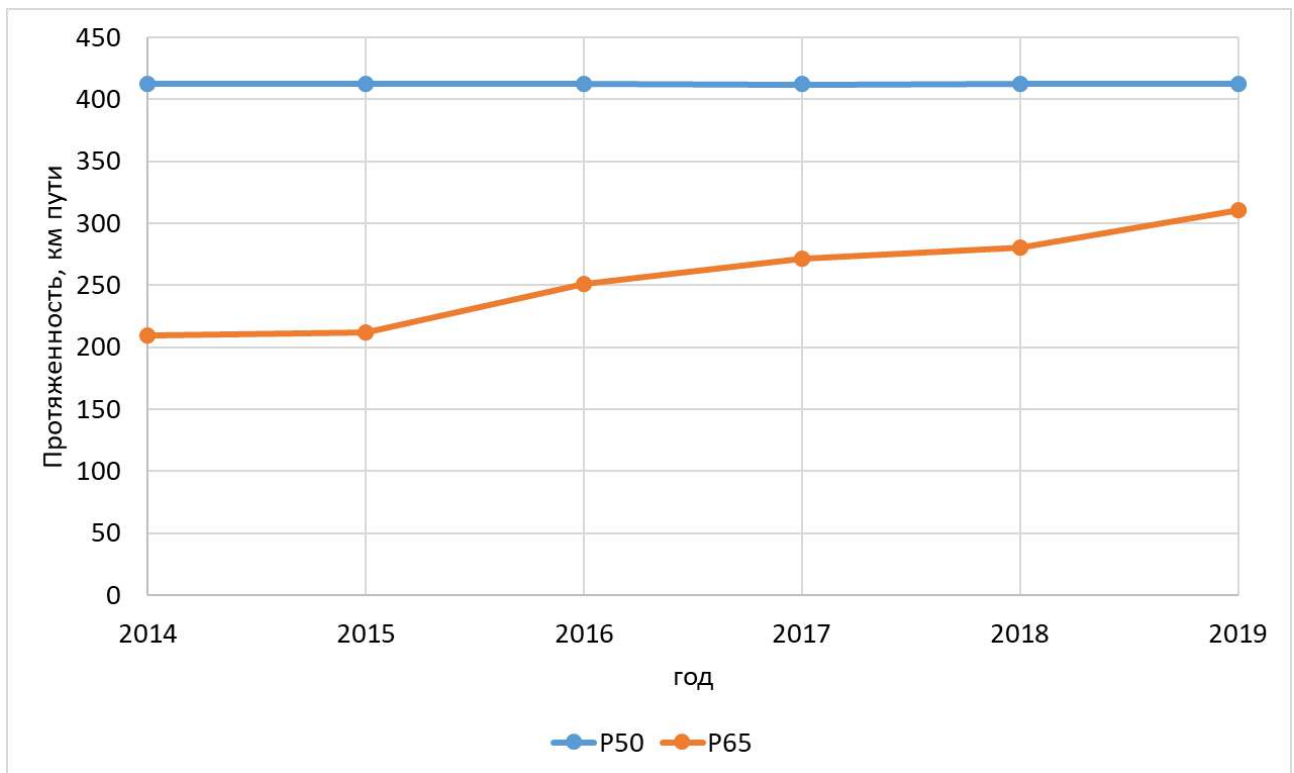


Рисунок 2.1 – График распределения протяженности рельсов по типу

Из таблицы 2.1 и рисунка 2.1 можно сделать вывод, что рельсы типа P50 на 2020 год оставались наиболее преобладающими в метрополитене. В свою очередь виден рост протяженности рельсов типа P65, что связано с их укладкой при новом строительстве, которое интенсивно ведется последние годы.

2.2 Анализ протяженности рельсов в зависимости от плана пути

В таблице 1.2 были приведены нормы по нормативной наработке тоннажа до сплошной смены рельсов. В зависимости от этой градации был построен график распределения протяженности рельсов типа P65 (рисунок 2.2). Значения протяженности в зависимости от плана пути для рельсов типа P50 не менялось и приведено в таблице 2.2. Значения протяженности в зависимости от плана пути показано в таблице 2.3.

Таблица 2.2 – Протяженность рельсов типа Р50 в зависимости от плана пути, км
пути

План, годы	2014	2015	2016	2017	2018	2019
≤ 300	14,7					
$300 < R < 600$	71,1					
$600 \leq R < 800$	28,8					
≥ 800	48,0					
прямые	250,2					

Таблица 2.3 – Протяженность рельсов типа Р65 в зависимости от плана пути, км
пути

План, годы	2014	2015	2016	2017	2018	2019
≤ 300	4,8	5,0	6,3	6,9	7,0	7,5
$300 < R < 600$	23,2	23,9	33,6	35,1	37,0	42,9
≥ 600	43,8	44,8	56,2	62,5	64,6	73,1
прямые	137,9	138,1	154,7	167,0	171,5	187,2

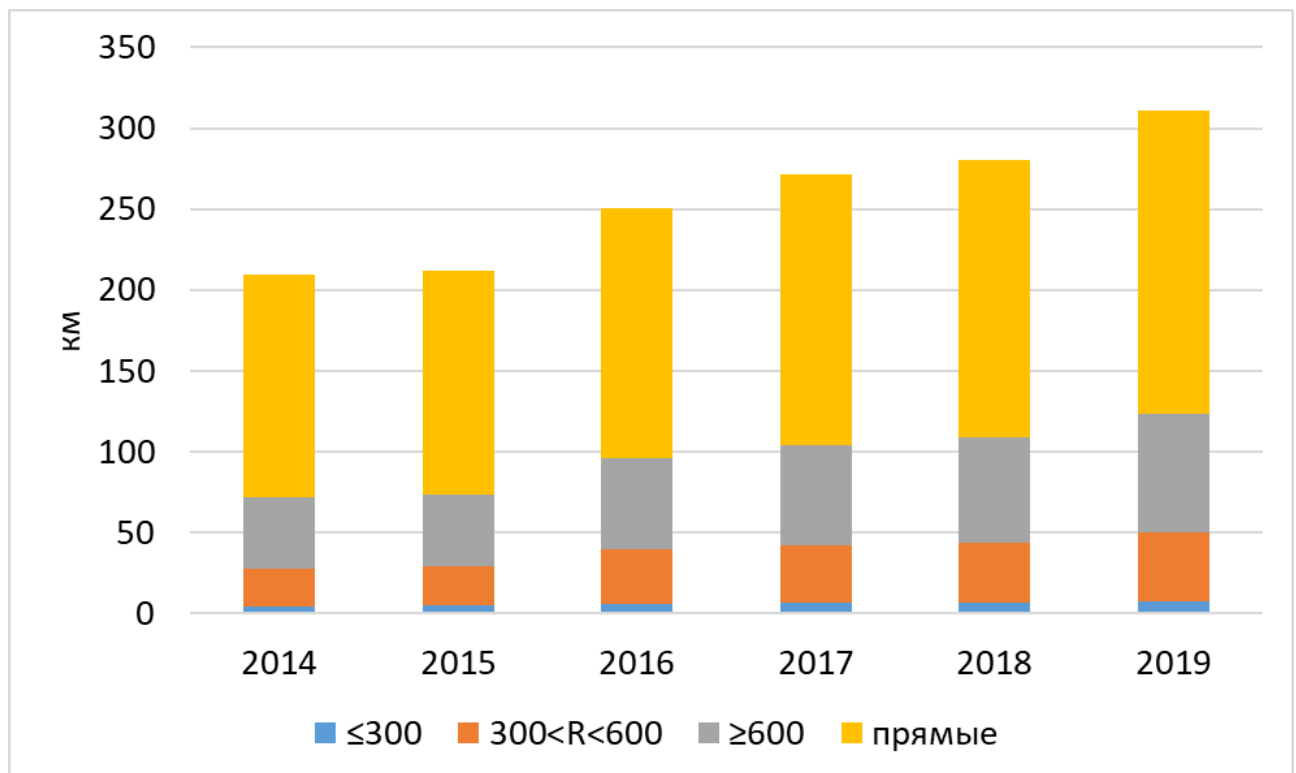


Рисунок 2.2 – Распределение рельсов типа Р65 в зависимости от плана пути

Из графиков можно сделать следующие выводы:

- в метрополитене имеет место преобладание прямых участков пути (на 2020 год – 60,6 % от общего протяжения рельсов типа Р50 и 60,2 % от общего протяжения рельсов типа Р65);

- наименьшую протяженность имеют рельсы, уложенные в кривых радиусом 300 м и менее (на 2020 год – 3,6 % от общего протяжения рельсов типа Р50 и 2,4 % от общего протяжения рельсов типа Р65);

Дальнейший расчет будет произведен для всех типов плана пути.

2.3 Анализ протяженности рельсов по комбинатам-изготовителям

В метрополитене основными поставщиками рельсов являются Челябинский металлургический комбинат (с 2016 г.), входящий в состав ведущей российской горнодобывающей и металлургической компании «Мечел», и металлургическая и горнодобывающая компания «ЕВРАЗ», включающая в себя Нижнетагильский металлургический комбинат (далее – НТМК) и Новокузнецкий металлургический комбинат (далее – ЗСМК). Также, ранее рельсы поставлялись с металлургического комбината «Азовсталь».

Челябинский металлургический комбинат (далее – ЧМК) – Российское промышленное предприятие. На комбинате реализован проект универсального рельсобалочного стана по выпуску железнодорожных рельсов длиной 100 метров. Производственная мощность стана – более 1 млн т рельсов и фасонного проката в год. В рамках реализации инвестиционного проекта в ноябре 2008 между РЖД и ЧМК был заключен договор поставки рельсовой продукции на период с 2010 по 2030 гг. Для московского метрополитена выпускают рельсы Р65 категорий ДТ350 и НТ260.

В настоящее время на предприятии холдинга ЕВРАЗ реализован прокат следующих видов рельсов:

Рельсы Р50: Прокат производится на площадке рельсового проката ЕВРАЗ ЗСМК и на рельсобалочном стане ЕВРАЗ НТМК. Предназначены для укладки на линиях метрополитенов и изготовления стрелочных переводов. Рельсы

поставляются категории качества НТ260 – нетермоупрочнённые обычной прочности общего назначения [110].

Рельсы Р65: Прокат производится на площадке рельсового проката ЕВРАЗ ЗСМК и на рельсобалочном стане ЕВРАЗ НТМК. Предназначены для эксплуатации на железнодорожных путях общего и необщего пользования. Рельсы железнодорожные типа Р65 дифференцированно термоупрочнённые с прокатного нагрева общего назначения категории ДТ350 [111].

В таблицах 2.4 и 2.5 приведено распределение рельсов по длине в зависимости от комбината-изготовителя в период с 2014 по 2019 годы. На рисунках 2.3 и 2.4 показаны графики распределения рельсов по длине в зависимости от комбината-изготовителя.

Таблица 2.4 – Протяженность рельсов типа Р50 в зависимости от комбината-изготовителя, км пути

Комбинат, годы	2014	2015	2016	2017	2018	2019
ЗСМК	327,7	331,1	335,1	346,8	356,6	365,3
НТМК	79,2	76,2	72,3	61,3	51,5	46,9
«Азовсталь»	5,9	5,5	5,4	4,6	4,6	0,6

Таблица 2.5 – Протяженность рельсов типа Р65 в зависимости от комбината-изготовителя, км пути

Комбинат, годы	2014	2015	2016	2017	2018	2019
ЗСМК	175,2	172,4	167,8	164,5	142,5	133,2
НТМК	29,6	34,5	37,0	56,7	73,5	78,8
«Азовсталь»	4,9	4,9	4,9	4,8	3,9	0,3
ЧМК	-	-	41,1	45,4	60,2	98,5

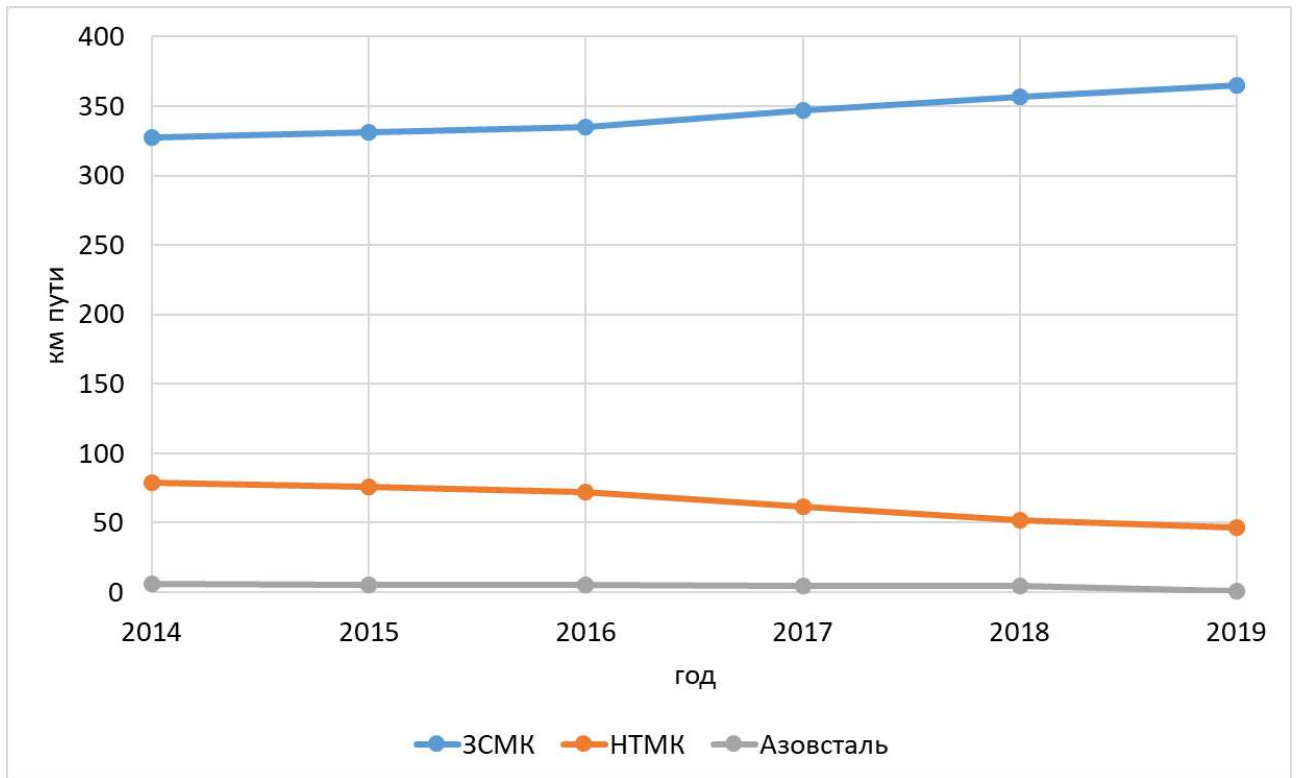


Рисунок 2.3 – Распределение протяженности рельсов типа Р50 в зависимости от комбината-изготовителя

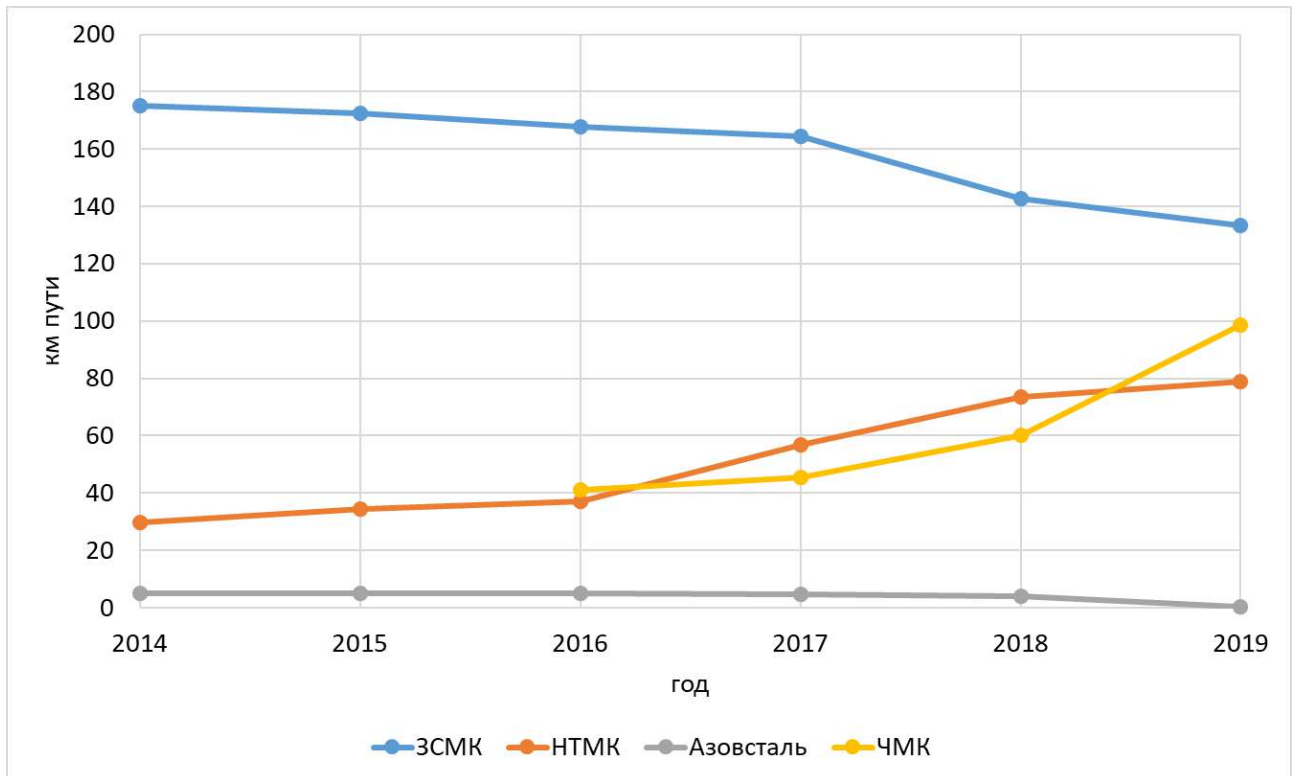


Рисунок 2.4 – Распределение протяженности рельсов типа Р65 в зависимости от комбината-изготовителя

Из данных, приведенных в таблицах 2.4 и 2.5 и графиков на рисунках 2.3 и 2.4 можно сделать следующие выводы:

- рельсы комбината «Азовсталь» практически изъяты из пути;
- рельсы комбината ЧМК интенсивно начали укладывать в путь с 2016 года, в свою очередь рельсы комбинатов НТМК и ЗСМК стали укладывать в путь менее интенсивно;
- видно нарастание общей длины рельсов типа Р65, что связано с укладкой рельсов этого типа на новых линиях.

Несмотря на то, что в рельсовых картах метрополитена есть разделение по комбинатам-изготовителям, в дальнейших расчетах это разделение не производилось в связи с тем, что все рельсы выпускают в соответствии с ГОСТ Р 51685-2013 [112].

2.4 Анализ протяженности рельсов по категории

В метрополитене укладывают рельсы трех категорий: НТ260 – нетермоупрочнённые обычной прочности общего назначения, ОТ350 (старое обозначение Т1) – объемно-закаленные термоупрочненные общего назначения, ДТ350 – дифференцированно термоупрочнённые с прокатного нагрева общего назначения [112]. Рельсы типа Р50 уложены только одной категории – НТ260. Рельсы типа Р65 уложены всех категорий. В таблице 2.6 показано распределение протяженности рельсов типа Р65 в зависимости от категории в период с 2014 по 2019 годы. На рисунке 2.5 показан график распределения протяженности рельсов типа Р65 по категориям.

Таблица 2.6 – Протяженность рельсов типа Р65 в зависимости от категории, км пути

Категория, годы	2014	2015	2016	2017	2018	2019
НТ260	68,1	65,5	64,1	61,3	59,9	54,4
ОТ350(Т1)	141,6	146,3	173,8	182,1	184,9	186,0
ДТ350	-	-	12,9	28,1	35,3	70,3

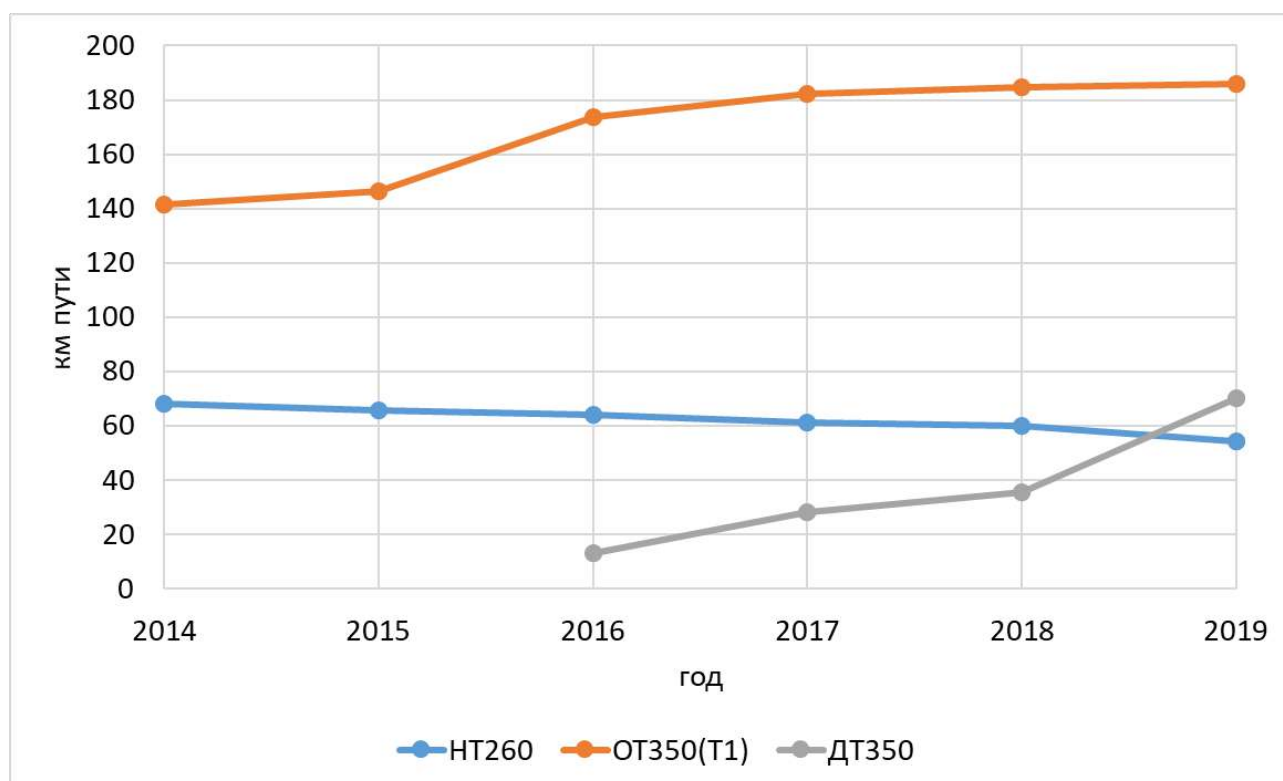


Рисунок 2.5 – Распределение рельсов типа Р65 по категории

Из таблицы 2.6 и графиков на рисунке 2.5 можно сделать следующие выводы:

- рельсы категории HT260 постепенно изымаются из пути и заменяются рельсами других категорий, о чем свидетельствует снижение их протяженности с 68,1 км до 54,4 км, что составляет 17,5 % общей длины главных путей метрополитена с рельсами Р65 на 2020 год;

- рельсы категории DT350 начали укладывать в путь в последние годы, их протяженность на 2020 год составляет 70,3 км (22,6 % общей длины главных путей метрополитена с рельсами Р65);

- самая большая протяженность рельсов категории OT350(T1) – 186,0 км (59,8 % общей длины главных путей метрополитена с рельсами Р65).

В дальнейших расчетах категории рельсов OT350(T1) и DT350 были объединены, так как рельсы категории DT350 начали укладывать в путь только в последние годы, и по имеющимся статистическим данным их выход на начальном этапе наработки схож с выходом рельсов категории OT350(T1).

2.5 Анализ рельсового хозяйства

В таблице 2.7 показаны все ранее проанализированные эксплуатационные характеристики рельсового хозяйства метрополитена в период с 2014 по 2019 годы в зависимости от типа и категории рельсов. Кроме того, добавлено распределение замененных рельсов в период с 2014 по 2019 годы.

Таблица 2.7 – Анализ рельсового хозяйства метрополитена

Годы	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Протяженность, км:						
Общая	622,5	624,6	663,6	684,3	697,9	723,5
P50	412,8	412,8	412,8	412,8	412,8	412,8
P65	209,7	211,8	250,8	271,5	285,1	310,7
Протяженность в зависимости от плана пути (P50), км:						
$R \leq 300$	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
$300 < R < 600$	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1
$600 \leq R < 800$	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8
$R \geq 800$	48,0	48,0	48,0	48,0	48,0	48,0
Прямые	250,2	250,2	250,2	250,2	250,2	250,2
Протяженность в зависимости от плана пути (P65), км:						
$R \leq 300$	4,8	5,0	6,3	6,9	7,0	7,5
$300 < R < 600$	23,2	23,9	33,6	35,1	37,0	42,9
$R \geq 600$	43,8	44,8	56,2	62,5	64,6	73,1
Прямые	137,9	138,1	154,7	167,0	171,5	187,2
Протяженность в зависимости от категории рельсов (P50), км:						
НТ260	412,8	412,8	412,8	412,8	412,8	412,8
Протяженность в зависимости от категории рельсов (P65), км:						
НТ260	68,1	65,5	64,1	61,3	59,9	54,4
ОТ350	141,6	146,3	173,8	182,1	184,9	186,0
ДТ350	-	-	12,9	28,1	35,3	70,3
Количество замененных рельсов, шт.:						
Общее	1176	2272	1695	1301	1015	554
P50	929	1840	1316	920	683	324
P65 категории:						
НТ260	146	125	136	146	132	62
ОТ350 и ДТ350	101	307	243	235	200	168

Исходя из таблицы 2.7 наблюдается общее снижение количества выхода рельсов всех типов и категорий, несмотря на неизменную протяженность рельсов

типа P50 и увеличивающуюся протяженность рельсов типа P65. Это может быть связано с тем, что в последние годы существенно выросло качество текущего содержания пути метрополитена.

Кроме того, средневзвешенный по протяженности удельный выход рельсов типа P50 за рассматриваемый период составляет 2,43 шт./км, рельсов типа P65 категорий ОТ350 и ДТ350 – 1,08 шт./км, а категории НТ260 – 2,00 шт./км. Ввиду того, что все рельсы типа P50 категории НТ260, а рельсы типа P65 категорий НТ260, ОТ350 и ДТ350, можно сделать предположение о том, что меньший удельный выход рельсов типа P65 обусловлен, прежде всего, не типом, а категорией рельсов (видом термоупрочнения).

2.6 Анализ удельного выхода рельсов в зависимости от пропущенного тоннажа

Для анализа интенсивности возникновения выхода рельсов Службой пути и искусственных сооружений и Центром диагностики и мониторинга объектов инфраструктуры ГУП «Московский метрополитен» были предоставлены данные в электронном виде по одиночному выходу рельсов за период с 2014 по 2019 годы по всем линиям метрополитена. Пример ведомости замененных рельсов представлен на рисунке 2.6.

Лин	Гид	Путь	Перегон	Дата обнаружения	Шпала	Г/м	Длина ре	Плеча пути	Дата укладки	Пор. тол	Проп. тол	Факт. а	Дата факт. а	№ ВД	Нитро	И/Т	Тип рель	Время при	Завод	Палеца	Высота	Код дефе	Описание	Дефект
01	018	001	Бульвар Фрунзевского-Чернышевская	04.01.2017	113	93,90	6,39	9 999,9	18.07.2014	230,0	284,1	Г/С	01.03.2017	А	Р65	04.2014	Н	Р2028917502	Б	11,2	3,240	н/н		
01	011	001	Преображенская площадь-Сокольники	12.04.2017	75	45,00	15,24	400,0	02.07.2014	210,0	120,0	Г/С	20.04.2017	А	Р50	05.2014	К	Р188071204	Б	19,1	4,060	н/н		
01	011	002	Преображенская площадь-Сокольники	08.10.2017	68	42,00	12,31	9 999,9	01.09.2009	470,0	324,2	Г/С	29.06.2017	Б	Р50	07.2009	Н	Р2059414	Ш	19,2	2,103	н/н		
01	011	001	Преображенская площадь-Сокольники	10.05.2017	63	88,00	7,00	401,9	31.01.2017	210,0	38,7	Г/А	28.11.2017	Б	Р60	12.2016	Н	Б	08,2	2,044	н/н			
01	011	001	Преображенская площадь-Сокольники	10.05.2017	63	88,00	7,00	401,9	31.01.2017	210,0	18,3	Г/С	24.06.2017	Б	Р50	12.2016	Н	Б	11,2	3,440	н/н			
01	011	001	Преображенская площадь-Сокольники	12.01.2017	63	38,00	6,49	401,0	30.07.2011	210,0	225,8	Г/С	18.01.2017	А	Р60	04.2011	К	Р9821574	Б	10,2	4,151	н/н		
01	011	001	Сокольники-Красносельская	10.01.2017	21	8,00	9,99	9 999,9	03.10.2011	470,0	224,2	Н	30.02.2017	А	Р50	08.2011	Н	Р2028467602	Ш	13,1	3,300			
01	011	001	Сокольники-Красносельская	26.08.2017	46	71,00	9,95	9 999,9	12.12.2008	470,0	283,6	Н	28.06.2017	Б	Р50	12.2008	Н	Р9570319	Ш	13,1				
01	011	001	Красносельская-Комсомольская (Сокольники)	07.03.2017	38	57,00	6,95	1 000,0	20.02.2008	400,0	317,5	Г/С	16.03.2017	А	Р50	02.2008	Н	Р9572276	Ш	11,2	3,430	н/н		
01	011	001	Красносельская-Комсомольская (Сокольники)	19.11.2016	36	23,00	6,25	800,0	25.04.2007	400,0	422,5	Г/С	22.06.2017	А	Р50	04.2007	Н	Р9411585	Ш	64,2	5	н/н		
01	011	001	Красносельская-Комсомольская (Сокольники)	11.08.2017	35	41,00	12,50	9 999,9	08.02.2016	470,0	73,5	Г/С	27.09.2017	А	Р50	08.2016	Н	Р15481403	Ш	64,2	5,5	н/н		
01	011	001	Красносельская-Комсомольская (Сокольники)	10.10.2017	35	16,00	12,50	800,0	19.11.2015	400,0	85,6	Г/С	25.10.2017	Б	Р60	06.2014	Н	Р2443801405	Ш	68,72	2 мм	н/н		
01	011	001	Комсомольская (Сокольники)-Красно	10.01.2017	30	85,00	12,51	9 999,9	23.12.2008	470,0	353,3	Г/С	08.02.2017	Б	Р50	12.2008	Н	Р9570315	Б	64,2	5,40	н/н		
01	011	001	Красные ворота-Чистые пруды	11.04.2017	20	44,00	12,60	600,0	20.06.2013	340,0	218,5	Г/С	21.06.2017	А	Р50	09.2013	Т	Р1244694036	Б	10,2	3,425	н/н		
01	011	001	Красные ворота-Чистые пруды	01.11.2017	17	26,00	8,99	395,0	29.08.2014	210,0	340,4	Г/С	22.11.2017	Б	Р50	05.2014	Н	Р131701203	Ш	16,3	3,030	н/н		
01	011	001	Чистые пруды-Лубянка	04.01.2017	11	47,00	12,55	820,0	25.04.2012	400,0	201,0	Г/С	09.02.2017	А	Р50	11.2011	Н	Р202894204	Ш	11,2	3,425	н/н		
01	011	001	Лубянка-Останкинский рзд.	23.11.2016	4	46,00	12,50	9 999,9	19.11.2012	470,0	392,4	Г/С	10.06.2017	Б	Р50	12.2011	Н	Р202821373	Б	64,2	5	н/н		
01	011	001	Останкинский рзд.Библиотека им. Ленина	06.10.2017	4	-79,00	12,50	400,0	19.07.2014	210,0	244,4	Г/С	22.11.2017	А	Р50	05.2014	Н	Р140864026	Б	19,1	2,260	н/н		
01	015	001	Библиотека им. Ленина-Крилатинская	20.11.2017	-13	-94,00	16,41	9 999,9	01.12.2005	470,0	505,6	Г/С	28.12.2017	А	Р50	12.2005	К	Р9558806	Ш	19,2	4,55	1 100,0	н/н	
01	015	001	Библиотека им. Ленина-Крилатинская	02.07.2018	-18	-17,00	24,99	9 999,9	01.01.2004	470,0	478,9	Н/С	24.05.2017	А	Р50	01.2004	Н	Р9416873	Б	68,1	5	н/н		
01	015	001	Комсомольская-Парк Культуры (Сокольники)	22.11.2016	-20	-24,29	12,82	400,0	12.01.2017	210,0	20,4	Н/С	30.06.2017	А	Р50	02.2016	К	Р136136201	Б	68,1	5	н/н		
01	015	001	Комсомольская-Парк Культуры (Сокольники)	06.10.2017	-23	-90,50	6,23	600,0	02.03.2013	340,0	199,9	Г/С	10.11.2017	Б	Р50	11.2012	Т	Р9118226	Ш	98,1	5	н/н		
01	015	001	Комсомольская-Парк Культуры (Сокольники)	11.11.2016	-29	-52,00	24,98	9 999,9	01.06.2005	470,0	409,4	Н/С	17.06.2017	Б	Р50	06.2005	К	Р9511078	Б	64,2	5,5	н/н		
01	015	001	Комсомольская-Парк Культуры (Сокольники)	30.09.2017	-20	-60,00	15,04	9 999,9	01.06.2005	470,0	324,2	Г/С	24.11.2017	Б	Р50	06.2005	Н	Р2012098	Б	64,2	5,5	мм	н/н	
01	015	001	Парк Культуры (Сокольники)-Фрунзе	02.02.2017	-32	-41,00	8,78	9 999,9	05.04.2007	470,0	483,1	Г/С	15.06.2017	Б	Р60	04.2007	Н	Р9565677	Ш	11,2	3,425	н/н		
01	015	001	Парк Культуры (Сокольники)-Фрунзе	28.06.2018	-41	-80,00	6,23	9 999,9	25.11.2006	470,0	467,1	Г/С	18.03.2017	А	Р50	11.2006	Н	Р9416876	Б	11,2	3,430	н/н		
01	015	001	Парк Культуры (Сокольники)-Фрунзе	28.10.2016	-42	-40,00	12,50	299,6	20.11.2015	150,0	48,5	Н/С	18.01.2017	Б	Р50	12.2011	Н	Р20650104	Б	13,1	6,18	н/н		
01	015	001	Парк Культуры (Сокольники)-Фрунзе	15.07.2013	-42	-65,00	26,89	800,0	25.11.2006	400,0	418,3	Н/С	18.01.2017	Б	Р50	11.2006	Н	Р9418032	Б	98,1	5	н/н		
01	015	001	Парк Культуры (Сокольники)-Фрунзе	15.08.2015	-42	-80,00	20,10	800,0	25.11.2006	400,0	418,3	Н/С	18.01.2017	Б	Р50	11.2006	Н	Р9418076	Б	11,2	3,435	н/н		
01	015	001	Парк Культуры (Сокольники)-Фрунзе	19.10.2016	-42	-83,50	20,10	800,0	25.11.2006	400,0	418,3	Н/С	18.01.2017	Б	Р50	11.2006	Н	Р9418076	Б	11,2	3,430	н/н		
01	015	001	Парк Культуры (Сокольники)-Фрунзе	01.10.2015	-43	-41,50	12,50	800,0	25.11.2006	400,0	418,3	Н/С	18.01.2017	Б	Р50	11.2006	Н	Р9418033	Б	11,2	3,434	н/н		
01	015	001	Парк Культуры (Сокольники)-Фрунзе	09.07.2016	-44	-7,50	12,70	800,0	25.11.2006	400,0	418,3	Н/С	18.01.2017	Б	Р50	11.2006	Н	Р9418035	Б	11,2	3,440	н/н		
01	015	001	Парк Культуры (Сокольники)-Фрунзе	04.07.2017	-45	-3,00	6,25	9 999,9	25.12.2006	470,0	464,1	Г/С	20.06.2017	А	Р50	11.2006	Н	Р9418031	Б	11,2	2,9425	н/н		
01	014	001	Фрунзенская-Спортивная	13.10.2017	-53	-28,00	12,50	1 200,0	04.02.2009	400,0	361,1	Г/С	18.10.2017	Б	Р50	02.2009	К	Р9570297	Б	98,1	2 мм	н/н		
01	014	001	Фрунзенская-Спортивная	27.01.2014	-51	-40,00	12,50	1 200,0	04.02.2009	400,0	361,1	Г/С	28.10.2017	Б	Р50	02.2009	К	Р9570297	Б	64,2	5,8	н/н		
01	014	001	Спортивная-Воробьевы Горы	18.01.2017	-58	-48,00	1,00	9 999,9	04.02.2009	470,0	350,0	Г/С	19.07.2017	А	Р50	02.2009	К	Р9570258	Б	64,2	5,8	н/н		
01	014	001	Спортивная-Воробьевы Горы	23.04.2017	-60	-40,00	7,99	300,0	22.01.2016	150,0	52,0	Г/С	24.03.2017	Б	Р50	12.2012	Н	Р2442801203	Б	98,72	5	н/н		
01	014	001	Спортивная-Воробьевы Горы	23.03.2017	-60	-48,00	7,95	800,0	22.01.2016	150,0	52,0	Г/С	24.03.2017	Б	Р50	12.2012	Н	Р145820105	Б	98,72	5	н/н		

Рисунок 2.6 – Пример ведомости замененных рельсов

Для возможности корректного сравнения выхода рельсов весь полигон был разбит на однородные участки по следующим параметрам:

- по типу рельсов: Р50 и Р65;
- в зависимости от диапазонов плана пути, по которому назначается сплошная смена рельсов, приведенного в таблице 1.2;
- по категории рельсов. Для рельсов типа Р50 – категория НТ260. Для рельсов типа Р65 рассматривались только категории ОТ350 и ДТ350, ввиду того что рельсы категории НТ260 постепенно изымаются из пути и заменяются рельсами других категорий.

В паспорте дистанции пути не содержится информации о пропущенном тоннаже рельса и к какому типу плана линии принадлежит каждый рельс. Такая информация содержится в разных таблицах. Пример паспорта дистанции пути представлен на рисунках 2.7 и 2.8. Поэтому, для определения более полной информации о рельсе (пропущенный тоннаж и принадлежность к плану) был составлен программный код, представленный в приложении А.

РЕЛЬСЫ НА ПУТИ																	
Путь	Нитка	Начало рельса (ПК + м)	Конец рельса (ПК + м)	Длина рельса	Вид рельса	Наименование вышестоящего объекта	Плеть	Тип рельса	Тип стыка	Дата сварки	Дата укладки	Прокат	Категория качества	Вид плавки	Плавка сердечника	Завод	Номер стыка
<i>Сокольническая линия 001 путь левая нитка</i>																	
001	ле	120	90,50	120	84,19	6,31	Рельс	р	Р50	ИА	01.08.1990	08.1990	Н	Б/ПЛ		А	
001	ле	120	84,19	120	73,00	11,19	Рельс	р	Р50	ИА	01.08.1990	08.1990	Н	22418		А	10000029174
001	ле	120	73,00	120	61,23	11,77	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПС191		А	
001	ле	120	61,23	120	48,73	12,50	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ЭВБ540		А	
001	ле	120	48,73	120	36,22	12,51	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	Б/ПЛ		А	
001	ле	120	36,22	120	23,73	12,49	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПЕ1408		А	
001	ле	120	23,73	120	11,23	12,50	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПЕ1408		А	
001	ле	120	11,23	119	98,73	12,50	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПФ128		А	
001	ле	119	98,73	119	86,22	12,51	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	Б/ПЛ		А	
001	ле	119	86,22	119	73,77	12,45	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПФ128		А	
001	ле	119	73,77	119	61,27	12,50	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПН636К		А	
001	ле	119	61,27	119	48,71	12,56	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПН636К		А	
001	ле	119	48,71	119	36,20	12,51	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПЕ80		А	
001	ле	119	36,20	119	23,70	12,50	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПН4780		А	
001	ле	119	23,70	119	11,19	12,51	Рельс	р	Р65	ИА	01.08.1990	08.1990	Н	ГПР1842		А	10000029173
001	ле	119	11,19	118	98,70	12,49	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПЕ80		А	
001	ле	118	98,70	118	86,20	12,50	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПБ1648		А	
001	ле	118	86,20	118	73,70	12,50	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПС121		А	
001	ле	118	73,70	118	61,18	12,52	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПВ1542		А	
001	ле	118	61,18	118	48,57	12,61	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПН471Е		А	
001	ле	118	48,57	118	36,16	12,41	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПВ1542		А	
001	ле	118	36,16	118	23,65	12,51	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПВ86Р		А	
001	ле	118	23,65	118	11,15	12,50	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПН1524А		А	
001	ле	118	11,15	117	98,64	12,51	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПН424А		А	
001	ле	117	98,64	117	86,12	12,52	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПН1671Б		А	
001	ле	117	86,12	117	67,33	18,79	Рельс	р	Р65	ТЭ	01.08.1990	08.1990	Н	ГПН471Б		А	
001	ле	117	67,33	117	60,84	6,49	Рельс	р	Р65	ИА	01.08.1990	08.1990	Н	ГПЕ80		А	10000029174

Рисунок 2.7 – Пример рельсовой книги из паспорта Сокольнической дистанции пути (ПЧ-1)

ПЛАН ПУТИ																				
№ кривой	Радиус кривой	Начало		Начало		Конец		Конец		Стор. пов. (л/п)	Возв. нити (мм)	Ширина колеи (мм)	Эюра шпал (шт/км)	Протяжение (м)				Угол поворота г / мм / сс.с		
		1 пер. кривой (ПК + м)	2 пер. кривой (ПК + м)	1 пер. кривой (ПК + м)	2 пер. кривой (ПК + м)	1 пер. кривой	круг. кривой	2 пер. кривой	всей кривой											
Сокольническая линия 001 путь																				
99 999.9	120	90,50	120	90,50	110	49,70	110	49,70			0	1 520	0	0,00	1 040,80	0,00	1 040,80	0	0	0,0
15А	300,0	110	49,70	109	89,70	106	87,70	106	27,70	прав	120	1 535	1 840	60,00	282,14	60,00	402,14	53	53	4,7
99 999.9	106	27,70	106	27,70	104	26,80	104	26,80			0	1 520	0	0,00	200,90	0,00	200,90	0	0	0,0
14А	1 200,0	104	26,80	103	77,00	103	54,70	103	4,70	прав	105	1 524	1 680	50,00	22,30	50,00	122,30	1	3	53,1
99 999.9	103	4,70	103	4,70	102	84,70	102	84,70			0	1 520	0	0,00	20,00	0,00	20,00	0	0	0,0
13А	1 200,0	102	84,70	102	34,70	102	12,40	101	62,40	лев	105	1 524	1 680	50,00	22,30	50,00	122,30	1	3	53,1
99 999.9	101	62,40	101	62,40	98	84,10	98	84,10			0	1 520	0	0,00	278,30	0,00	278,30	0	0	0,0
12Б	200,0	98	84,10	98	84,10	98	62,00	98	62,00	прав	20	1 535	1 680	0,00	22,10	0,00	22,10	6	19	52,2
99 999.9	98	62,00	98	62,00	98	44,50	98	44,50			0	1 520	0	0,00	17,50	0,00	17,50	0	0	0,0
12А	200,0	98	44,50	97	80,50	96	5,80	95	60,80	прав	120	1 535	1 840	45,00	174,70	45,00	264,70	50	2	51,9
99 999.9	95	60,80	95	60,80	93	51,70	93	51,70			0	1 520	0	0,00	209,10	0,00	209,10	0	0	0,0
11А	400,0	93	51,70	92	81,00	92	35,50	91	70,80	прав	120	1 530	1 840	69,99	45,50	65,00	180,49	6	31	2,6
99 999.9	91	70,80	91	65,00	91	21,00	91	21,00			0	1 520	0	0,00	44,00	5,80	49,80	0	0	0,0
10Б	200,0	91	21,00	91	21,00	90	99,00	90	99,00	лев	20	1 535	1 840	0,00	22,30	0,00	22,00	6	23	18,5
99 999.9	90	99,00	90	99,00	90	66,10	90	66,10			0	1 520	0	0,00	32,90	0,00	32,90	0	0	0,0
10А	402,0	90	66,10	89	96,80	89	71,00	89	1,30	лев	120	1 530	1 840	69,60	25,80	69,70	165,10	3	40	37,9
99 999.9	89	1,30	89	1,30	87	21,00	87	21,00			0	1 520	0	0,00	180,90	0,00	180,30	0	0	0,0
9А	797,7	87	21,00	86	17,60	85	68,20	84	64,80	прав	120	1 520	1 840	103,40	48,98	103,40	255,79	3	31	4,9
99 999.9	84	64,80	84	64,80	84	15,30	84	15,30			0	1 520	0	0,00	49,50	0,00	49,50	0	0	0,0
8А	1 500,0	84	15,30	83	75,30	82	59,00	82	19,00	лев	80	1 520	1 680	40,00	116,50	40,00	196,50	4	26	59,9
99 999.9	82	19,00	82	19,00	80	26,90	80	26,90			0	1 520	0	0,00	192,10	0,00	192,10	0	0	0,0
7Б	200,0	80	26,90	80	26,90	80	6,90	80	6,90	прав	10	1 535	1 840	0,00	20,00	0,00	20,00	5	43	46,4
99 999.9	80	6,90	80	6,90	80	0,10	80	0,10			0	1 524	1 840	0,00	6,80	0,00	6,80	0	0	0,0

Рисунок 2.8 – Пример плана пути из паспорта Сокольнической дистанции пути (ПЧ-1)

Кроме того, для более точного предоставления данных необходимо перейти к удельному числу выхода рельсов.

Переход от абсолютной величины к удельной осуществляется по формуле

$$n_{уд} = \frac{n_{деф}}{n_{км}}, \quad (2.1)$$

где $n_{уд}$ – удельное число дефектных рельсов, обнаруженных в данном подмножестве за один год, шт./км;

$n_{деф}$ – полное число дефектных рельсов, обнаруженных в данном подмножестве за один год, шт.;

$n_{км}$ – число километров, км.

Для возможности анализа интенсивности выхода рельсов необходимо построить график фактического выхода рельсов нарастающим итогом в зависимости от пропущенного тоннажа. Кривая строилась по следующему принципу:

- ввиду разного пропущенного тоннажа у каждого замененного рельса и разной нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов (таблица 1.2) для разных типов рельсов и плана пути замененные рельсы были объединены в

массивы с интервалом 20 % от значения нормативной наработки до сплошной смены рельсов. В методике УРРАН [113] каждое множество рельсов поделено на подмножества с шагом через одну четверть (25 %), однако для метрополитена такая градация не является возможной из-за меньшего размера выборки данных;

- после объединения замененных рельсов в массивы был выполнен переход к удельному значению выхода рельсов;

- было определено значение выхода рельсов нарастающим итогом для каждого значения в ранее заданных интервалах пропущенного тоннажа N ($0,2N$, $0,4N$, $0,6N$, $0,8N$, N).

На рисунках 2.9 – 2.13 представлены графики выхода рельсов типа Р50.

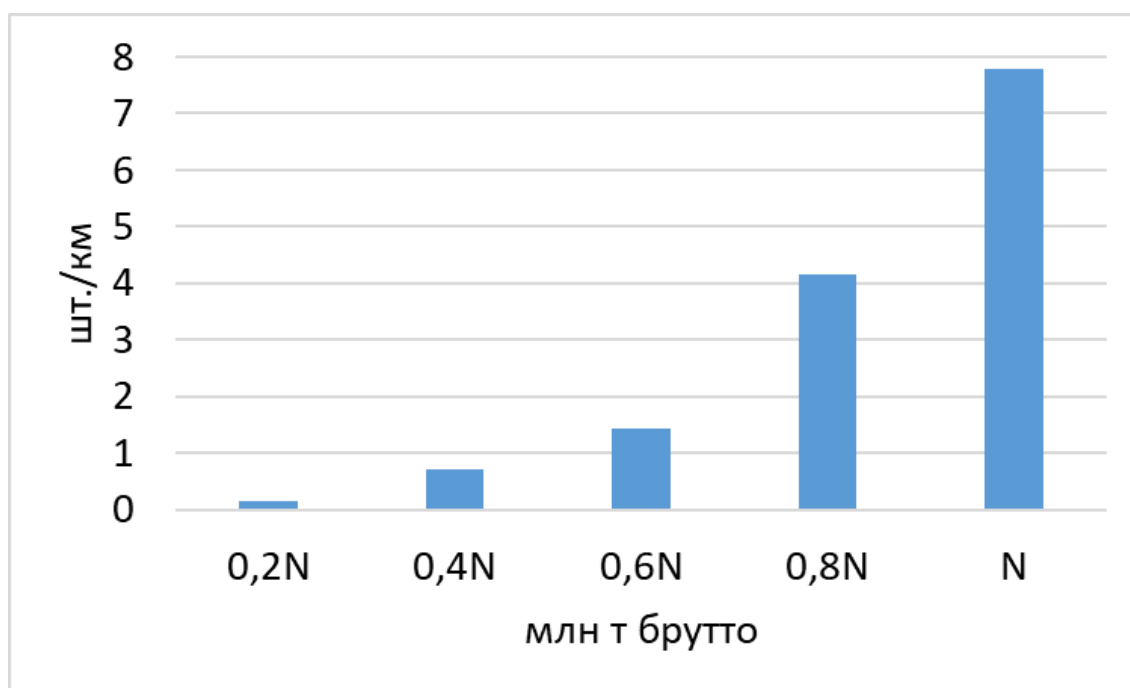


Рисунок 2.9 – Диаграмма выхода рельсов в кривых радиусом 300 м и менее

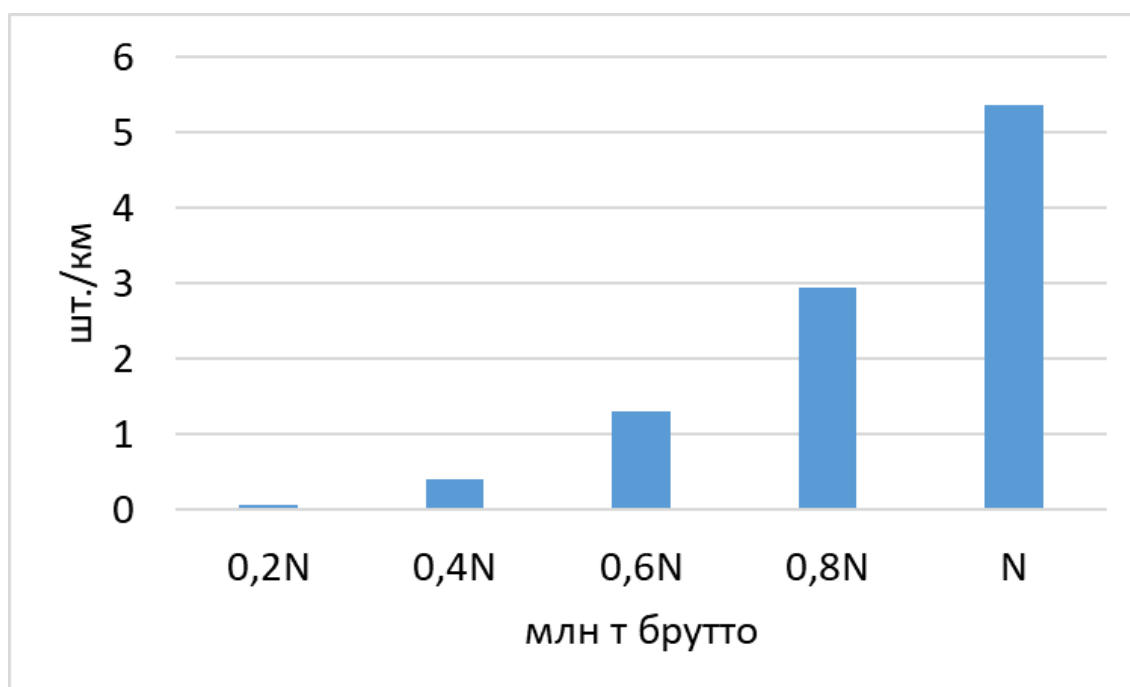


Рисунок 2.10 – Диаграмма выхода рельсов в кривых радиусом от 301 до 599 м

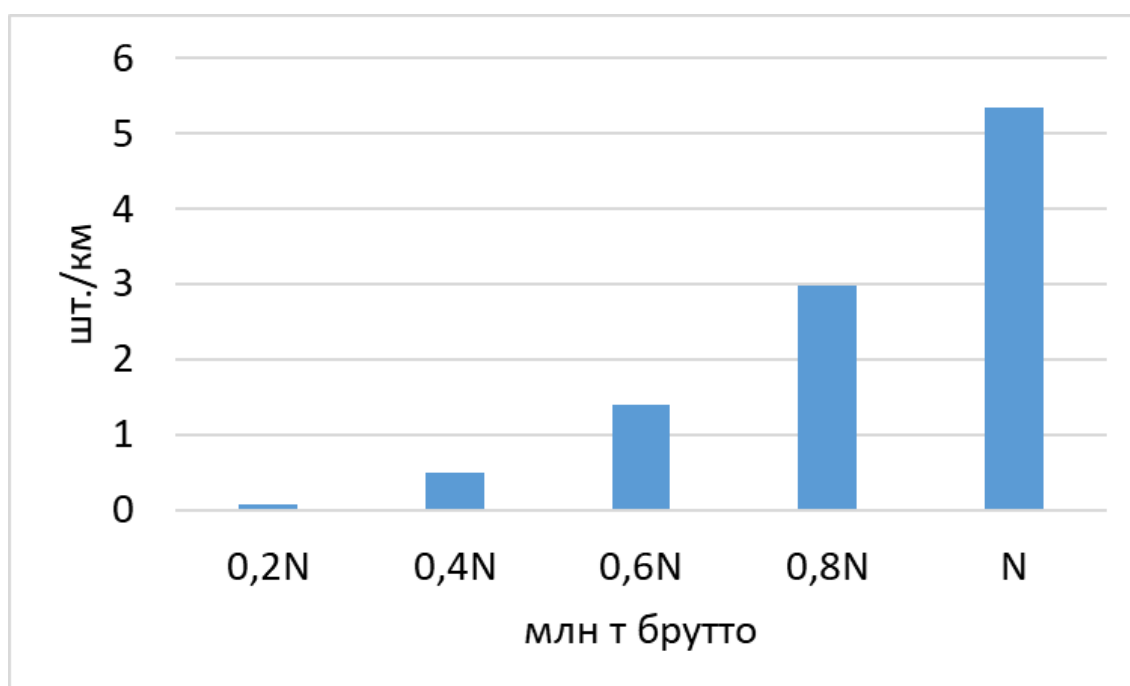


Рисунок 2.11 – Диаграмма выхода рельсов в кривых радиусом от 600 до 799 м

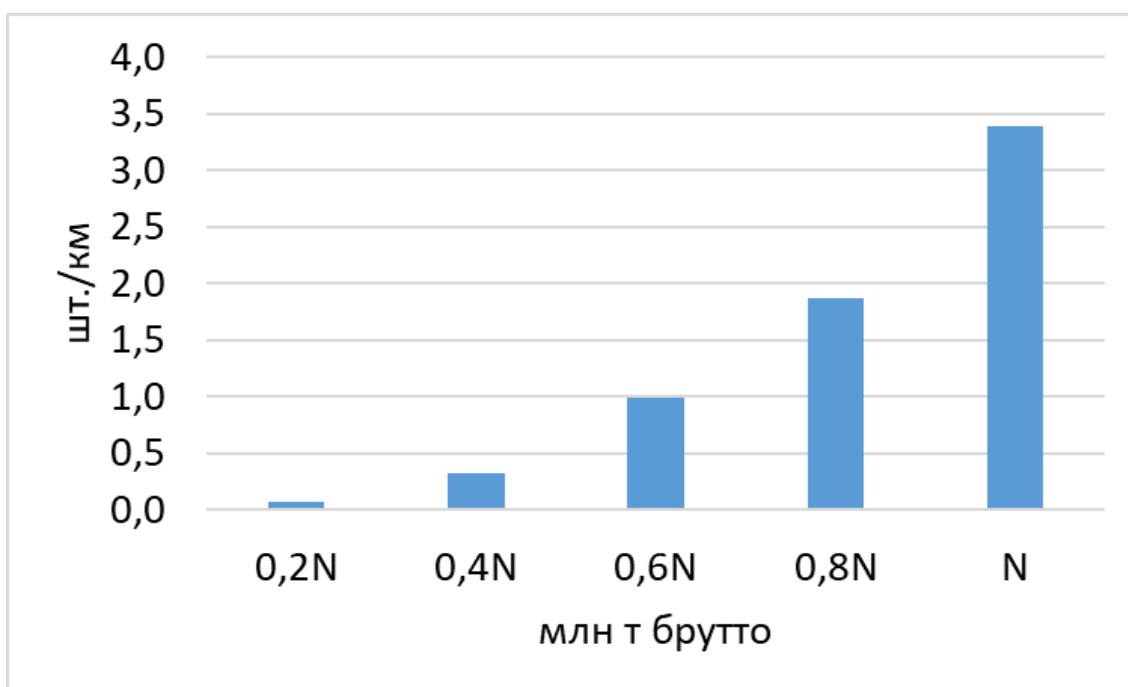


Рисунок 2.12 – Диаграмма выхода в кривых радиусом 800 м и более

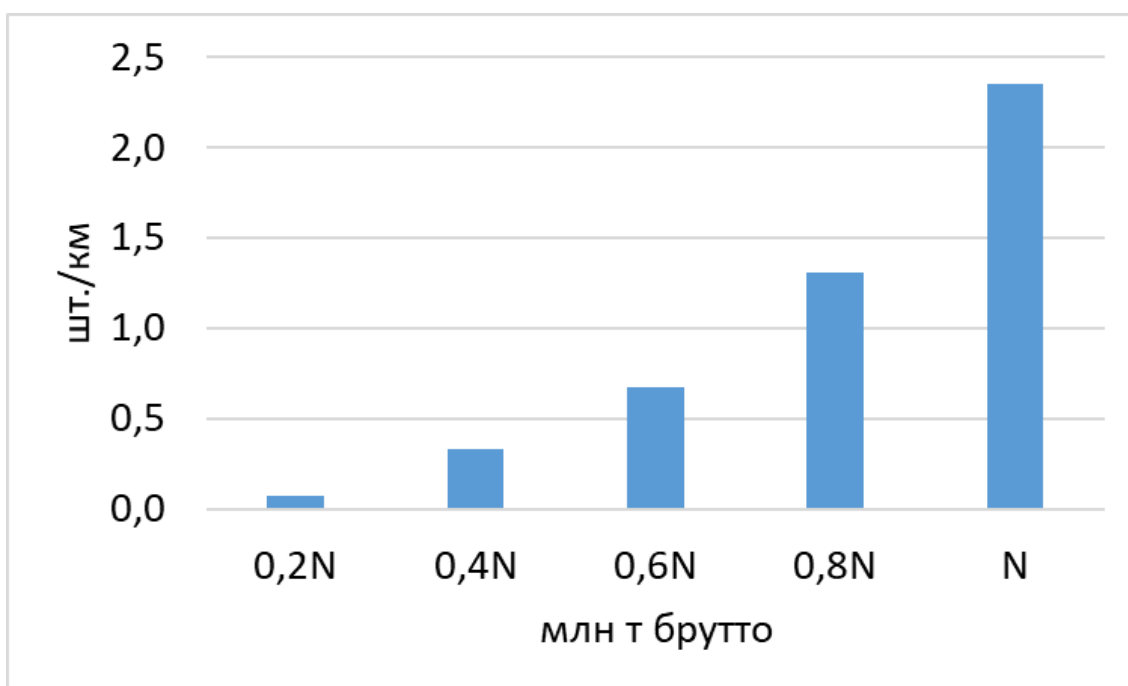


Рисунок 2.13 – Диаграмма выхода рельсов в прямых

Из рисунков 2.9 – 2.13 видно, что текущий критерий удельного выхода рельсов в 3 шт./км выполняется только в прямых участках пути. Аналогичные расчеты сделаны для рельсов типа Р65. Графики представлены на рисунках 2.14 – 2.17.

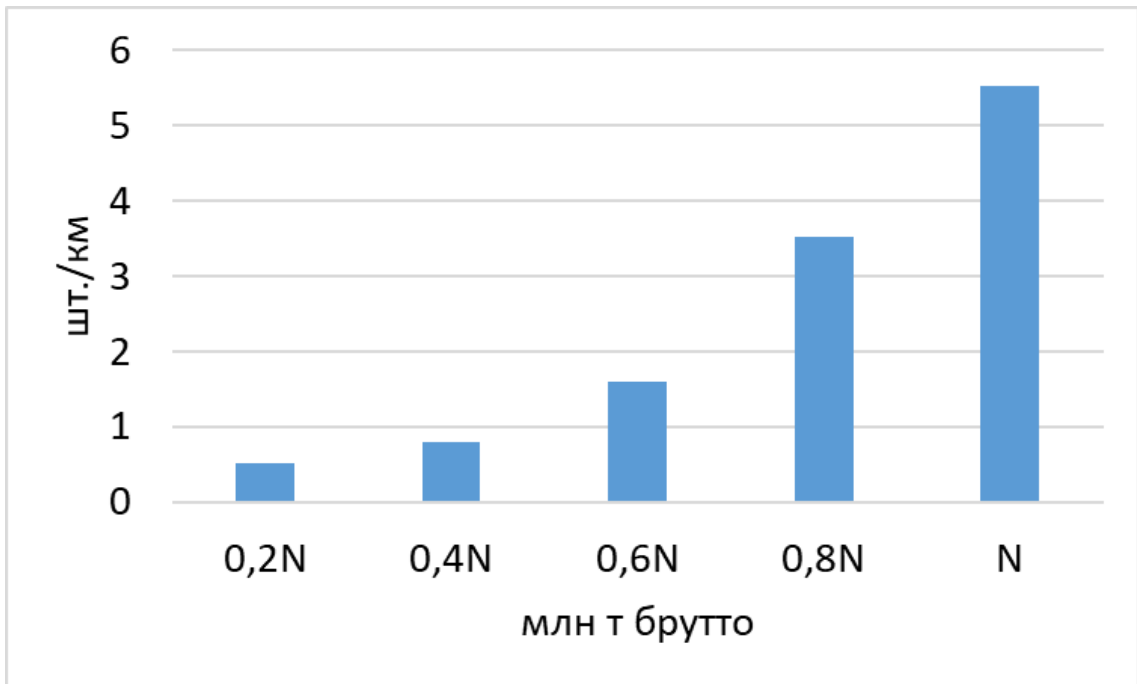


Рисунок 2.14 – Диаграмма выхода рельсов в кривых радиусом 300 м и менее

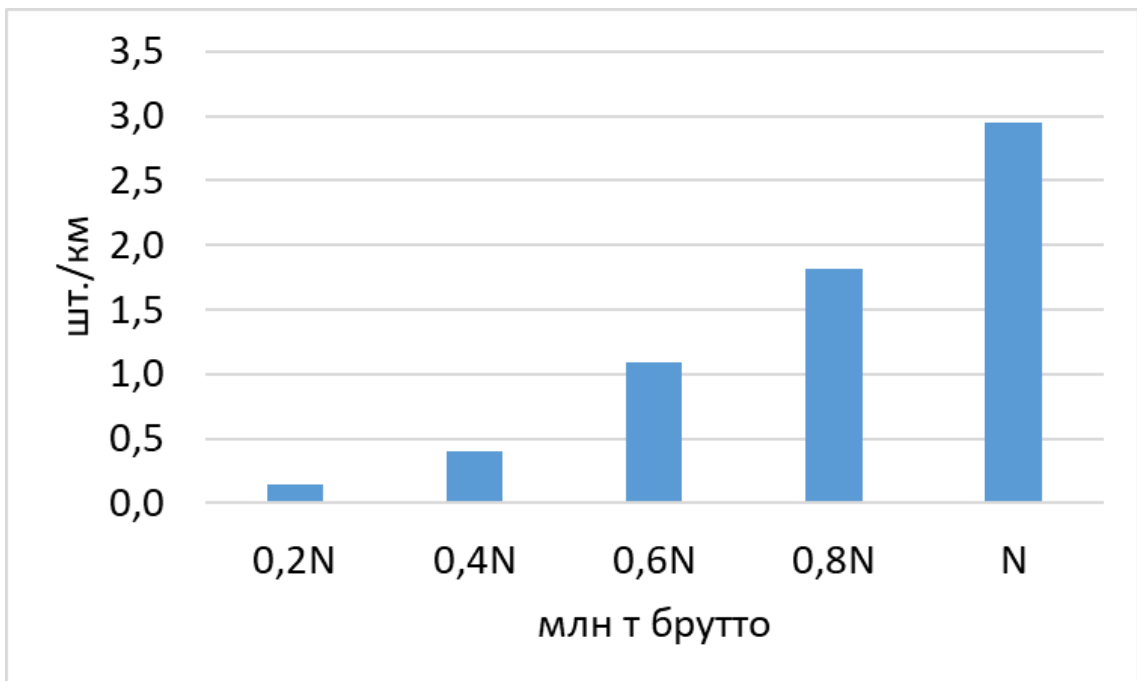


Рисунок 2.15 – Диаграмма выхода рельсов в кривых радиусом от 301 до 599 м

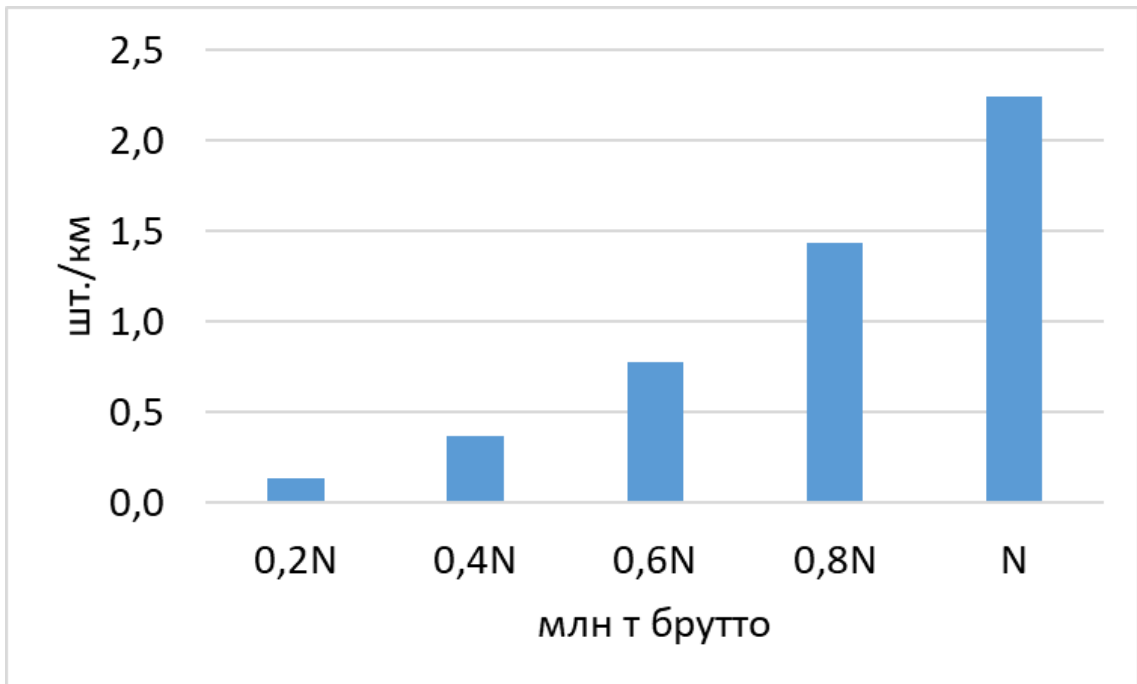


Рисунок 2.16 – Диаграмма выхода в кривых радиусом 600 м и более

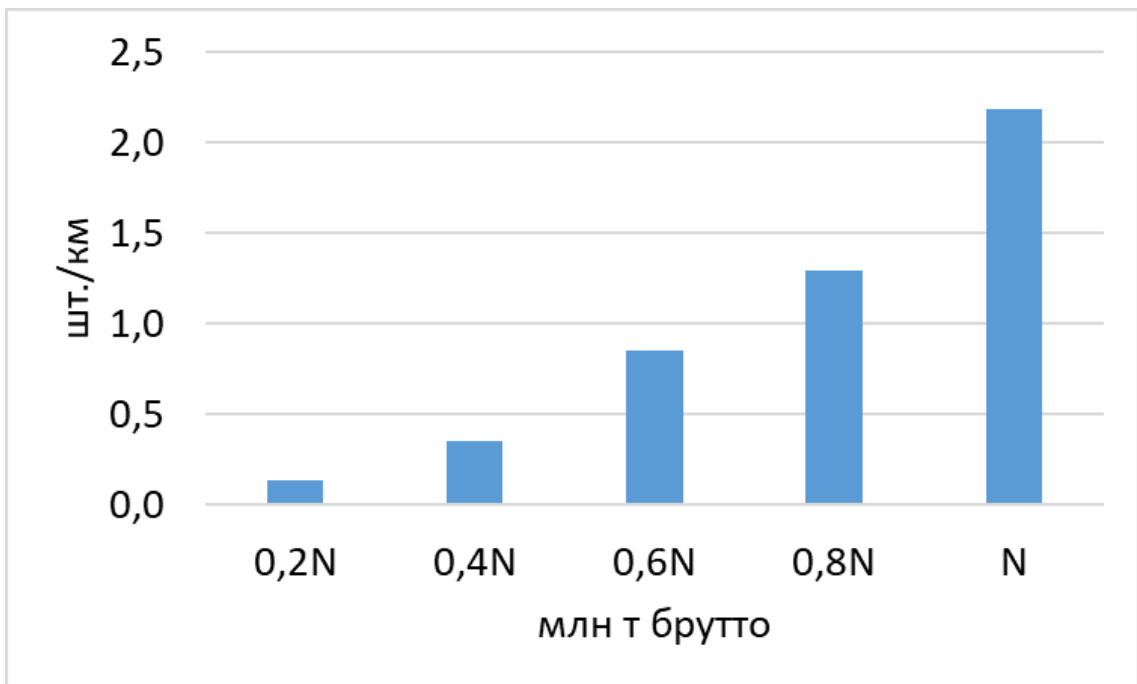


Рисунок 2.17 – Диаграмма выхода рельсов в прямых

Из рисунков 2.14 – 2.17 видно, что для рельсов типа Р65 текущий критерий удельного выхода рельсов в 3 шт./км выполняется везде, кроме кривых радиусом 300 м и менее.

Для наглядности диаграммы выхода рельсов в зависимости от диапазона плана пути объединены в один график и показаны на рисунках 2.18 и 2.19.

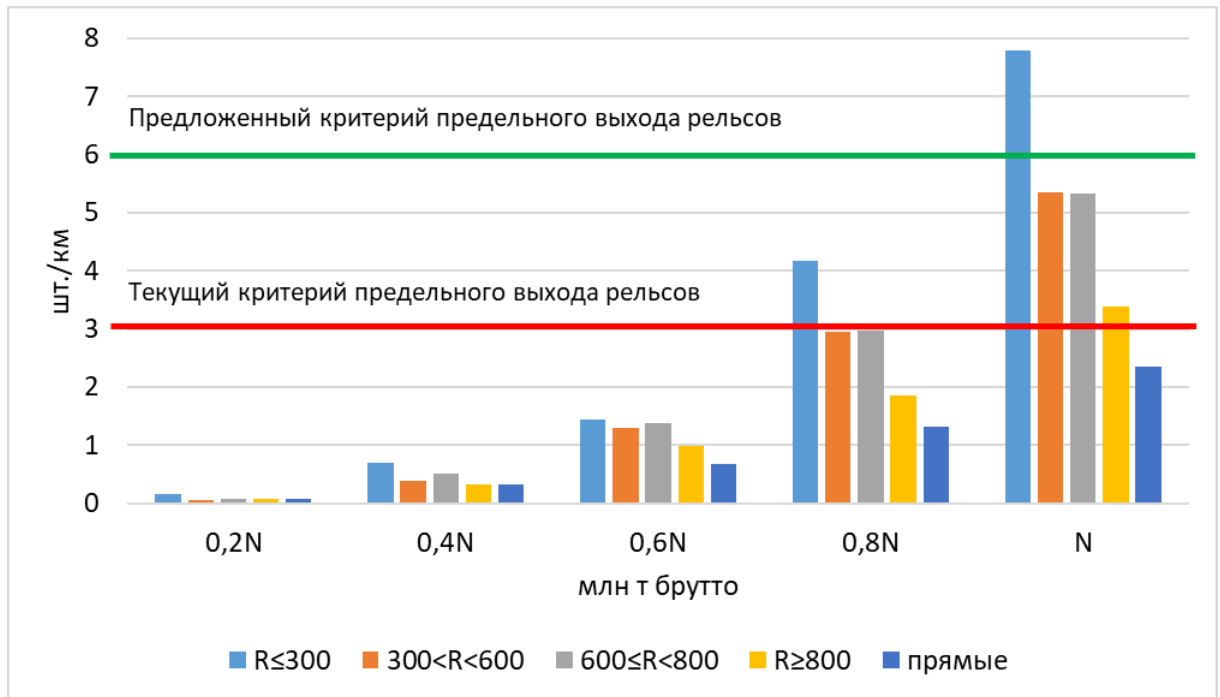


Рисунок 2.18 – Выход рельсов типа P50

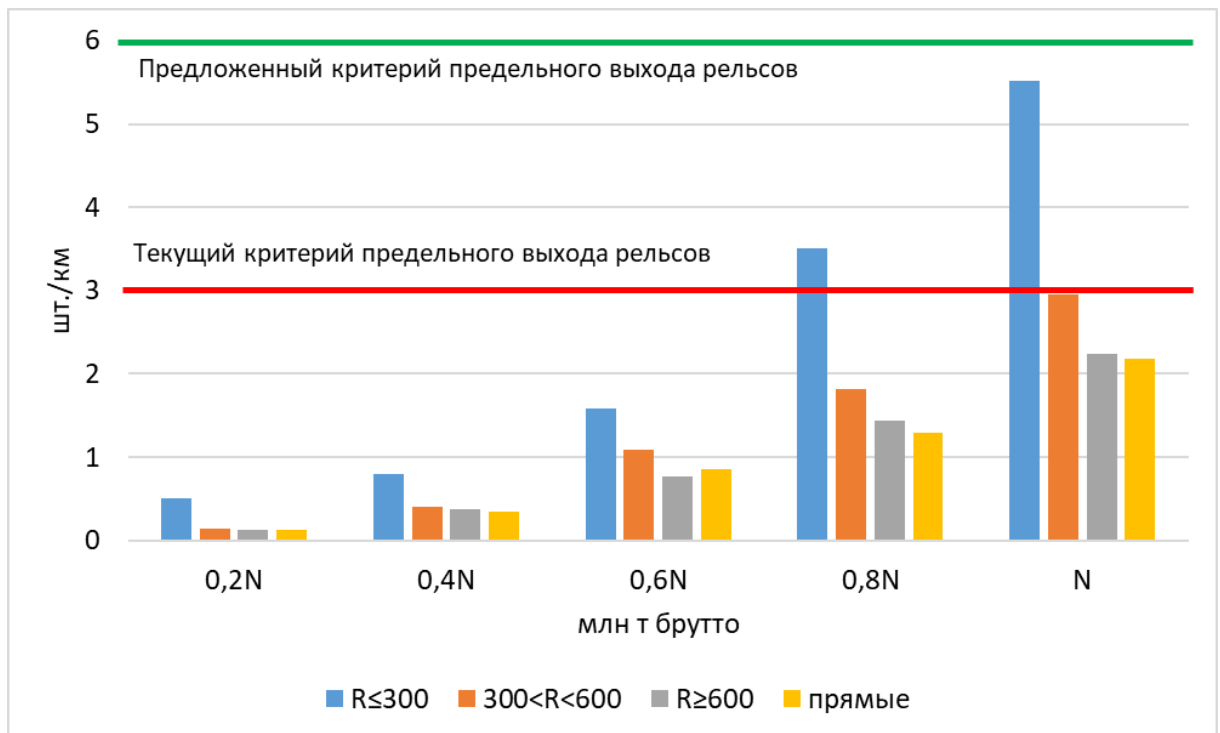


Рисунок 2.19 – Выход рельсов типа P65

Как было сказано ранее, действующий критерий выхода рельсов в 3 шт./км выполняется только в прямых участках пути для рельсов типа Р50, и в пологих кривых и прямых участках пути для рельсов типа Р65, а в остальных диапазонах плана пути выход больше при достижении нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов, то есть это значение не является определяющим при назначении сплошной смены рельсов.

При этом количество остродефектных рельсов стремится к нулю (их суммарное количество за анализируемый период – 5 шт.), а число дефектных рельсов на 2020 год составило 554 шт. что составляет менее 1 % от общего числа рельсов, лежащих в пути. Данные вопросы также рассмотрены в статьях [114, 115].

Другим аргументом для повышения критерия выхода рельсов служит то, что метрополитен по своим эксплуатационным характеристикам близок ко 2 классу пути железных дорог общего пользования, где грузонапряжённость составляет до 50 млн т брутто/км в год и скорости движения поездов составляют 61-100 км/ч. Предельное значение выхода рельсов для линий 2 класса составляет 6 шт./км [116].

Используя кривую усталости (кривую Велера) [117], можно сделать вывод, что при меньших напряжениях можно увеличить наработку тоннажа и задаться большим значением удельного выхода рельсов.

Исходя из вышесказанного, предлагается увеличить критерий предельного выхода рельсов с 3 шт./км до 6 шт./км и, соответственно, пересмотреть значение нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов, исходя из нового критерия предельного выхода рельсов.

2.7 Выводы к главе 2

1) Согласно проведенному анализу, были выделены основные эксплуатационные характеристики: тип, план пути и категория рельсов, которые использованы для дальнейшего анализа.

2) На 2020 год рельсы типа Р50 имели наибольшую протяженность в метрополитене. В свою очередь виден рост протяжения рельсов типа Р65, что

связано с их укладкой при новом строительстве, которое интенсивно ведется последние годы.

3) В метрополитене имеет место преобладание прямых участков пути (на 2020 год – 60,6 % от общего протяжения рельсов типа Р50 и 60,2 % от общего протяжения рельсов типа Р65). Наименьшую протяженность имеют рельсы, уложенные в кривых радиусом 300 м и менее (на 2020 год – 3,6 % от общего протяжения рельсов типа Р50 и 2,4 % от общего протяжения рельсов типа Р65);

4) В метрополитене основными поставщиками рельсов являются Челябинский металлургический комбинат и металлургическая и горнодобывающая компания «ЕВРАЗ», включающая в себя Нижнетагильский металлургический комбинат (НТМК) и Новокузнецкий металлургический комбинат (ЗСМК). Также, ранее рельсы поставлялись с металлургического комбината «Азовсталь».

5) В метрополитене укладывают рельсы трех категорий: НТ260 – нетермоупрочнённые обычной прочности общего назначения, ОТ350 (старое обозначение Т1) – объемно-закаленные термоупрочненные общего назначения, ДТ350 – дифференцированно термоупрочнённые с прокатного нагрева общего назначения. Рельсы типа Р50 уложены только одной категории – НТ260. Рельсы типа Р65 уложены всех категорий. При этом рельсы категории НТ260 изымаются из пути и заменяются рельсами других категорий.

6) Средневзвешенный по протяженности удельный выход рельсов типа Р50 за 2014-2019 годы составляет 2,43 шт./км, рельсов типа Р65 категорий ОТ350 и ДТ350 – 1,08 шт./км, а категории НТ260 – 2,00 шт./км. Ввиду того, что все рельсы типа Р50 категории НТ260, а рельсы типа Р65 категорий НТ260, ОТ350 и ДТ350, можно сделать предположение о том, что меньший удельный выход рельсов типа Р65 обусловлен, прежде всего, не типом, а категорией рельсов (видом термоупрочнения).

7) Для анализа интенсивности возникновения отказов рельсов были подобраны аппроксимирующие функции фактического выхода рельсов нарастающим итогом в зависимости от пропущенного тоннажа. Методика нахождения удельного выхода рельсов адаптирована под условия метрополитена.

8) Из анализа интенсивности выхода рельсов получено, что действующий критерий выхода рельсов в 3 шт./км выполняется только в прямых участках пути для рельсов типа Р50, и в пологих кривых и прямых участках пути для рельсов типа Р65, а в остальных диапазонах плана пути выход больше при достижении нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов, то есть это значение не является определяющим при назначении сплошной смены рельсов.

9) Предлагается увеличить критерий предельного выхода рельсов с 3 до 6 шт./км и, соответственно, пересмотреть значение нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов, исходя из нового критерия предельного выхода рельсов.

3 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЛЬСОВОГО ХОЗЯЙСТВА ЗА СЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ СРОКОВ СЛУЖБЫ РЕЛЬСОВ

Во второй главе автором было предложено увеличить критерий предельного выхода рельсов с 3 до 6 шт./км и, соответственно, пересмотреть значение нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов, исходя из нового критерия предельного выхода рельсов.

Пересмотр нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов будет осуществляться по фактическим данным выхода рельсов, полученным в предыдущей главе. Автором будет выполнен обзор и анализ функций распределения для построения теоретических кривых выхода рельсов, из которых будет выполнена наиболее подходящая. После чего, будут определены новые значения нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов.

3.1 Анализ показателей надежности

Показатели надежности – это количественная характеристика одного или нескольких свойств, составляющих надежность объекта. Численные значения показателей могут быть выражены размерными или безразмерными величинами. Формулировка смысла показателя обычно отражает и способ получения его численного значения расчетным или опытным путем. Критериями надежности невосстанавливаемых объектов являются:

- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- плотность распределения наработки до отказа $f(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- средняя наработка до первого отказа T_{cp} .

Вероятностью безотказной работы в соответствии с ГОСТ 27.002-2015 [48] называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не произойдет ни одного отказа

$$P(t) = P(T > t), \quad (3.1)$$

где t – время или наработка, в течение которой определяется вероятность безотказной работы;

T – время или наработка от начала эксплуатации до первого отказа.

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением

$$\bar{P}(t) = \frac{N(t_i)}{N_0}, \quad (3.2)$$

где N_0 – число объектов в начале испытаний;

$N(t_i)$ – число безотказно проработавших объектов к моменту времени t_i .

При большом числе объектов N_0 статистическая оценка $\bar{P}(t)$ практически совпадает с вероятностью безотказной работы $P(t)$. На практике часто более удобной характеристикой является вероятность отказа $F(t)$.

Вероятностью отказа называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени возникнет хотя бы один отказ. Отказ и безотказная работа являются событиями несовместимыми и противоположными, поэтому

$$\begin{cases} F(t) = P(T \leq t) \\ F(t) = 1 - P(T) \\ \bar{F}(t_i) = \frac{r(t_i)}{N_0} \end{cases}, \quad (3.3)$$

где $r(t_i)$ – число отказов к моменту времени t_i .

Плотностью распределения наработка до отказа называется отношение числа отказавших объектов в единицу времени к первоначальному числу испытываемых объектов при условии, что все вышедшие из строя объекты не восстанавливаются.

Плотность распределения наработки до отказа $f(t)$ является дифференциальной формой закона распределения наработки до отказа

$$\left\{ \begin{array}{l} f(t) = -P'(t) = F(t) \\ F(t) = \int_0^t f(t)dt \\ P(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \end{array} \right. . \quad (3.4)$$

График плотности вероятности называют кривой распределения наработки до отказа. Статистическая оценка плотности вероятности безотказной работы имеет вид

$$\bar{f}(t) = \frac{n_i}{N_0 * \Delta t}, \quad (3.5)$$

где n_i – число отказов в интервале времени Δt .

Интенсивностью отказов называется отношение числа отказавших объектов в единицу наработки к числу объектов, безотказно работающих к рассматриваемому моменту времени

$$\bar{\lambda}(t_i) = \frac{n_i}{N(t_i) * \Delta t}. \quad (3.6)$$

Вероятностная оценка интенсивности отказов определяется по формуле

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{F(t)}. \quad (3.7)$$

Интенсивность отказов представляет собой условную плотность вероятности возникновения отказа невозстанавливаемого объекта (поскольку рельсы в пути заменяются, а не ремонтируются, их можно считать невозстанавливаемым объектом, хотя в целом сам путь – это восстанавливаемый объект), определяемую для рассматриваемого момента времени или наработки при условии, что до этого момента отказа не произошло.

Важнейшей характеристикой является средняя наработка до первого отказа, которая определяется как математическое ожидание величины t

$$M = T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t)dt. \quad (3.8)$$

По статистическим данным об отказах средняя наработка до первого отказа вычисляется по формуле

$$T_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0}, \quad (3.9)$$

где t_i – время или наработка безотказной работы i -го образца;

N_0 – число испытываемых образцов.

Основной характеристикой рассеивания случайной величины является дисперсия этой величины, которая определяется по формуле

$$D = \int_0^{\infty} (t - T_{\text{cp}})^2 f(t) dt. \quad (3.10)$$

Статистическая оценка дисперсии величины t имеет следующий вид

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} (t_i - T_{\text{cp}})^2}{(N_0 - 1)}. \quad (3.11)$$

За меру рассеивания принимают также среднее квадратическое отклонение, равное квадратному корню из дисперсии, взятому с положительным знаком

$$S = \sigma_t = \sqrt{\bar{D}}. \quad (3.12)$$

Рассмотренные критерии позволяют достаточно полно оценить надежность невосстанавливаемых изделий.

Исчерпывающей характеристикой надежности устройств с непрерывным характером работы служит закон распределения времени безотказной работы. Если известны вид закона и его параметры, то легко определить любую характеристику надежности [118].

3.2 Обзор функций распределения для прогнозирования отказов рельсов

Выбор функции распределения отказов рельсов базируется на понимании механизма изучаемого явления. Долговечность рельсов ограничивается различными дефектами усталостного происхождения. Причем интенсивность отказов с ростом пропущенного тоннажа увеличивается, что объясняется

необратимостью процесса накопления усталостных повреждений [119]. В связи с этим в практике [120 – 122] получили наибольшее применение модели нормального распределения, распределения Вейбулла, экспоненциальное и степенное распределение.

3.2.1 Описание нормального распределения для прогнозирования отказов рельсов

Нормальный закон распределения (закон Гаусса) часто хорошо согласуется с экспериментальными данными при испытаниях на надежность. Это относится к процессам, при которых отказы вызываются многими равнодействующими причинами. Параметрами распределения для нормального закона являются средняя наработка на отказ T_{cp} и её среднеквадратическое отклонение σ_t .

Функция распределения (повреждаемости) имеет вид

$$F(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * \sigma_t} * \int_0^t e^{-\frac{(t-T_{cp})^2}{2*\sigma_t^2}} * dt. \quad (3.13)$$

Функция надежности имеет вид

$$P(T) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} * \sigma_t} * \int_0^t e^{-\frac{(t-T_{cp})^2}{2*\sigma_t^2}} * dt. \quad (3.14)$$

Плотность распределения имеет вид

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * \sigma_t} * e^{-\frac{(t-T_{cp})^2}{2*\sigma_t^2}}. \quad (3.15)$$

Интенсивность отказов задается в виде

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{F(t)}. \quad (3.16)$$

Для упрощения расчета необходимо начало координат переместить на ось симметрии (в точку T_{cp}) и наработку представить в частях, пропорциональных среднему квадратическому отклонению, сделав замену переменной, приняв $\sigma_t = 1$

$$x = \frac{(t - T_{\text{ср}})}{\sigma_t}. \quad (3.17)$$

Тогда в новых координатах получим центрированную нормированную функцию с плотностью распределения

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{x^2}{2}}. \quad (3.18)$$

Интегральная функция имеет вид

$$F_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} * dx. \quad (3.19)$$

Эксплуатировать рельсы после полного отказа невозможно, поэтому для параметров распределения используют усеченные выборки. В случае усеченной выборки, когда в результате испытаний получены R возрастающих значений наработки ($R < N_0$) для отказавших объектов t_1, t_2, \dots, t_r , а N_{0-r} объектов по истечении некоторого времени $t_0 \geq t_r$ остались исправными, параметры $T_{\text{ср}}$ и σ_t можно оценить по методу квантилей. Квантиль порядка P есть такое значение U_P случайной величины x , для которой

$$F_0(x) = F_0(U_P) = P \quad (0 < P < 1), \quad (3.20)$$

$$t_i = T_{\text{ср}} + U_P * \sigma_t. \quad (3.21)$$

Значения функций $F_0(U_P) = P$ и соответствующие ей значения U_P можно найти в специальных таблицах нормального распределения [123]. Считается, что за время t_i вероятность выхода рельсов составляет

$$F(t_i) = \frac{R(t_i)}{N_0}. \quad (3.22)$$

Для этой вероятности (частоты) определяются квантили и составляют система из R уравнений

$$\begin{cases} T_{\text{ср}} + U_{P_1} * \sigma_t = t_1 \\ T_{\text{ср}} + U_{P_2} * \sigma_t = t_2 \\ \dots \\ T_{\text{ср}} + U_{P_r} * \sigma_t = t_r \end{cases}. \quad (3.23)$$

Полученная система уравнений решается по методу наименьших квадратов.

3.2.2 Описание распределения Вейбулла для прогнозирования отказов рельсов

Распределение Вейбулла в теории вероятностей – двухпараметрическое семейство абсолютно непрерывных распределений. Названо в честь шведского инженера Валодди Вейбулла. Это распределение также используют в качестве статистической модели долговечности рельсов [121].

Функция распределения (повреждаемости) имеет вид

$$F(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T}{\alpha}\right)^\eta}, T \geq 0, \eta > 0, \alpha > 0. \quad (3.24)$$

Плотность распределения имеет вид

$$f(T) = \frac{\eta}{\alpha} * \left(\frac{T}{\alpha}\right)^{\eta-1} * e^{-\left(\frac{T}{\alpha}\right)^\eta}. \quad (3.25)$$

Интенсивность отказов задают в виде

$$\lambda(T) = \frac{\eta}{\alpha} * \left(\frac{T}{\alpha}\right)^{\eta-1}, \quad (3.26)$$

где α и η – параметры масштаба и формы, соответственно.

Для упрощения способа оценки функция повреждаемости приводят к следующему виду

$$1 - F(T) = e^{-\left(\frac{T}{\alpha}\right)^\eta}, \quad (3.27)$$

$$\frac{1}{1 - F(T)} = e^{\left(\frac{T}{\alpha}\right)^\eta}, \quad (3.28)$$

$$\ln \frac{1}{1 - F(T)} = \left(\frac{T}{\alpha}\right)^\eta, \quad (3.29)$$

$$\ln \left(\ln \frac{1}{1 - F(T)} \right) = \eta * \ln(T) - \eta * \ln(\alpha). \quad (3.30)$$

Делая замену переменных, получаем:

$$Y = \ln \left(\ln \frac{1}{1 - F(T)} \right), \quad (3.31)$$

$$X = \ln(T), \quad (3.32)$$

$$b = \eta, \quad (3.33)$$

$$c = -\eta * \ln(\alpha). \quad (3.34)$$

Тогда уравнение (3.30) можно записать как

$$Y = b * X + c. \quad (3.35)$$

Далее по значениям Y и X с использованием метода наименьших квадратов находятся неизвестные коэффициенты b и c .

3.2.3 Описание экспоненциального распределения для прогнозирования отказов рельсов

При экспоненциальной аппроксимации функция имеет вид

$$F(T) = a * e^{bT}, \quad (3.36)$$

где a и b – коэффициенты аппроксимирующей функции.

Для применения метода наименьших квадратов экспоненциальная функция линеаризуется [124]

$$\ln(F(T)) = \ln(a) + b * T. \quad (3.37)$$

Делая замену переменных, получаем

$$K = \ln(F(T)), \quad (3.38)$$

$$L = \ln(a). \quad (3.39)$$

Тогда уравнение (3.37) можно записать как

$$K = b * T + L. \quad (3.40)$$

Далее по значениям K и L с использованием метода наименьших квадратов находятся неизвестные коэффициенты b и a .

3.2.4 Описание степенного распределения для прогнозирования отказов рельсов

При степенной аппроксимации функция имеет вид

$$F(T) = a * T^b, \quad (3.41)$$

где a и b – коэффициенты аппроксимирующей функции.

Аналогично экспоненциальной, для применения метода наименьших квадратов степенная функция линейризуется [124]:

$$\ln(F(T)) = \ln(a) + b * \ln(T). \quad (3.42)$$

Делая замену переменных, получаем

$$D = \ln(F(T)), \quad (3.43)$$

$$E = \ln(a), \quad (3.44)$$

$$F = \ln(T). \quad (3.45)$$

Тогда уравнение (3.42) можно записать как:

$$D = b * F + E. \quad (3.46)$$

Далее по значениям D и E с использованием метода наименьших квадратов находятся неизвестные коэффициенты b и a .

3.2.5 Оценка достоверности математической модели

Оценка достоверности корреляционной связи, как правило, производится с применением коэффициента множественной корреляции, который называется коэффициентом детерминации R^2 .

В соответствии с [125] коэффициент детерминации R^2 – это доля дисперсии зависимой переменной от её среднего значения, объясняемая рассматриваемой моделью зависимости, то есть объясняющими переменными. Более точно – это единица минус доля необъяснённой дисперсии (дисперсии случайной ошибки модели, или условной по факторам дисперсии зависимой переменной) в дисперсии зависимой переменной. Его рассматривают как универсальную меру зависимости одной случайной величины от множества других. Им оценивается степень близости подбираемой функции. Если нет других теоретических соображений, то выбирают функцию с коэффициентом детерминации, стремящимся к 1.

Коэффициент детерминации в общем случае определяют по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2}, \quad (3.47)$$

где σ^2 – условная (по факторам x) дисперсия зависимой переменной (дисперсия случайной ошибки модели);

σ_y^2 – общая дисперсия зависимой переменной.

В данном определении используются истинные параметры, характеризующие распределение случайных величин. Если использовать выборочную оценку значений соответствующих дисперсий, то получим формулу для выборочного коэффициента детерминации (который обычно и подразумевается под коэффициентом детерминации)

$$R^2 = 1 - \frac{s^2}{s_y^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}, \quad (3.48)$$

где y_i – фактическое значение объясняемой переменной;

\hat{y}_i – расчётное значение объясняемой переменной;

\bar{y}_i – математическое ожидание (среднее арифметическое) объясняемой переменной.

В соответствии со шкалой Роберта Чеддока [126], приведенной в таблице 3.1, считается, что если величина R^2 квадрат более 0,5 – то связь заметная, высокая или весьма высокая.

Таблица 3.1 – Шкала Роберта Чеддока для качественной оценки тесноты связи по величине коэффициента детерминации R^2

Количественная мера тесноты связи, R^2	Качественная характеристика силы связи
0,1 - 0,3	Слабая
0,3 - 0,5	Умеренная
0,5 - 0,7	Заметная
0,7 - 0,9	Высокая
0,9 - 0,99	Весьма высокая
1	Функциональная

Величина коэффициента детерминации, рассчитанная по выборочным данным, имеет систематическую ошибку, тем большую, чем меньше число наблюдений n и больше число факторов m , учитываемых в уравнении регрессии. Для того чтобы не допустить возможного преувеличения тесноты связи

результативного показателя с факторными признаками, используют скорректированный коэффициент детерминации:

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) * \frac{n - 1}{n - m - 1}, \quad (3.49)$$

где m – число параметров при переменных x ;

n – число наблюдений.

3.3 Выбор нулевой гипотезы для прогнозирования отказов рельсов

Основываясь на вышеизложенном необходимо выбрать наиболее подходящую функцию распределения выхода рельсов. Расчеты параметров распределений велись в вычислительном комплексе *Matlab*. В качестве функций распределения было использовано 4 вида функций: нормальная, Вейбулла, экспоненциальная и степенная. Расчеты проводились для рельсов типа Р50 и Р65 и представлены в Приложении Б.

По результатам расчетов были составлены сводные таблицы 3.2 и 3.3, в которых указаны теоретические значения выхода рельсов (интенсивность отказов) для каждого вида распределения.

Для более наглядного представления сравнение расчетных (теоретических) значений показано на рисунках 3.1 – 3.9.

Таблица 3.2 – Расчетные значения выхода рельсов типа Р50 для каждого вида распределения

План пути	Наработка, млн т брутто	Факт	Норм. расп.	Расп. Вейбулла	Экспон. расп.	Степ. расп.
1	2	3	4	5	6	7
$R \leq 300$	30	0,15	0,18	0,14	0,38	0,06
	60	0,71	0,57	0,74	0,81	0,51
	90	1,43	1,59	1,95	1,73	1,70
	120	4,16	3,88	3,88	3,70	4,01
	150	7,78	8,25	6,56	7,92	7,80

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6	7
300<R<600	42	0,06	0,09	0,06	0,30	0,06
	84	0,40	0,32	0,42	0,62	0,43
	126	1,30	1,02	1,30	1,28	1,31
	168	2,95	2,78	2,87	2,65	2,90
	210	5,36	6,51	5,27	5,46	5,37
600≤R<800	69	0,08	0,11	0,08	0,34	0,08
	138	0,50	0,38	0,49	0,67	0,49
	207	1,39	1,12	1,42	1,35	1,40
	276	2,98	2,89	2,98	2,71	2,98
	345	5,34	6,48	5,29	5,44	5,33
R≥800	80	0,07	0,09	0,07	0,23	0,06
	160	0,32	0,27	0,36	0,45	0,34
	240	0,99	0,75	0,95	0,89	0,93
	320	1,87	1,85	1,91	1,75	1,92
	400	3,39	4,06	3,26	3,45	3,38
Прямые	94	0,07	0,10	0,07	0,18	0,05
	188	0,33	0,25	0,32	0,34	0,26
	282	0,68	0,60	0,75	0,65	0,68
	376	1,31	1,33	1,37	1,24	1,36
	470	2,35	2,71	2,19	2,38	2,32

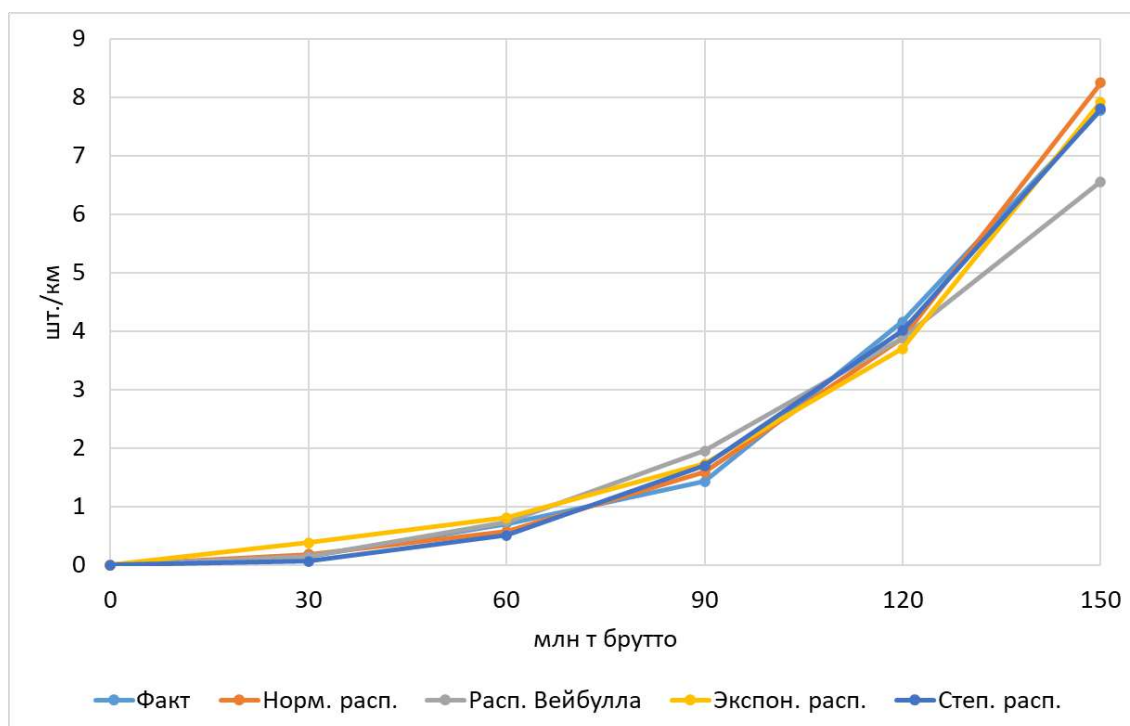


Рисунок 3.1 – Сравнение разных типов распределения выхода рельсов типа Р50 в кривых радиусом 300 м и менее

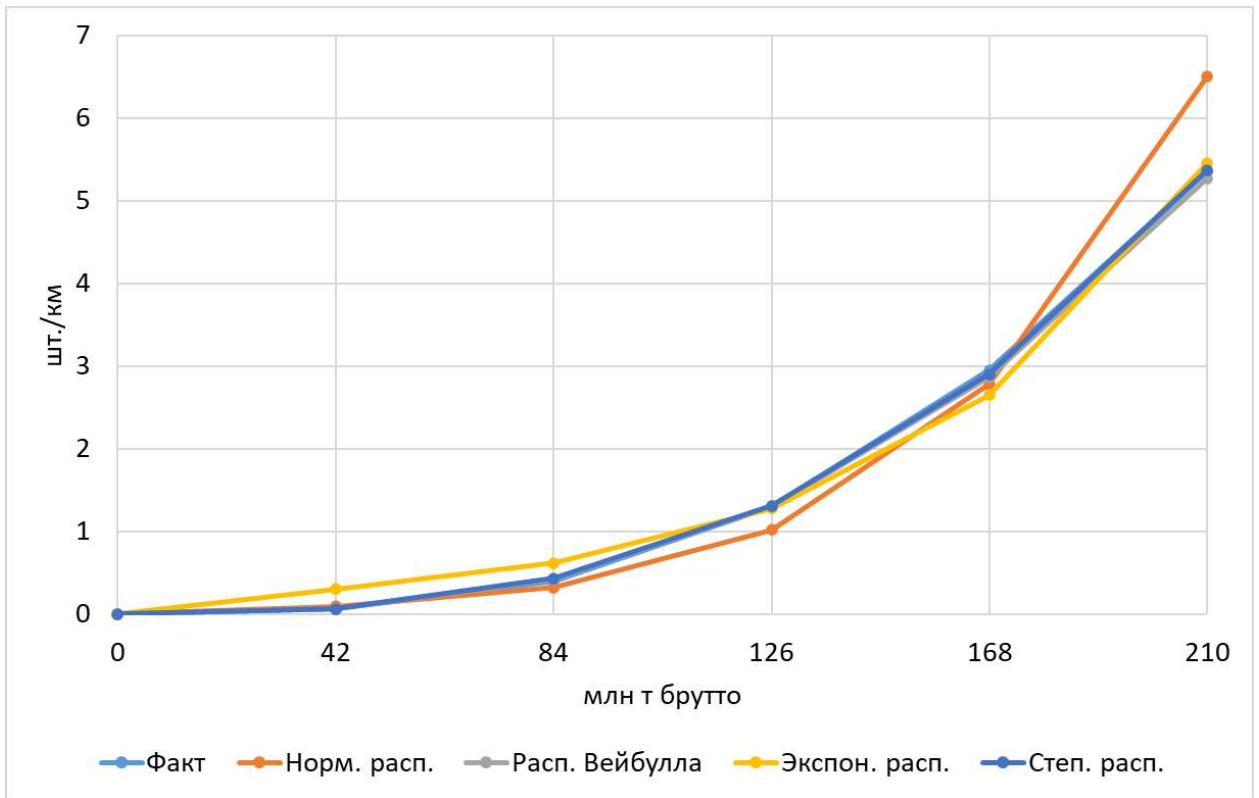


Рисунок 3.2 – Сравнение разных типов распределения выхода рельсов типа Р50 в кривых радиусом от 301 до 599 м

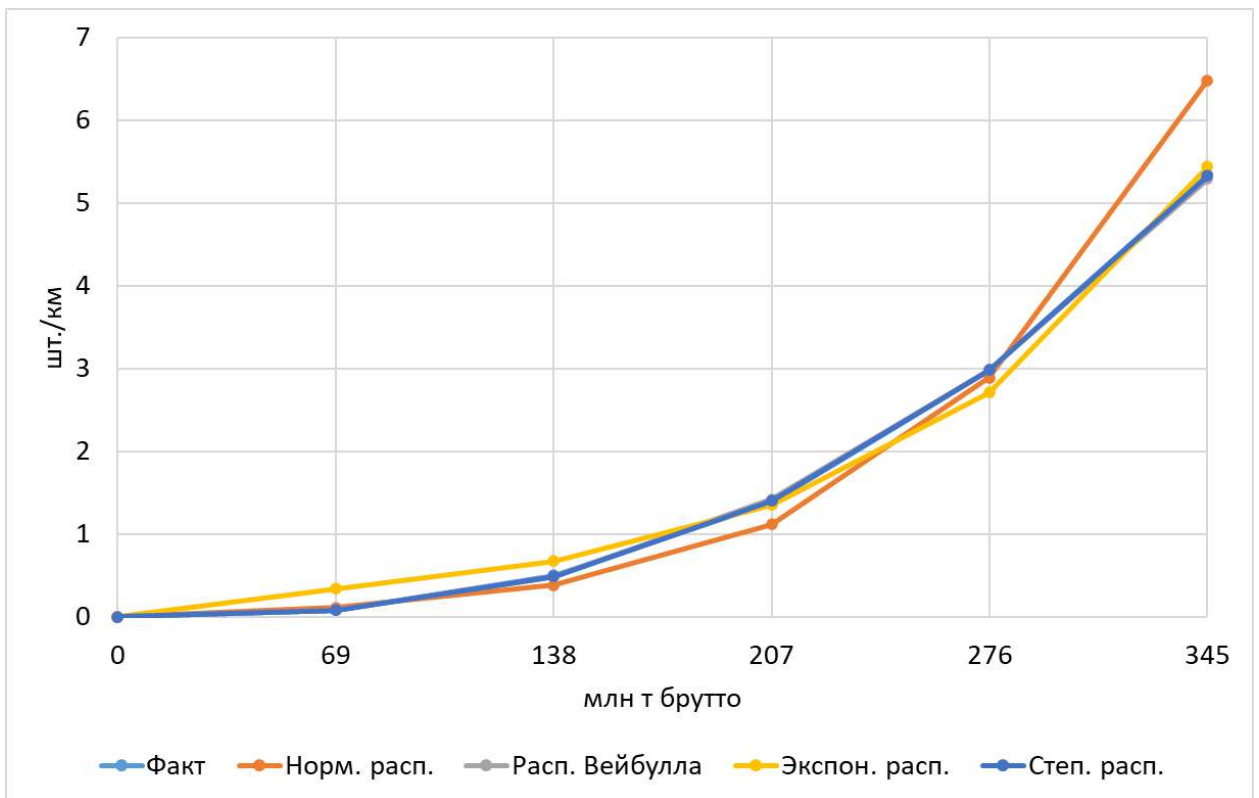


Рисунок 3.3 – Сравнение разных типов распределения выхода рельсов типа Р50 в кривых радиусом от 600 до 799 м

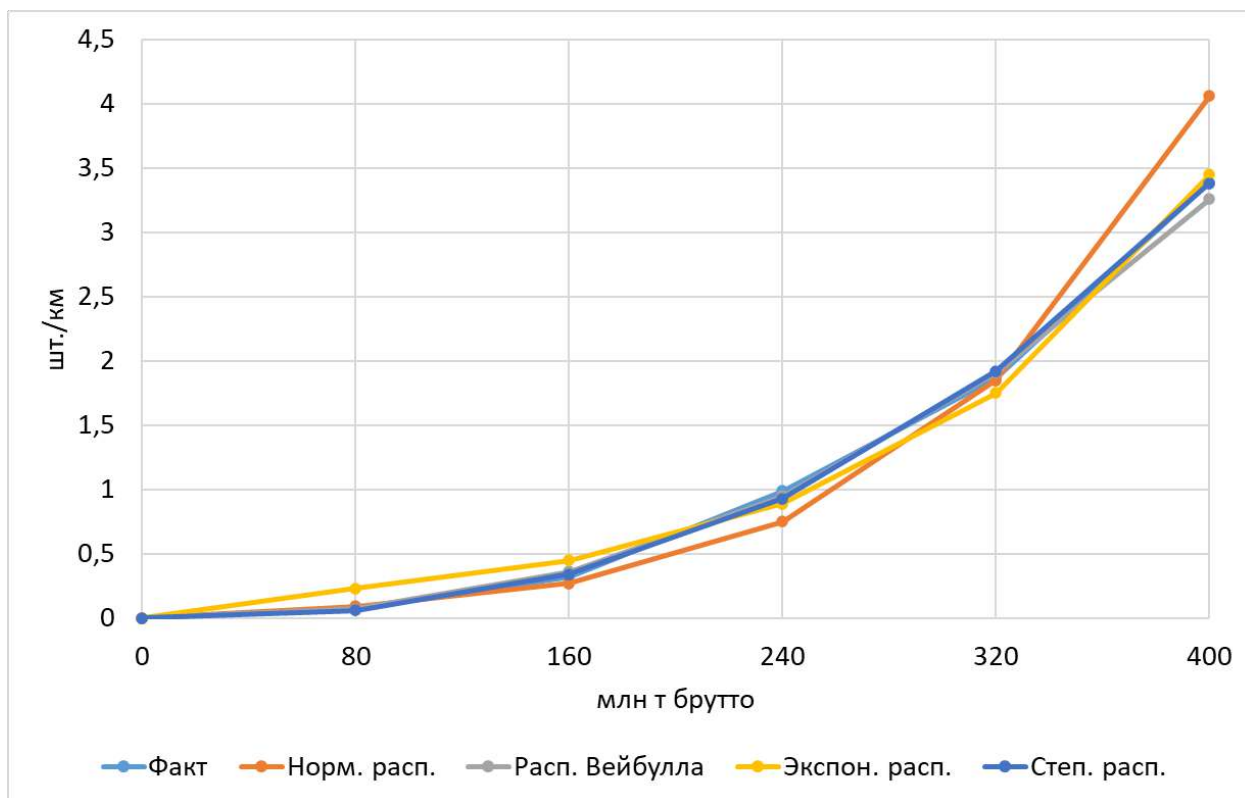


Рисунок 3.4 – Сравнение разных типов распределения выхода рельсов типа Р50 в кривых радиусом 800 и более

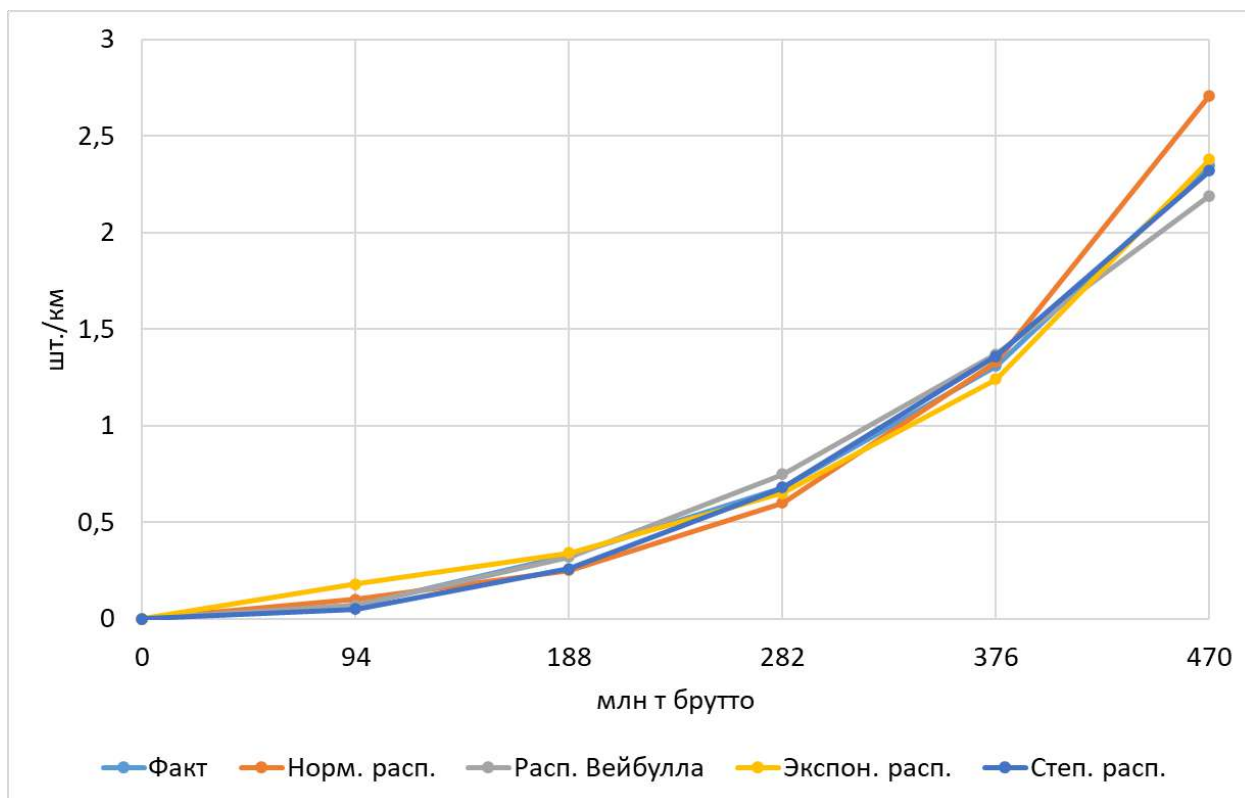


Рисунок 3.5 – Сравнение разных типов распределения выхода рельсов типа Р50 в прямых

Таблица 3.3 – Расчетные значения выхода рельсов типа Р65 для каждого вида распределения

План пути	Наработка, млн т брутто	Факт	Норм. Расп.	Расп. Вейбулла	Экспон. Расп.	Степ. Расп.
$R \leq 300$	45	0,51	0,44	0,40	0,52	0,17
	90	0,81	0,91	1,13	0,94	0,75
	135	1,59	1,77	2,08	1,71	1,82
	180	3,51	3,23	3,19	3,12	3,40
	225	5,52	5,55	4,43	5,66	5,53
$300 < R < 600$	63	0,14	0,16	0,13	0,29	0,11
	126	0,41	0,39	0,49	0,52	0,45
	189	1,09	0,86	1,06	0,94	1,03
	252	1,81	1,78	1,83	1,69	1,86
	315	2,95	3,41	2,79	3,02	2,94
$R \geq 600$	90	0,13	0,15	0,12	0,23	0,09
	180	0,37	0,34	0,41	0,41	0,36
	270	0,77	0,70	0,85	0,73	0,81
	360	1,44	1,36	1,40	1,30	1,43
	450	2,24	2,51	2,07	2,31	2,24
Прямые	104	0,13	0,15	0,12	0,23	0,09
	208	0,35	0,33	0,41	0,40	0,36
	312	0,85	0,68	0,83	0,71	0,79
	416	1,29	1,33	1,37	1,26	1,38
	520	2,18	2,44	2,02	2,22	2,14

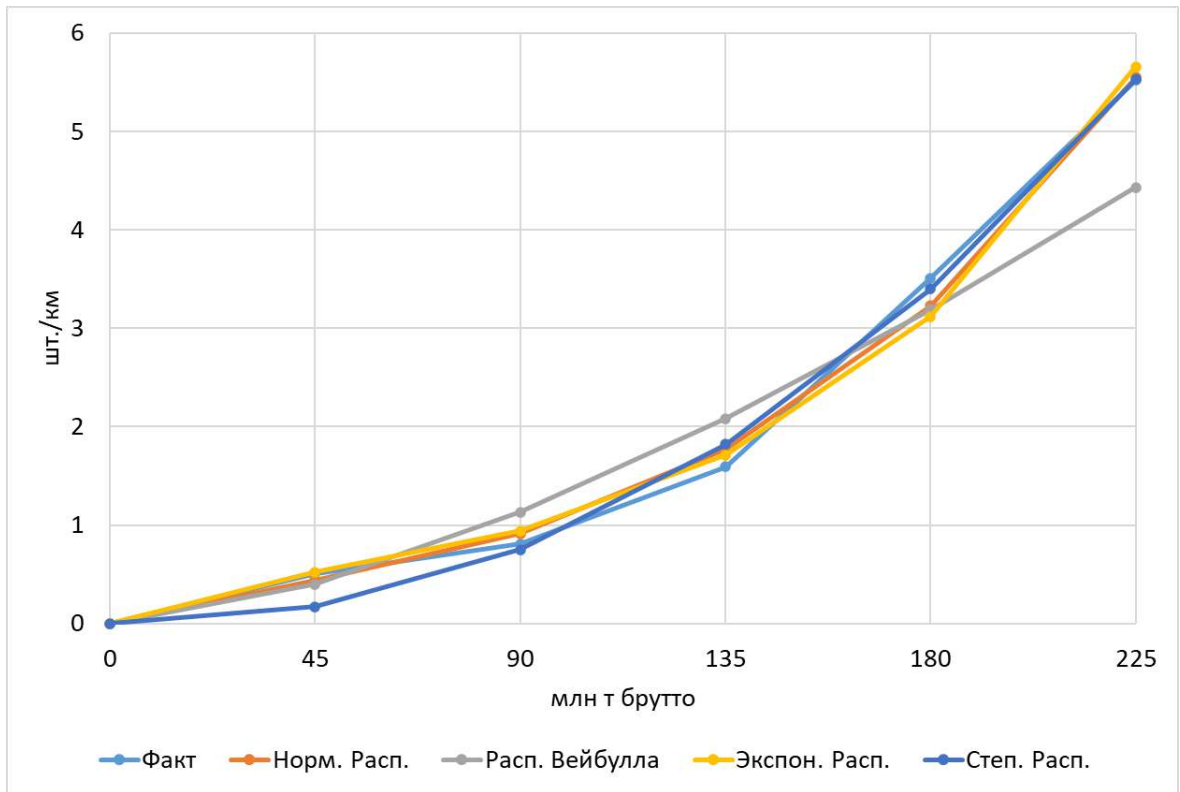


Рисунок 3.6 – Сравнение разных типов распределения выхода рельсов типа Р65 в кривых радиусом 300 м и менее

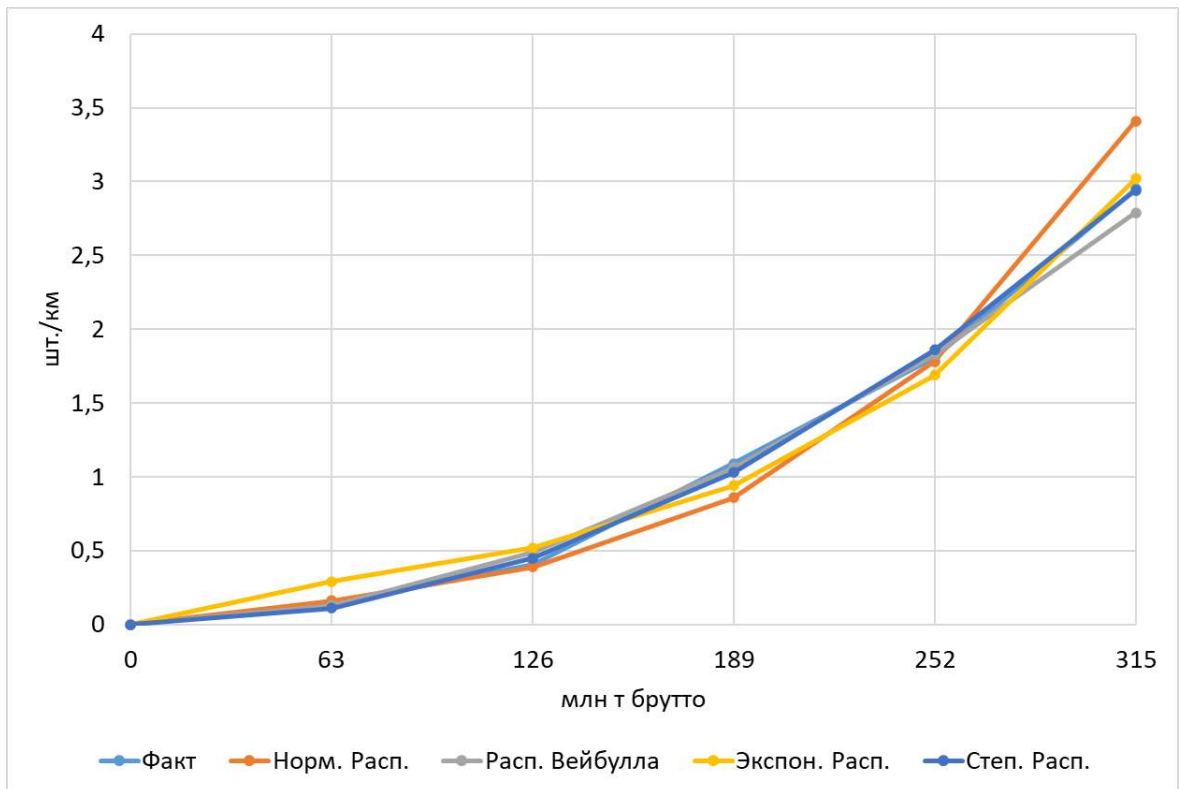


Рисунок 3.7 – Сравнение разных типов распределения выхода рельсов типа Р65 в кривых радиусом от 301 до 599 м

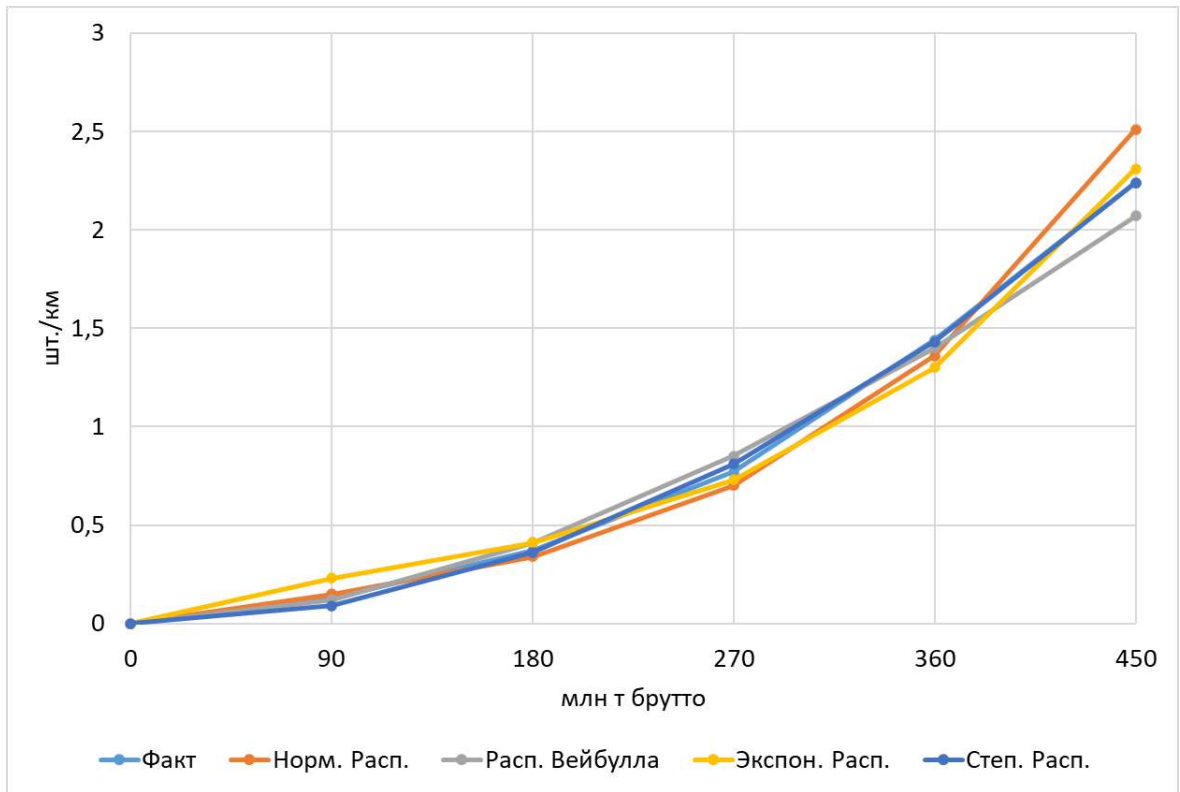


Рисунок 3.8 – Сравнение разных типов распределения выхода рельсов типа Р65 в кривых радиусом 600 м и более

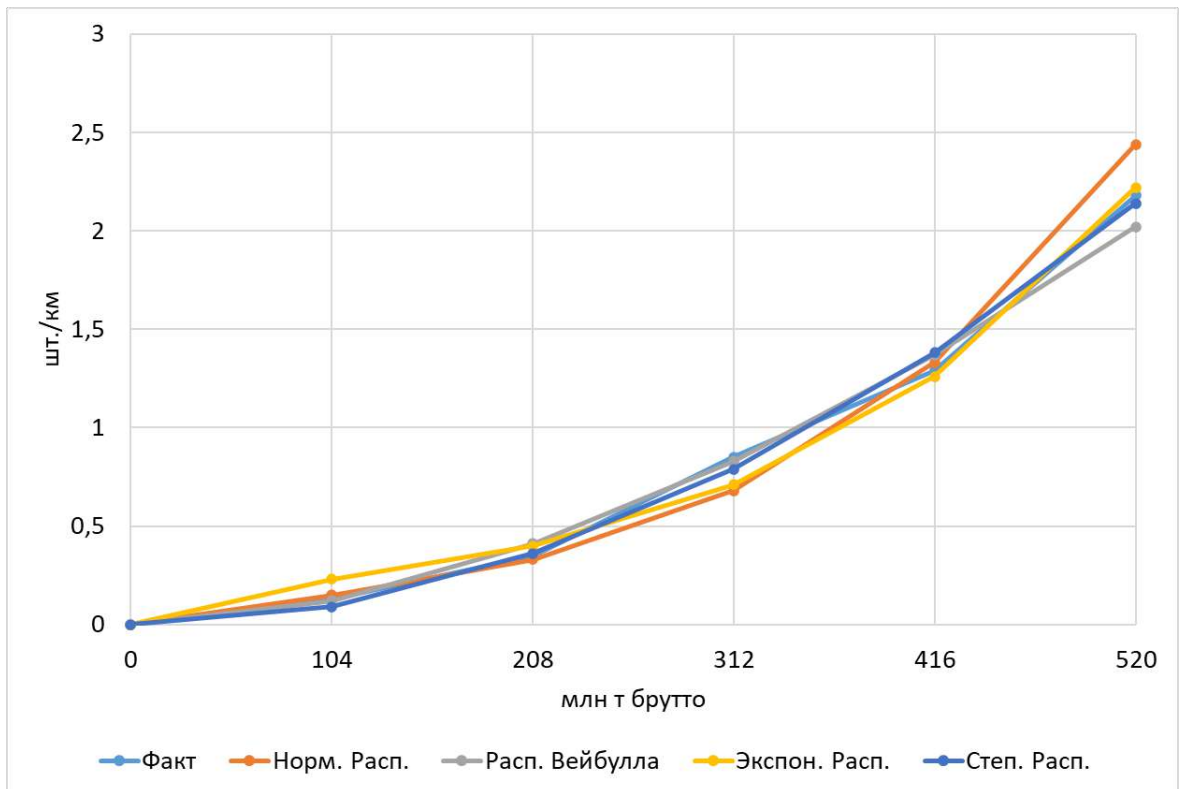


Рисунок 3.9 – Сравнение разных типов распределения выхода рельсов типа Р65 в прямых

Из расчета, представленного в приложении Б и таблицах 3.2 и 3.3, можно сделать следующие выводы:

- рассматриваемые распределения имеют относительно близкие значения выхода рельсов, поэтому изначально сложно судить о том, какое распределение выбрать в качестве нулевой гипотезы;

- однако, можно увидеть, что нормальное распределение во многих типах плана линии для наработки, приближающейся к предельно допустимой, имеет слишком завышенное значение удельного выхода рельсов;

- обратную картину можно видеть для распределения Вейбулла, которое имеет заниженные теоретические значения удельного выхода рельсов;

- наиболее близко к фактическим значениям выхода рельсов лежат экспоненциальное и степенное распределения;

- в первом приближении в качестве функции распределения оптимальны экспоненциальное и степенное распределение.

Для подтверждения выбора оптимального распределения можно воспользоваться следующими факторами:

- учитывать ошибку прогноза;

- по полученным выше распределениям можно сделать расчет удельного выхода рельсов за пределами нормативной наработки и сравнить с фактическим значением, поскольку для некоторых участков имеется значение выхода рельсов при наработке, превышающей нормативное значение на 20, а в некоторых случаях на 40 %.

Сравнение теоретических и фактических значений удельного выхода рельсов при наработке, превышающей нормативное значение для разных распределений представлено в таблицах 3.4 и 3.5.

Таблица 3.4 – Сравнение теоретических и фактических значений удельного выхода рельсов типа Р50 при наработке, превышающей нормативное значение

План пути	Нарботка t_i , млн т брутто	Интенсивность отказов фактическая $R_{\phi}(t_i)$, шт./км	Интенсивность отказов теоретическая $R_m(t_i)$, шт./км	Ошибка прогноза, E_n , %
Нормальное распределение				
$R \leq 300$	180(120%)	12,40	15,42	24,4
	210(140%)	13,33	25,49	91,2
	240(160%)	15,66	37,60	140,1
$300 < R < 600$	252(120%)	7,75	13,14	69,5
	294(140%)	8,44	23,06	173,2
	336(160%)	9,61	35,56	269,9
$600 \leq R < 800$	414(120%)	6,77	12,70	87,7
$R \geq 800$	480(120%)	5,05	7,99	58,2
Прямые	564(120%)	2,72	5,10	87,8
Распределение Вейбулла				
$R \leq 300$	180(120%)	12,40	9,97	-19,6
	210(140%)	13,33	14,08	5,6
	240(160%)	15,66	18,79	20,0
$300 < R < 600$	252(120%)	7,75	8,56	10,4
	294(140%)	8,44	12,78	51,4
	336(160%)	9,61	17,86	85,8
$600 \leq R < 800$	414(120%)	6,77	8,36	23,5
$R \geq 800$	480(120%)	5,05	5,03	-0,5
Прямые	564(120%)	2,72	3,20	17,7
Экспоненциальное распределение				
$R \leq 300$	180(120%)	12,40	16,96	36,8
	210(140%)	13,33	36,32	172,5
	240(160%)	15,66	77,79	396,7
$300 < R < 600$	252(120%)	7,75	11,27	45,4
	294(140%)	8,44	23,25	175,4
	336(160%)	9,61	47,97	399,0
$600 \leq R < 800$	414(120%)	6,77	10,92	61,3
$R \geq 800$	480(120%)	5,05	6,79	34,4
Прямые	564(120%)	2,72	4,57	68,2
Степенное распределение				
$R \leq 300$	180(120%)	12,40	13,43	8,3
	210(140%)	13,33	21,26	59,5
	240(160%)	15,66	31,66	102,2
$300 < R < 600$	252(120%)	7,75	8,88	14,5
	294(140%)	8,44	13,58	60,8
	336(160%)	9,61	19,62	104,1
$600 \leq R < 800$	414(120%)	6,77	8,59	27,0
$R \geq 800$	480(120%)	5,05	5,34	5,7
Прямые	564(120%)	2,72	3,59	32,3

Таблица 3.5 – Сравнение теоретических и фактических значений удельного выхода рельсов типа Р65 при наработке, превышающей нормативное значение

План пути	Нарботка t_i , млн т брутто	Интенсивность отказов фактическая $R_f(t_i)$, шт./км	Интенсивность отказов теоретическая $R_m(t_i)$, шт./км	Ошибка прогноза, E_n , %
Нормальное распределение				
$R \leq 300$	270(120%)	7,31	8,99	23,0
	315(140%)	8,38	13,73	63,8
$300 < R < 600$	378(120%)	5,26	6,07	15,4
$R \geq 600$	540(120%)	3,83	4,36	14,0
Прямые	624(120%)	2,99	4,24	42,1
Распределение Вейбулла				
$R \leq 300$	270(120%)	7,31	5,78	-20,9
	315(140%)	8,38	7,23	-13,7
$300 < R < 600$	378(120%)	5,26	3,93	-25,2
$R \geq 600$	540(120%)	3,83	2,84	-25,7
Прямые	624(120%)	2,99	2,76	-7,5
Экспоненциальное распределение				
$R \leq 300$	270(120%)	7,31	10,30	40,9
	315(140%)	8,38	18,73	123,6
$300 < R < 600$	378(120%)	5,26	5,42	3,0
$R \geq 600$	540(120%)	3,83	4,09	7,0
Прямые	624(120%)	2,99	3,91	31,0
Степенное распределение				
$R \leq 300$	270(120%)	7,31	8,23	12,5
	315(140%)	8,38	11,51	37,4
$300 < R < 600$	378(120%)	5,26	4,27	-18,8
$R \geq 600$	540(120%)	3,83	3,23	-15,5
Прямые	624(120%)	2,99	3,06	2,4

Все ошибки прогноза по каждому распределению приведены в таблицах 3.6 и 3.7.

Таблица 3.6 – Сравнение относительных ошибок прогноза теоретических и фактических значений удельного выхода рельсов типа Р50 при наработке, превышающей нормативное значение

План пути	Нарботка t_i , млн т брутто (% от нормативного тоннажа)	Относительная ошибка прогноза E_n , %			
		Норм.	Вейбулл	Экспоненц.	Степенное
$R \leq 300$	180 (120%)	24,4	-19,6	36,8	8,3
	210 (140%)	91,2	5,6	172,5	59,5
	240 (160%)	140,1	20,0	396,7	102,2
$300 < R < 600$	252 (120%)	69,5	10,4	45,4	14,5
	294 (140%)	173,2	51,4	175,4	60,8
	336 (160%)	269,9	85,8	399,0	104,1
$600 \leq R < 800$	414 (120%)	87,7	23,5	61,3	27,0
$R \geq 800$	480 (120%)	58,2	-0,5	34,4	5,7
Прямые	564 (120%)	87,8	17,7	68,2	32,3

Таблица 3.7 – Сравнение относительных ошибок прогноза теоретических и фактических значений удельного выхода рельсов типа Р65 при наработке, превышающей нормативное значение

План пути	Нарботка t_i , млн т брутто (% от нормативного тоннажа)	Относительная ошибка прогноза E_n , %			
		Норм.	Вейбулл	Экспоненц.	Степенное
$R \leq 300$	270 (120%)	23,0	-20,9	40,9	12,5
	315 (140%)	63,8	-13,7	123,6	37,4
$300 < R < 600$	378 (120%)	15,4	-25,2	3,0	-18,8
$R \geq 600$	540 (120%)	14,0	-25,7	7,0	-15,5
Прямые	624 (120%)	42,1	-7,5	31,0	2,4

Из таблиц 3.4 – 3.7 можно сделать следующие выводы:

- нормальное распределение имеет очень пессимистичный прогноз практически для каждого участка плана пути;
- распределение Вейбулла, наоборот, имеет оптимистичный прогноз, что нежелательно для прогнозирования отказов, хотя относительная ошибка меньше, чем в нормальном распределении;
- экспоненциальное распределение схоже с нормальным, имея при этом достаточно большую относительную ошибку прогноза;

- степенное распределение имеет наименьшую ошибку прогноза, причем почти везде это распределение дает отклонение в большую (пессимистическую) сторону.

Для более наглядного представления можно ввести балловую систему относительных ошибок:

- за каждый диапазон в 10 % начислять 1 балл; (ошибка от 0 до 10% – 1 балл; от 10 до 20% – 2 балла и т.д.);

- за ошибку в меньшую (оптимистическую) сторону начислять в два раза больше баллов, что позволить придать этим ошибкам больший вес;

- просуммировать все баллы, тогда распределение, которое наберет меньше баллов, является оптимальным для построения теоретического распределения выхода рельсов.

Балловая оценка относительных ошибок прогноза представлена в таблицах 3.8 и 3.9.

Таблица 3.8 – Балловая оценка ошибок прогноза теоретических и фактических значений удельного выхода рельсов типа Р50 при наработке, превышающей нормативное значение

План пути	Наработка t_i , млн т брутто (% от нормативного тоннажа)	Баллы относительной ошибки прогноза			
		Норм.	Вейбулл	Экспоненц.	Степенное
$R \leq 300$	180 (120%)	3	4	4	1
	210 (140%)	10	1	18	6
	240 (160%)	15	2	40	11
$300 < R < 600$	252 (120%)	7	2	5	2
	294 (140%)	18	6	18	7
	336 (160%)	27	9	40	11
$600 \leq R < 800$	414 (120%)	9	3	7	3
$R \geq 800$	480 (120%)	6	2	4	1
Прямые	564 (120%)	9	2	7	4
	Σ	104	31	143	46

Таблица 3.9 – Балловая оценка ошибок прогноза теоретических и фактических значений удельного выхода рельсов типа Р65 при наработке, превышающей нормативное значение

План пути	Нарботка t_i , млн т брутто (% от нормативного тоннажа)	Баллы относительной ошибки прогноза			
		Норм.	Вейбулл	Экспоненц.	Степенное
$R \leq 300$	270 (120%)	3	6	5	2
	315 (140%)	7	4	13	4
$300 < R < 600$	378 (120%)	2	6	1	4
$R \geq 600$	540 (120%)	2	6	1	4
Прямые	624 (120%)	5	2	4	1
	Σ	19	24	24	15

Из таблиц 3.8 и 3.9 видно, что минимальная относительная ошибка прогноза у распределения Вейбулла для рельсов типа Р50 и у степенного распределения для рельсов типа Р65. Анализируя эти два распределения, можно увидеть, что распределение Вейбулла будет давать оптимистичный прогноз для рельсов типа Р65 во всех диапазонах плана пути, что нежелательно для прогнозирования отказов. Учитывая все вышесказанное, в качестве функции выхода рельсов можно принять степенное распределение.

Приняв в качестве нулевой гипотезы степенное распределение, можно перейти к вопросу пересмотра действующих критериев нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов.

3.4 Пересмотр критериев нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов

Выше было показано, что действующие критерии по наработке рельсов нуждаются в корректировке. Для этого приняты следующие положения:

- в качестве распределения выхода рельсов было принято степенное распределение, которым автор будет пользоваться в дальнейших расчетах;
- в качестве критерия по одиночному выходу рельсов принимается критерий выхода 6 шт./км пути, что было обосновано ранее;

3.4.1 Пересмотр критериев нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов типа Р50

Используя степенное распределение, проведем статистический эксперимент по расчету теоретической кривой распределения удельного выхода рельсов и сравним его с фактическими кривыми удельного выхода рельсов. Расчет теоретических значений удельного выхода рельсов представлен в таблице 3.10 и в Приложении Б. Можно сделать вывод что связь между фактическим и теоретическим выходом рельсов весьма высокая.

Таблица 3.10 – Расчет выхода рельсов типа Р50 по степенному распределению

План пути	Наработка T , млн т брутто	Интенсивность отказов фактическая $R(T)$, шт./км	Интенсивность отказов теоретическая $R(t_i)$, шт./км	R^2
$R \leq 300$	30	0,15	0,06	0,996
	60	0,71	0,51	
	90	1,43	1,70	
	120	4,16	4,01	
	150	7,78	7,80	
$300 < R < 600$	42	0,06	0,06	1,000
	84	0,40	0,43	
	126	1,30	1,31	
	168	2,95	2,90	
	210	5,36	5,37	
$600 \leq R < 800$	69	0,08	0,08	1,000
	138	0,50	0,49	
	207	1,39	1,40	
	276	2,98	2,98	
	345	5,34	5,33	
$R \geq 800$	80	0,07	0,06	0,999
	160	0,32	0,34	
	240	0,99	0,93	
	320	1,87	1,92	
	400	3,39	3,38	
Прямые	94	0,07	0,05	0,997
	188	0,33	0,26	
	282	0,68	0,68	
	376	1,31	1,36	
	470	2,35	2,32	

Графики теоретического распределения выхода рельсов типа Р50 и сравнение с фактическими данными показаны на рисунках 3.10 – 3.14.

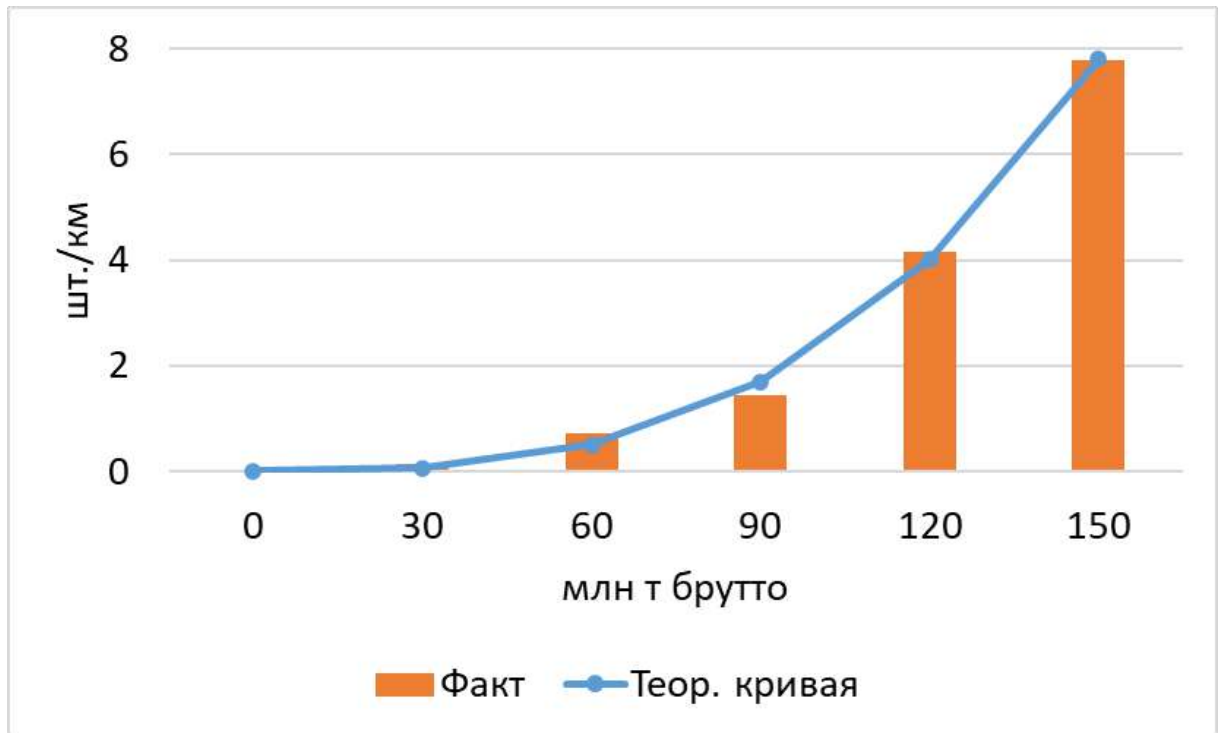


Рисунок 3.10 – Диаграмма выхода рельсов в кривых радиусом 300 м и менее

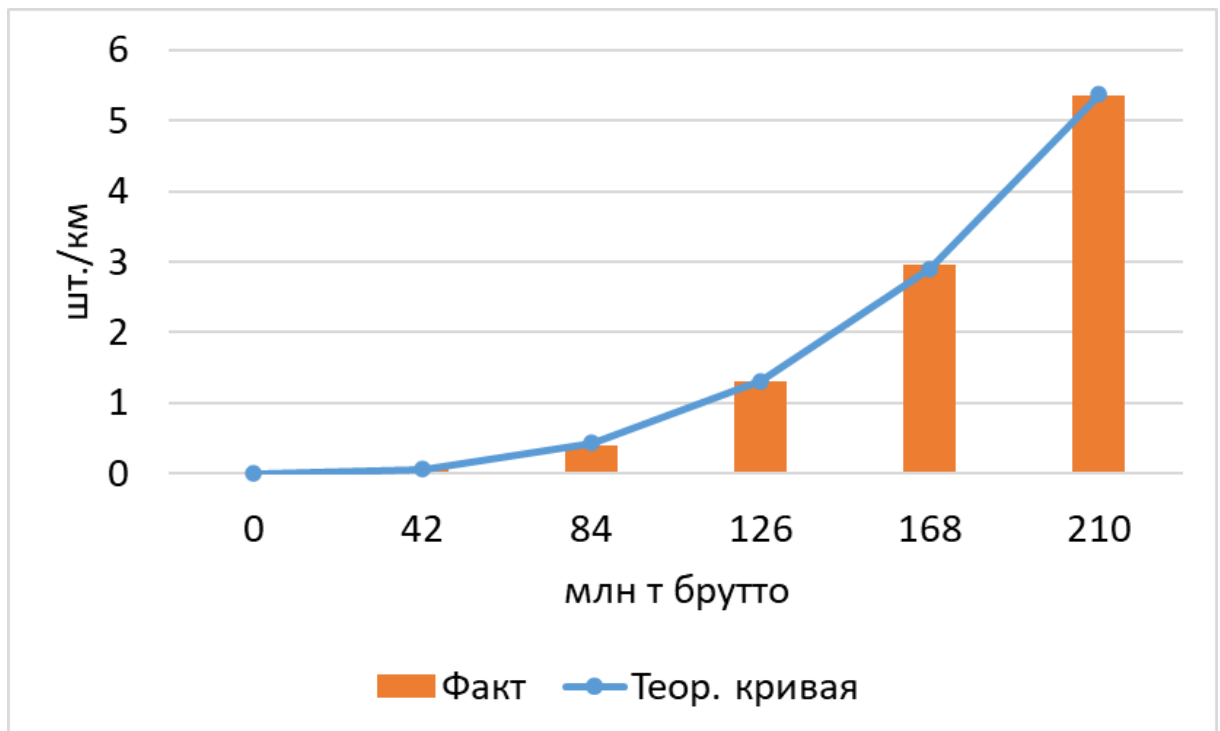


Рисунок 3.11 – Диаграмма выхода рельсов в кривых радиусом от 301 до 599 м

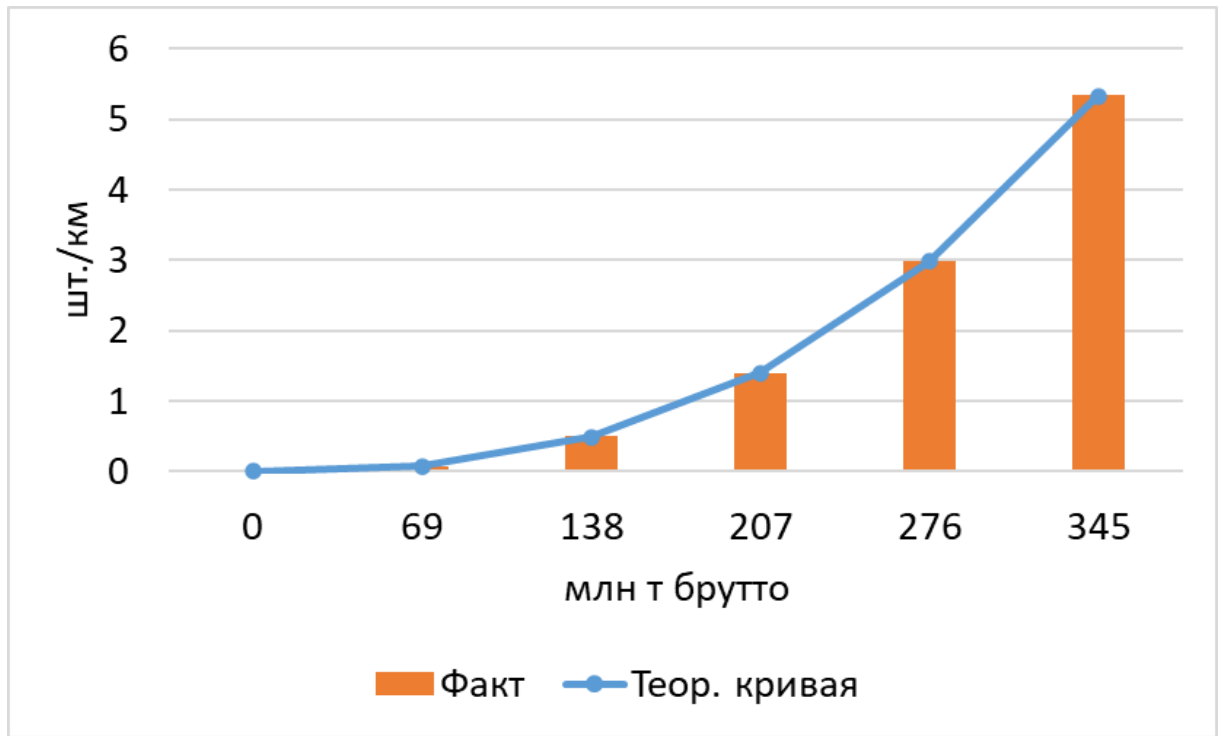


Рисунок 3.12 – Диаграмма выхода рельсов в кривых радиусом от 600 до 799 м

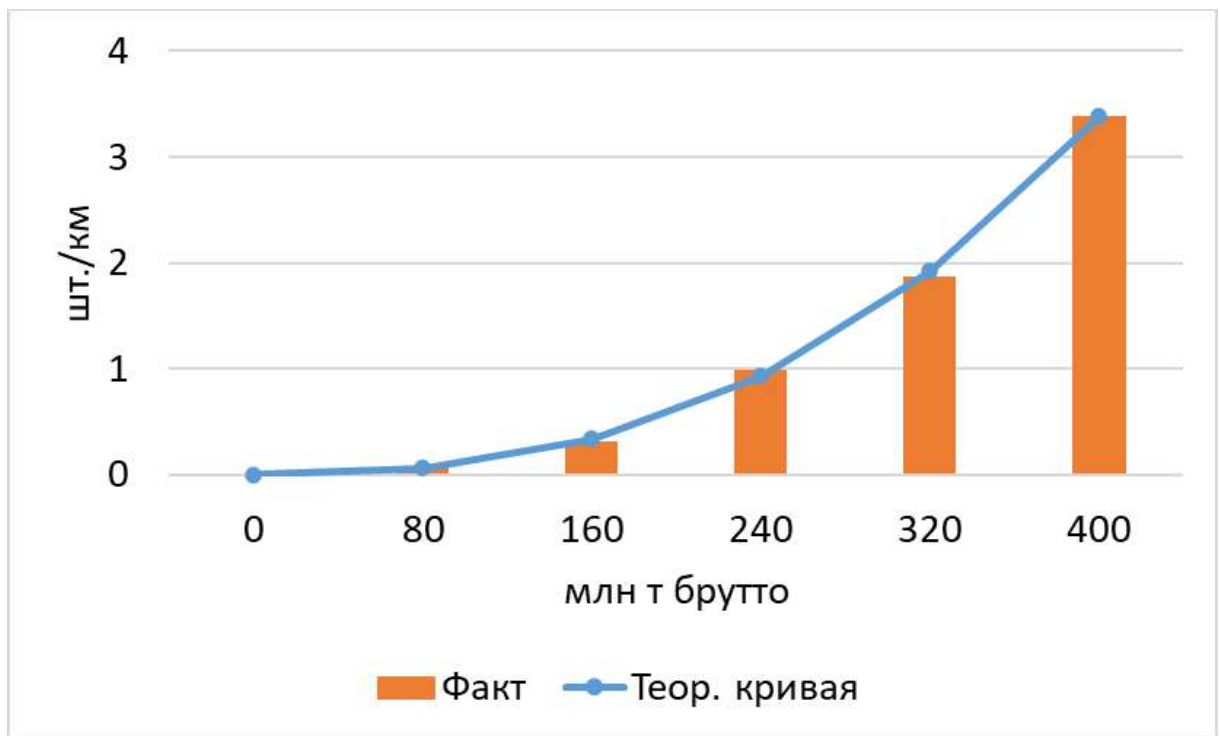


Рисунок 3.13 – Диаграмма выхода в кривых радиусом 800 м и более

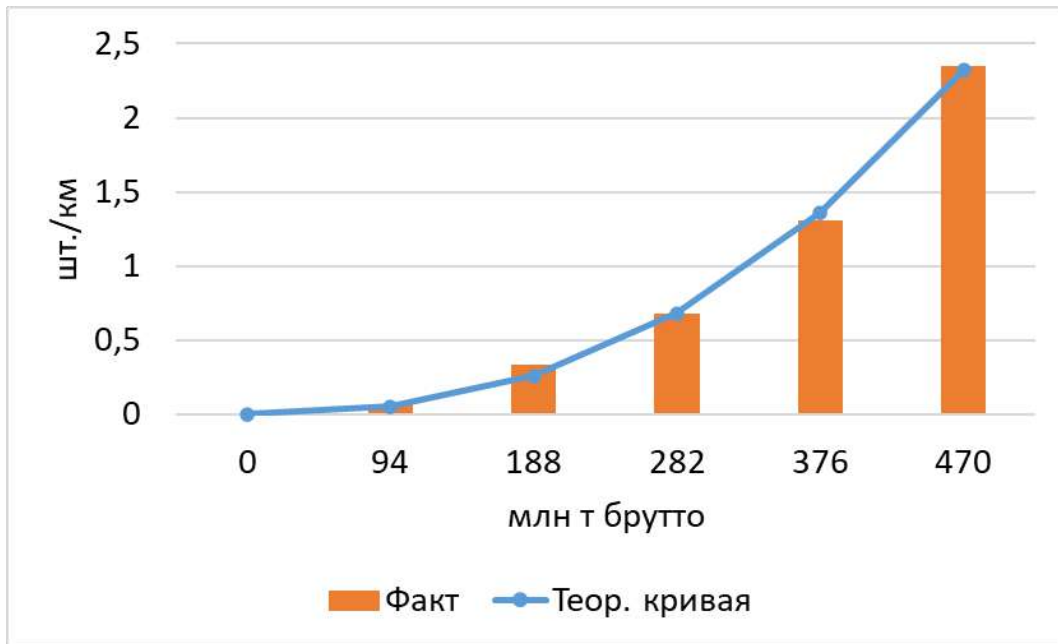


Рисунок 3.14 – Диаграмма выхода рельсов в прямых участках плана пути

При построении функции распределения не учитывался выход рельсов, сверхнормативного тоннажа ввиду того, что он дает занижение значений удельного выхода рельсов. Принимая в расчет данные условия, функции распределения для каждого диапазона плана пути будут иметь вид:

Для $R \leq 300$

$$n = 2,53 * 10^{-6} * T^{2,98}. \quad (3.50)$$

Для $300 < R < 600$

$$n = 2,14 * 10^{-6} * T^{2,76}. \quad (3.51)$$

Для $600 \leq R < 800$

$$n = 1,23 * 10^{-6} * T^{2,62}. \quad (3.52)$$

Для $R \geq 800$

$$n = 0,95 * 10^{-6} * T^{2,52}. \quad (3.53)$$

Для прямых участков

$$n = 0,94 * 10^{-6} * T^{2,39}. \quad (3.54)$$

Подставляя значение $n = 6$ шт./км, получаем следующие значения наработки:

Для $R \leq 300$: $T = 137$ млн т брутто;

Для $300 < R < 600$: $T = 218$ млн т брутто;

Для $600 \leq R < 800$: $T = 361$ млн т брутто;

Для $R \geq 800$: $T = 502$ млн т брутто;

Для прямых участков: $T = 700$ млн т брутто.

Округляя значения в меньшую сторону кратно 5 млн т. брутто, получим откорректированные значения нормативной наработки, приведенные в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Откорректированные значения наработки тоннажа до сплошной смены рельсов типа Р50 при выходе рельсов $n = 6$ шт./км

План пути	Наработка текущая, млн т брутто	Наработка предложенная, млн т брутто	Приращение, млн т брутто
$R \leq 300$	150	135	-15
$300 < R < 600$	210	215	5
$600 \leq R < 800$	345	360	15
$R \geq 800$	400	500	100
Прямые	470	700	230

Из таблицы видно, что изменение текущих нормативов в кривых участках пути радиусом менее 800 м незначительно, чего нельзя сказать про кривые радиусом 800 м и более и прямые участки пути, где нормативную наработку можно увеличить на ощутимо большее значение, обеспечивая при этом безопасность движения поездов. Но, следует помнить, что данные значения получены при значении выхода рельсов в 6 шт./км, при использовании действующего нормативного значения 3 шт./км значения наработки до сплошной смены рельсов значительно уменьшились бы, что не соответствует фактическим данным, при которых почти не возникает остродефектных рельсов в условиях смены рельсов в некоторых случаях до 7 шт./км.

3.4.2 Пересмотр критериев нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов типа Р65

Используя степенное распределение, проведем статистический эксперимент по расчету теоретической кривой распределения удельного выхода рельсов и

сравним его с фактическими кривыми удельного выхода рельсов. Расчет теоретических значений удельного выхода рельсов представлен в таблице 3.12 и в Приложении Б. Можно сделать вывод, что связь между фактическим и теоретическим выходом рельсов весьма высокая.

Таблица 3.12 – Расчет выхода рельсов типа Р65 по степенному распределению

План пути	Наработка T , млн т брутто	Интенсивность отказов фактическая $R(T)$, шт./км	Интенсивность отказов теоретическая $R(t_i)$, шт./км	R^2
$R \leq 300$	45	0,51	0,17	0,989
	90	0,81	0,75	
	135	1,59	1,82	
	180	3,51	3,40	
	225	5,52	5,53	
$300 < R < 600$	63	0,14	0,11	0,946
	126	0,41	0,45	
	189	1,09	1,03	
	252	1,81	1,86	
	315	2,95	2,94	
$R \geq 600$	90	0,13	0,09	0,963
	180	0,37	0,36	
	270	0,77	0,81	
	360	1,44	1,43	
	450	2,24	2,24	
Прямые	104	0,13	0,09	0,996
	208	0,35	0,36	
	312	0,85	0,79	
	416	1,29	1,38	
	520	2,18	2,14	

Графики теоретического распределения выхода рельсов типа Р65 и сравнение с фактическими данными показаны на рисунках 3.15 – 3.18.

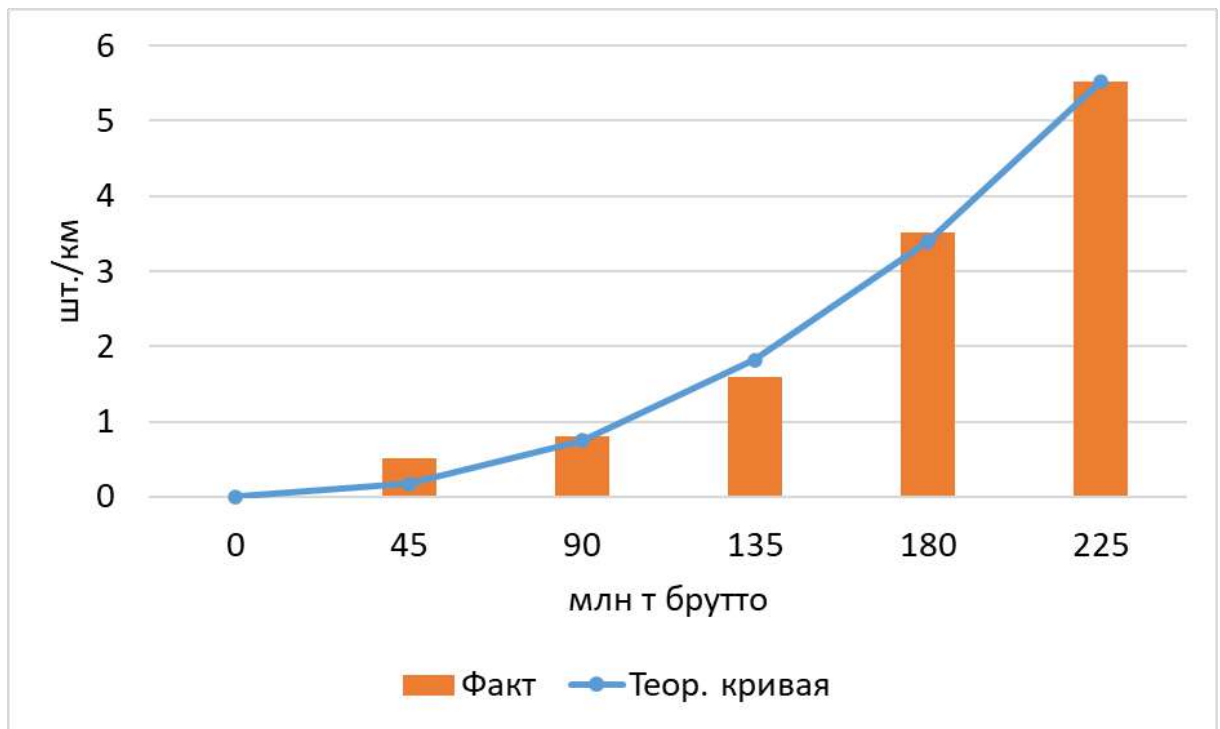


Рисунок 3.15 – Диаграмма выхода рельсов в кривых радиусом 300 м и менее

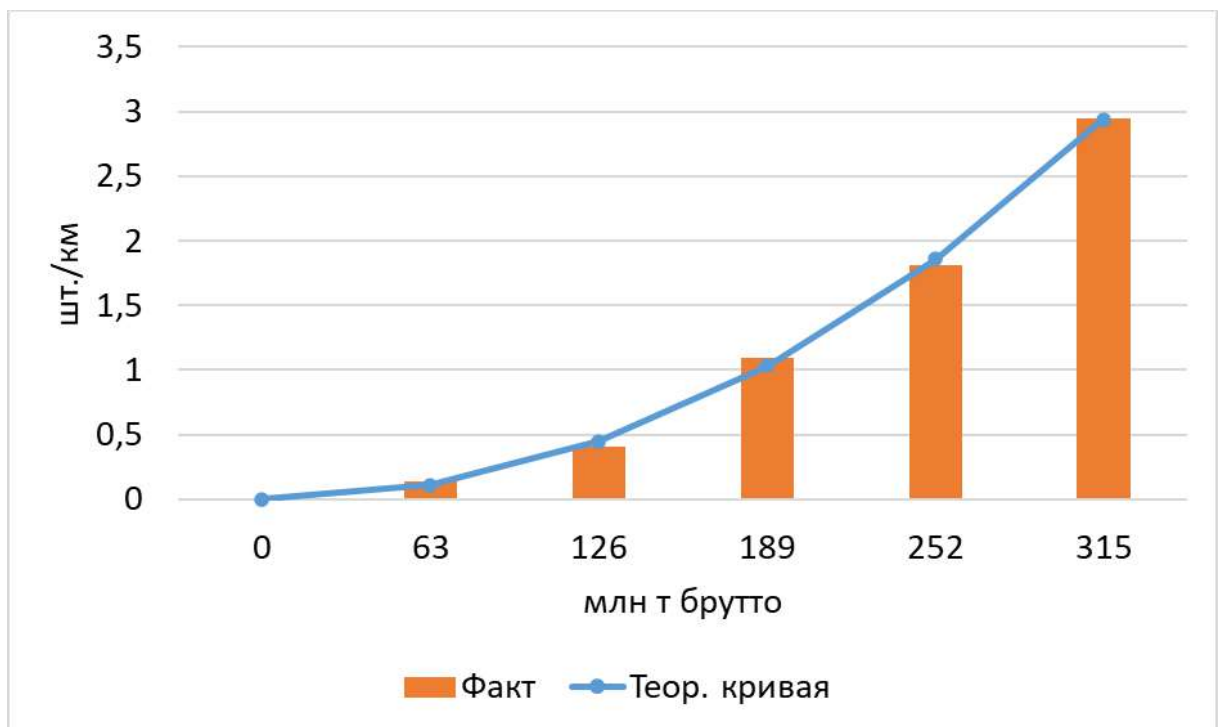


Рисунок 3.16 – Диаграмма выхода рельсов в кривых радиусом от 301 до 599 м

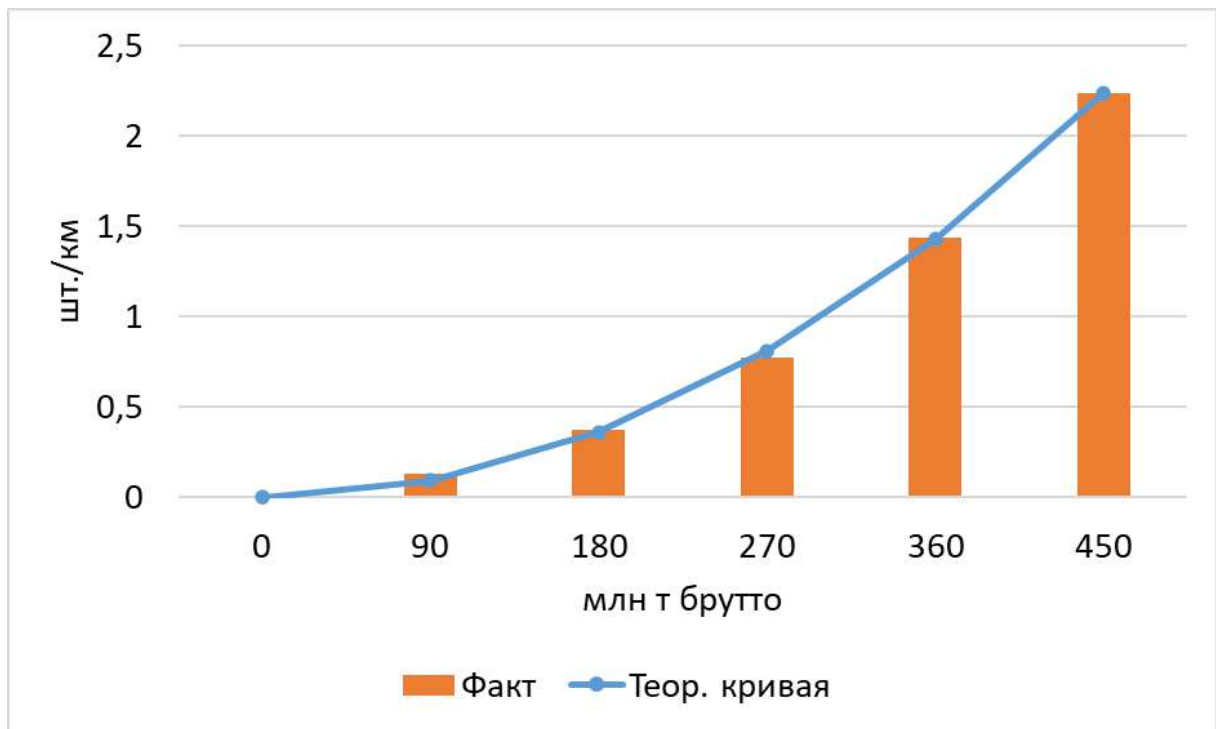


Рисунок 3.17 – Диаграмма выхода в кривых радиусом 600 м и более

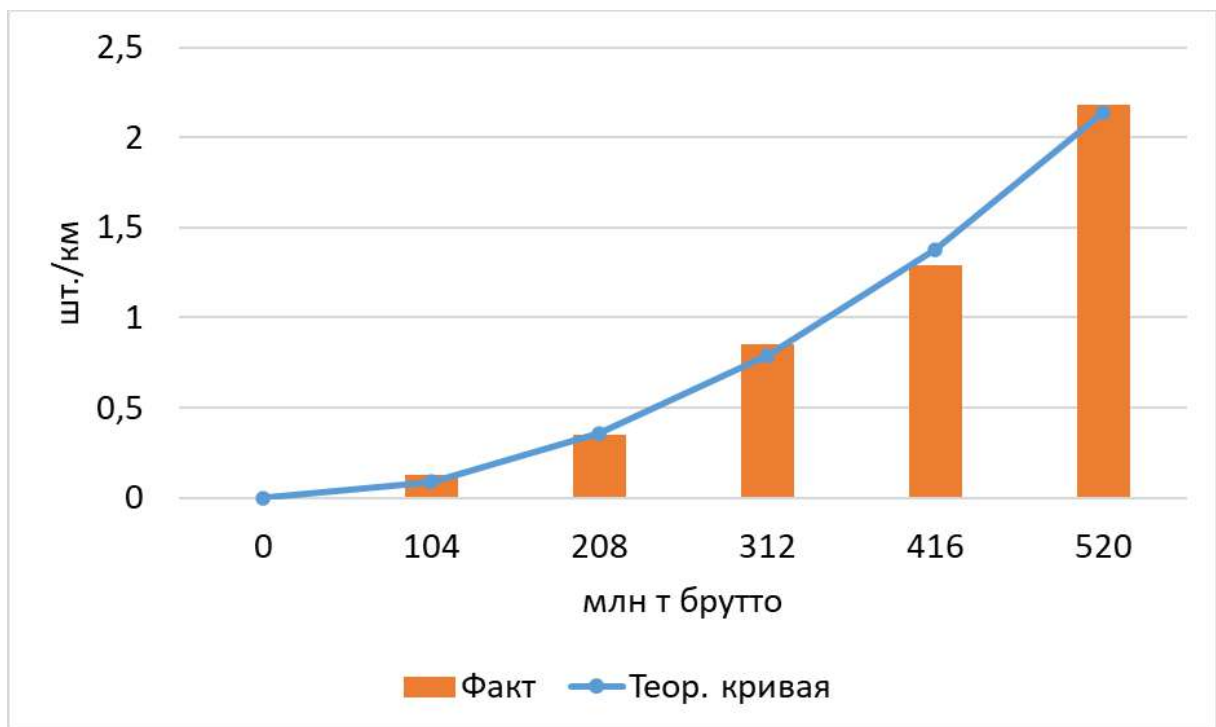


Рисунок 3.18 – Диаграмма выхода рельсов в прямых

Функции распределения для каждого диапазона плана пути будут иметь вид:

Для $R \leq 300$

$$n = 41,2 * 10^{-6} * T^{2,18}. \quad (3.55)$$

Для $300 < R < 600$

$$n = 22,2 * 10^{-6} * T^{2,05}. \quad (3.56)$$

Для $R \geq 600$

$$n = 11,1 * 10^{-6} * T^{2,00}. \quad (3.57)$$

Для прямых участков

$$n = 10,4 * 10^{-6} * T^{1,96}. \quad (3.58)$$

Подставляя значение $n = 6$ шт./км, получаем следующие значения наработки:

Для $R \leq 300$: $T = 233$ млн т брутто;

Для $300 < R < 600$: $T = 446$ млн т брутто;

Для $R \geq 600$: $T = 734$ млн т брутто;

Для прямых участков: $T = 881$ млн т брутто.

Округляя значения в меньшую сторону кратно 5 млн т. брутто, получим откорректированные значения нормативной наработки, приведенные в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Откорректированные значения наработки тоннажа до сплошной смены рельсов типа Р65 при выходе рельсов $n = 6$ шт./км

План пути	Наработка текущая, млн т брутто	Наработка предложенная, млн т брутто	Приращение, млн т брутто
$R \leq 300$	225	230	5
$300 < R < 600$	315	445	130
$R \geq 600$	450	730	280
Прямые	520	880	360

Из таблицы видно, что изменение текущих нормативов в кривых радиусом 300 м и менее незначительно, в кривых радиусом более 300 м оно уже более значительно. В кривых радиусом 600 м и более м и прямых участках пути нормативную наработку можно увеличить более, чем в 1,5 раза, обеспечивая при этом безопасность поездов.

Результаты расчетов докладывались на совещании начальника Службы пути и искусственных сооружений Дирекции инфраструктуры ГУП «Московский метрополитен». Протокол совещания представлен в приложении В.

3.5 Экономическая эффективность повышения нормативной наработки тоннажа при назначении сплошной смены рельсов

3.5.1 Общие положения

Автором была предложена корректировка нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов типа Р50 и Р65. Экономический эффект повышения нормативной наработки тоннажа при назначении сплошной смены рельсов, приведённый к расчетному году нарастающим итогом определяется по следующей формуле [127]

$$\mathcal{E}_i = \left((K_{б_i} + C_{б_i}) - (K_{п_i} + C_{п_i}) \right) * \alpha_t + \mathcal{E}_{i-1}, \quad (3.59)$$

где $K_{б_i}$ и $K_{п_i}$ - суммарные затраты на капитальный ремонт соответственно при базовом и предлагаемом варианте на расчетный год;

$C_{б_i}$ и $C_{п_i}$ - суммарные эксплуатационные затраты соответственно при базовом и предлагаемом варианте на расчетный год;

\mathcal{E}_{i-1} - экономический эффект на предыдущий год;

α_t - коэффициент приведения, определяемый по формуле [128]

$$\alpha_t = (1 + E)^{t_p - t}, \quad (3.60)$$

где $E = 0,08$ - норма дисконта;

t - количество лет, отдаляющих затраты данного года от расчетного;

t_p - расчетный год, предшествующий началу эксплуатации.

3.5.2 Расчет экономической эффективности повышения нормативной наработки тоннажа

Для сравнения капитальных и эксплуатационных затрат на производство работ по смене рельсов при текущей (базовой) нормативной наработке и предложенной (расчетной) нужно произвести расчет потребного количества материалов пути, приведенные на 1 км пути.

Капитальные затраты состоят из затрат на материалы и затрат на производство работ. Будем считать, что капитальные работы (сплошная смена рельсов) были произведены силами Дистанции капитального ремонта (ДКР). В Службе пути и искусственных сооружений была получена расценка на смену 1 км плетей, которая составляет 11 796 670 руб.

Эксплуатационными расходами будем считать расходы по смене одиночных дефектных рельсов длиной 25 м силами монтеров пути при текущем содержании. Затраты труда считаются исходя из техпроцесса по одиночной замене рельса. По нему в состав бригады входит 4 человека: монтеры пути 4, 3 и 2 разрядов. Замена осуществляется в течение 2 ч 20 мин. Поэтому затраты труда равны заработной плате монтеров пути за эти часы работы. Все затраты по одиночной смене рельсов типа Р50 и Р65 сведены в таблицы 3.14 и 3.15.

Таблица 3.14 – Стоимость одиночной смены рельса Р50 длиной 25 м

Наименование работ	Единица измерения	Объём	Затраты труда	
			часы	руб.
Одиночная смена рельса Р50	п/м	25		
Заработная плата				
- м/п 4 разряда	чел.	1	2,33	406,30
- м/п 3 разряда	чел.	2	2,33	892,76
- м/п 2 разряда	чел.	1	2,33	500,56
Итого заработная плата				1799,62
Материалы	Единица измерения	Объём	Цена за ед., руб.	Стоимость, руб.
Рельсы Р50	п/м	12,50	4449,62	111240,50
Всего стоимость смены				113040,12

Таблица 3.15 – Стоимость одиночной смены рельса Р65 длиной 25 м

Наименование работ	Единица измерения	Объём	Затраты труда	
			часы	руб.
Одиночная смена рельса Р65	п/м	25		
Заработная плата				
- м/п 4 разряда	чел.	1	2,33	406,30
- м/п 3 разряда	чел.	2	2,33	892,76
- м/п 2 разряда	чел.	1	2,33	500,56
Итого заработная плата				1799,62
Материалы	Единица измерения	Объём	Цена за ед., руб.	Стоимость, руб.
Рельсы Р65	п/м	25	5573,19	139329,80
Всего стоимость смены				141129,42

Далее произведено сравнение базового и расчётного вариантов наработки до сплошной смены рельсов. Варианты сравниваются из условия, что в нулевой год была произведена сплошная смена всех лежащих рельсов, и следующая сплошная смена рельсов будет произведена для базового варианта по достижении действующей нормативной наработки тоннажа, для предлагаемого варианта – при достижении расчетной наработки тоннажа.

Ввиду различной нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов в зависимости от плана километр пути был разбит на участки, равные долям протяженности (весовым коэффициентам) каждого типа плана от общей протяженности метрополитена. Так, для рельсов типа Р50 доля кривых $R \leq 300$ составляет 0,03, доля кривых $300 < R < 600$ – 0,17, $600 \leq R < 800$ – 0,07, $R \geq 800$ – 0,11, прямых – 0,62. А для рельсов типа Р65 доля кривых $R \leq 300$ составляет 0,02, доля кривых $300 < R < 600$ – 0,15, $R \geq 600$ – 0,23, прямых – 0,60. Далее каждое значение капитальных и эксплуатационных затрат умножали на соответствующий весовой коэффициент. Расчет экономической эффективности повышения нормативной наработки тоннажа для рельсов типа Р50 и Р65 представлены в таблицах 3.16 и 3.17. Таблицы построены до 17 года эксплуатации ввиду того, что сплошная смена рельсов в прямых участках пути для расчетного варианта для рельсов типа Р65 будет произведена на 18 год эксплуатации, таким образом будет завершён самый продолжительный цикл от укладки в путь до смены рельсов [129].

Таблица 3.16 – Расчет экономической эффективности повышения нормативной наработки рельсов типа Р50

Расчетный год	Базовый вариант		Расчетный вариант		Прибыль за вычетом единовременных затрат, тыс.руб.	Коэффициент приведения	Чистый дисконтированный доход, тыс.руб.	Экономич. эффект, приведенный к расчетному году нарастающим итогом, тыс.руб.
	Капитальные затраты	Эксплуатационные затраты	Капитальные затраты	Эксплуатационные затраты				
0	11796,67	-	11796,67	-	0,00	1,000	0,00	0,00
1	0,00	4,47	0,00	4,47	0,00	0,926	0,00	0,00
2	0,00	29,99	0,00	29,99	0,00	0,857	0,00	0,00
3	420,08	60,66	420,08	60,66	0,00	0,794	0,00	0,00
4	0,00	131,89	0,00	131,89	0,00	0,735	0,00	0,00
5	2031,84	77,63	2031,84	77,63	0,00	0,681	0,00	0,00
6	420,08	109,24	420,08	109,24	0,00	0,630	0,00	0,00
7	823,02	128,18	0,00	171,86	779,34	0,583	454,74	454,74
8	0,00	207,90	823,02	207,63	-822,75	0,540	-444,51	10,23
9	1791,79	242,21	420,08	300,50	1313,41	0,500	657,03	667,26
10	9463,74	6,18	2031,84	272,53	7165,56	0,463	3319,04	3986,30
11	0,00	23,61	1371,71	257,16	-1605,26	0,429	-688,47	3297,83
12	420,08	39,49	420,08	320,68	-281,19	0,397	-111,66	3186,17
13	0,00	90,26	0,00	421,46	-331,19	0,368	-121,78	3064,39
14	823,02	135,81	7431,90	133,72	-6606,79	0,340	-2249,36	815,03
15	2451,92	58,33	2451,92	52,21	6,12	0,315	1,93	816,97
16	0,00	93,08	823,02	20,86	-750,80	0,292	-219,15	597,81
17	0,00	153,78	0,00	55,45	98,34	0,270	26,58	624,39

Из анализа таблицы 3.16 видно, что при увеличении нормативной наработки тоннажа рельсов типа Р50 экономический эффект на 7 год эксплуатации станет положительным и составит 454,74 тыс. руб./км, таким образом, срок окупаемости затрат составит менее 10 лет, что считается приемлемым сроком окупаемости для инфраструктурных проектов. А суммарный экономический эффект к 18-му году эксплуатации составит 17,52 млн руб./км.

Таблица 3.17 – Расчет экономической эффективности повышения нормативной наработки рельсов типа Р65

Расчетный год	Базовый вариант		Расчетный вариант		Прибыль за вычетом единовременных затрат, тыс.руб.	Коэффициент приведения	Чистый дисконтированный доход, тыс.руб.	Экономич. эффект, приведенный к расчетному году нарастающим итогом, тыс.руб.
	Капитальные затраты	Эксплуатационные затраты	Капитальные затраты	Эксплуатационные затраты				
0	11796,67	-	11796,67	-	0,00	1,000	0,00	0,00
1	0,00	4,77	0,00	4,77	0,00	0,926	0,00	0,00
2	0,00	19,37	0,00	19,37	0,00	0,857	0,00	0,00
3	0,00	44,02	0,00	44,02	0,00	0,794	0,00	0,00
4	0,00	78,85	0,00	78,85	0,00	0,735	0,00	0,00
5	235,93	104,33	235,93	104,33	0,00	0,681	0,00	0,00
6	0,00	150,82	0,00	150,82	0,00	0,630	0,00	0,00
7	1769,50	129,91	0,00	207,14	1692,27	0,583	987,42	987,42
8	0,00	173,42	0,00	273,54	-100,12	0,540	-54,09	933,33
9	0,00	226,77	1769,50	220,85	-1763,58	0,500	-882,23	51,10
10	2949,17	181,57	235,93	258,37	2636,43	0,463	1221,18	1272,28
11	7078,00	26,01	0,00	316,53	6787,48	0,429	2911,03	4183,31
12	0,00	46,84	0,00	384,25	-337,41	0,397	-133,99	4049,32
13	0,00	78,00	0,00	461,82	-383,82	0,368	-141,13	3908,19
14	1769,50	42,28	0,00	549,41	1262,38	0,340	429,79	4337,98
15	235,93	51,70	2949,17	427,56	-3089,10	0,315	-973,81	3364,17
16	0,00	81,88	0,00	499,92	-418,04	0,292	-122,02	3242,15
17	0,00	121,75	0,00	582,03	-460,28	0,270	-124,40	3117,75

Из анализа таблицы 3.17 видно, что при увеличении нормативной наработки тоннажа рельсов типа Р65 экономический эффект на 7 год эксплуатации станет положительным и составит 987,42 тыс. руб./км. А суммарный экономический эффект к 18-му году эксплуатации составит 29,45 млн руб./км.

Экономический эффект повышения нормативной наработки тоннажа для рельсов типа Р50 и Р65 представлен на рисунке 3.19.

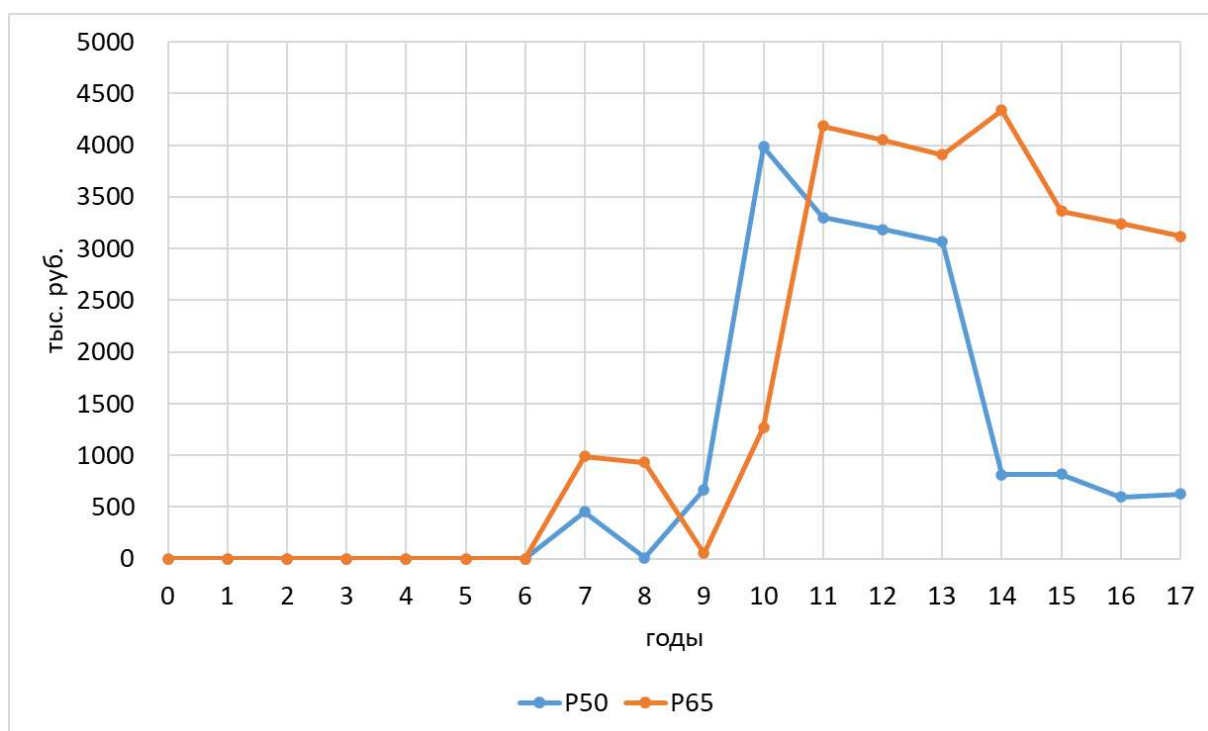


Рисунок 3.19 – График экономического эффекта повышения нормативной наработки тоннажа для рельсов типа P50 и P65

3.6 Разработка методики по корректировке периодичности контроля рельсов

3.6.1 Общие положения

Действующая периодичность контроля рельсов приведена в первой главе. Для перехода от планово-периодического к планово-прогнозируемому контролю рельсов можно воспользоваться методикой, основанной на расчетной вероятности выявления дефектов в зависимости от интенсивности выхода и развития остродефектных рельсов, грузонапряженности участка, пропущенного тоннажа и условий эксплуатации пути, разработанная В.Б. Каменским [33].

Им была выдвинута гипотеза, что распределение выхода ОДР подчиняется показательному закону с плотностью

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (3.61)$$

где $\lambda = 1/t_{\text{ц}}$, $t_{\text{ц}}$ – средняя продолжительность цикла контроля.

Также было найдено количественное соотношение между продолжительностью цикла контроля и выходом ОДР, приведенное в первой главе.

Определение числа проверок в цикле контроля определяется исходя из того, что темп развития дефекта в цикле контроля близок к прямой пропорциональности с пропущенным тоннажем, что подтверждается исследованиями А.Ю. Абдурашитова и Л.Г. Крысанова [30] в отношении дефекта по коду 21 в пределах его развития от 6 до 30 % от площади поперечного сечения головки рельса. Эти результаты совпадают с исследованиями, проведенными в США [130].

Факт обнаружения остродефектного рельса можно рассматривать как независимое событие, а проверки в цикле контроля как статистическую совокупность независимых событий. Воспользовавшись теоремой умножения вероятностей независимых событий [131], можно найти накопленную вероятность обнаружения дефекта при числе проверок i

$$P_i = 1 - q_1 * q_2 \dots q_i, \quad (3.62)$$

$$q_i = 1 - p_{di}, \quad (3.63)$$

где p_{di} – вероятность обнаружения дефекта при i -ой проверке.

Допустимый уровень накопленной вероятности должен быть выбран таким, чтобы минимальное число проверок в цикле контроля гарантированно обеспечивало выявление всех ОДР.

Допустимый уровень накопленной вероятности будет достаточным, если выявление ОДР станет достоверным событием. Это условие соблюдается при вероятности пропуска по всей совокупности циклов контроля менее одного ОДР.

Совокупность циклов контроля является процедурой независимых испытаний, в которых вероятность появления, по крайней мере, один раз события, имеющего вероятность p , определяется выражением

$$P(1 < m) = 1 - (1 - p)^{N_{ц}}, \quad (3.64)$$

где $P(1 < m)$ – вероятность пропуска менее одного ОДР в общей совокупности циклов контроля;

p – вероятность пропуска ОДР в одном цикле контроля;

$N_{ц}$ – общее число циклов.

Принимая $P_{ц} = (1 - p)$, тогда

$$P_{ц} = \sqrt[N_{ц}]{1 - P(1 < m)}. \quad (3.65)$$

Так как темп роста трещины неизвестен в каждом конкретном случае, возможны ситуации, когда она будет развиваться ускоренно или замедленно по сравнению со средним циклом. Опасная ситуация возникает в том случае, когда размер трещины превысит критический размер между двумя проверками, что грозит изломом рельса до ее выявления.

Для полного исключения такого исхода необходимо, чтобы соблюдалось неравенство $P_{из} < 1$.

Для определения количества серийных проверок в цикле контроля рельсов необходимо знать зависимость вероятности обнаружения дефектов от степени его развития.

Наименьший интервал между выходами рельсов по дефектам, связанным с внутренними повреждениями металла, которые могут быть обнаружены средствами дефектоскопии, приходится на поперечные трещины в головке по рисунку коду 21. Поэтому скорость развития поперечной трещины и ее предельные размеры могут служить критериями назначения периодичности дефектоскопного контроля. Вероятность обнаружения дефекта зависит от применяемых средств дефектоскопии.

Дефектоскопные средства классифицируются на условно «новые» и «старые». В К новым (П-2) относятся дефектоскопные автотрисы или вагоны с совмещенным ультразвуковым и магнитным методами контроля и съемные микропроцессорные дефектоскопы типа АВИКОН-01 или РДМ-2, оснащенные системой непрерывной регистрации результатов контроля, если при этих средствах созданы специальные АРМ, позволяющие вести анализ результатов контроля рельсов, то накопленная вероятность пропуска уменьшается по сравнению с новыми средствами (П-1). К старым (П-3) относятся ультразвуковые вагоны-дефектоскопы и автотрисы, а также АВИКОН и РДМ, не имеющие регистраторов [33]. Вероятность обнаружения дефекта в зависимости от применяемых средств контроля показана на рисунке 3.20.

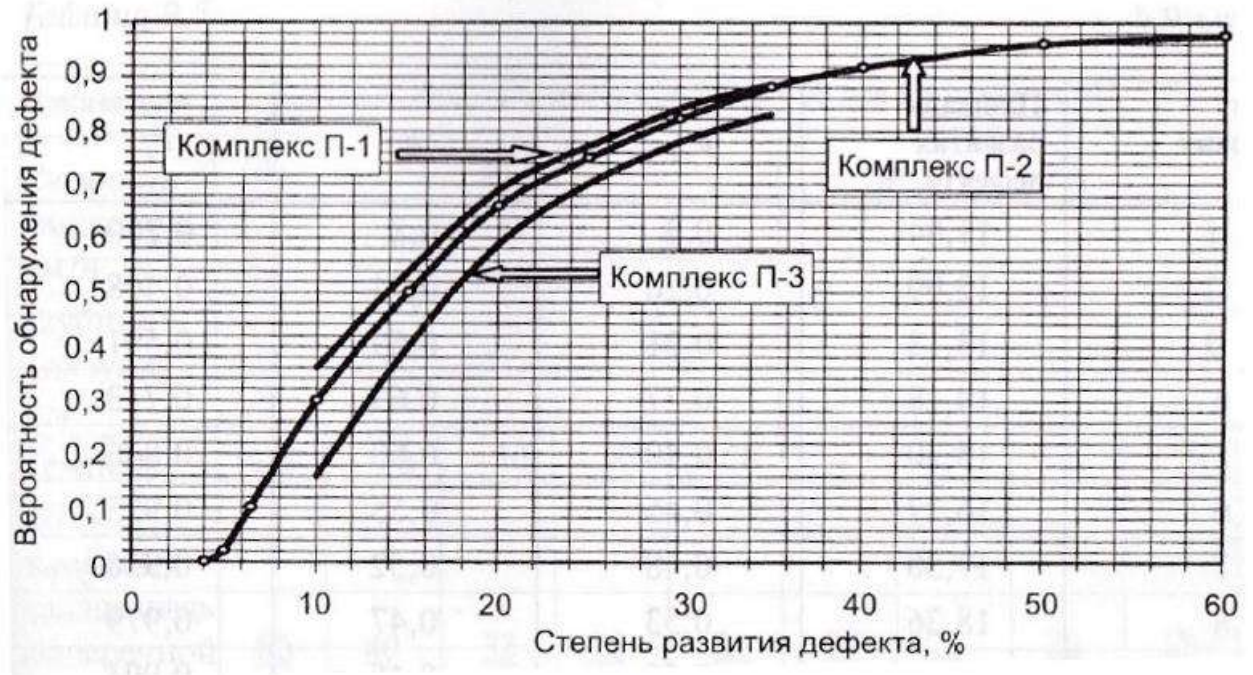


Рисунок 3.20 – Вероятность обнаружения дефекта в зависимости от применяемых средств контроля

Используя данный график можно определить вероятность обнаружения ОДР за одну проверку (C_1) и СКО (C_2) этой величины. Значения этих величин, а также нормативное число проверок к цикле приведены в таблице 3.18.

Таблица 3.18 – Число проверок в цикле контроля и значения коэффициентов C_1 и C_2

Комплекс дефектоскопных средств	Значения параметров C_1 и C_2 при минимальной зимней температуре					
	0 °С и выше			-20 °С		
	N_n	C_1	C_2	N_n	C_1	C_2
П-1	6	0,5767	0,4426	10	0,4965	0,3991
	8	0,5325	0,4180	17	0,3482	0,3296
П-2	6	0,6217	0,3340	7	0,5829	0,3019
	8	0,6125	0,2991	13	0,4585	0,2152
П-3	6	0,6817	0,2933	6	0,6083	0,2765
	8	0,6438	0,2649	12	0,5008	0,1868

3.6.2 Порядок перехода к расчетной периодичности

Новая периодичность контроля обеспечивает практическую невозможность оставления в пути рельсов с дефектами, имеющими опасную стадию развития, и не быть чрезмерной с целью оптимизации затрат. Для обоснования расчетов были взяты данные по наиболее быстро развивающемуся и опасному дефекту – поперечной трещине в головке.

Необходимо отметить, что начинать проверку рельсов при площади развития такого дефекта менее 10 % нерационально, так как вероятность его пропуска составляет более 70%. В то же время необходимо обнаружить дефект при площади его развития, не превышающей 30 %, так как оставление такого рельса при неблагоприятных условиях эксплуатации может привести к его разрушению под поездом.

Для создания базы данных, анализа и расчета периодичности контроля рельсов, а также ее корректировки необходимо вести ежемесячный учет дефектных и остродефектных рельсов.

Метод уточнения (корректировки) периодичности контроля базируется на анализе эффективности проводимых проверок с применением оценочного критерия.

Расчет периодичности контроля начинается с разбивки путей на участке контроля.

На основании ведомости дефектных рельсов необходимо определить среднее значение выхода остродефектных рельсов за предыдущие 12 месяцев

$$\bar{P} = \frac{P}{L}, \quad (3.66)$$

где P – количество обнаруженных ОДР за предыдущие 12 месяцев;

L – длина участка, км.

Расчетный годовой выход ОДР на 1 км пути определяется с учетом их возможного максимального выхода при уровне значимости 0,05 и использованием коэффициента r , приведенного в таблице 3.19.

Таблица 3.19 – Значение коэффициента r при уровне значимости 0,05

L, км	1	2	4	6	10	20	30	50	100	200	600
r	0,21	0,32	0,44	0,51	0,59	0,69	0,74	0,79	0,85	0,89	0,94

$$P_{\text{расч}} = \frac{\bar{P}}{r}. \quad (3.67)$$

Сокращение числа проверок при переходе к расчетной периодичности является одним из ответственных этапов реализации новой системы контроля рельсов. Правомерность уменьшения периодичности контроля можно установить, используя гипотезу о равенстве математических ожиданий \bar{P}_1 и \bar{P}_2 определяемых числом выявленных в двух проверках остродефектных рельсов, приходящихся на 1 км проверяемого участка длиной L , соответствующих количеству проверок до и после их сокращения – N_1 и N_2 (рисунок 3.21).

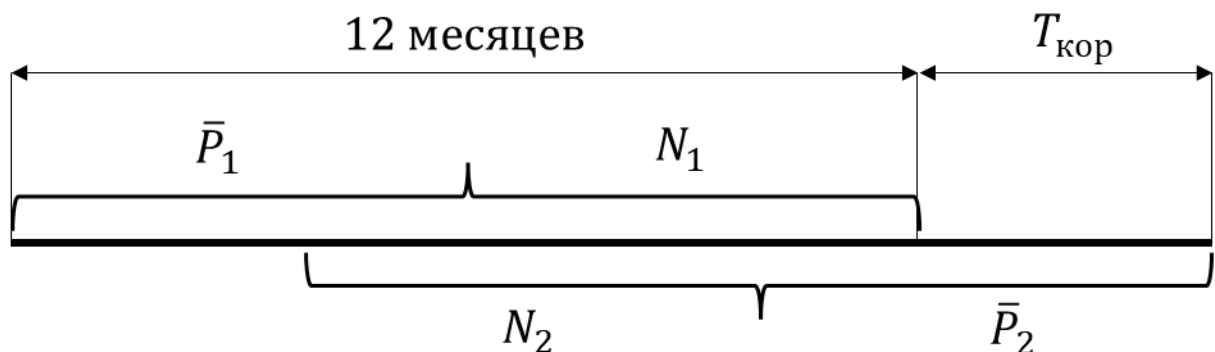


Рисунок 3.21 – Корректировка числа проверок

Для проверки гипотезы используется критерий Стьюдента t [132]. Обычно он применяется для малых выборок. Выход остродефектных рельсов подчиняется закону Пуассона, имеющему несимметричное распределение. Критерий t и в этом случае сохраняет устойчивость, если берутся одинаковые или не сильно отличающиеся объёмы выборок. Выборочная дисперсия, учитывая закон Пуассона, будет равна выборочной средней. При этом критерий t определяется, исходя из равенства дисперсий двух выборок, взятых из общей генеральной совокупности, по формуле

$$t = \frac{(\bar{P}_1 - \bar{P}_2) * \sqrt{\frac{LN_1N_2}{N_1 + N_2}}}{\sqrt{\frac{(LN_1 - 1) * \bar{P}_1 + (LN_2 - 1) * \bar{P}_2}{L * (N_1 + N_2) - 2}}}. \quad (3.68)$$

Расчетное значение t сравнивают с критической величиной критерия, полученного по распределению Стьюдента $t_{k,\gamma}$ с уровнем доверительной вероятности γ и числом степеней свободы $k = L(N_1+N_2)-2$.

Поскольку существует вероятность ошибки $1-\gamma$ отвергнуть правильную гипотезу и ошибки второго рода принять гипотезу при верности альтернативной, в ряде работ [133] рекомендуется придерживаться следующих правил. Если значение критерия попадает в область допустимых значений при $1-\gamma = 0,05$, то нет оснований считать, выдвинутую гипотезу несостоятельной. Если значения критерия попадают в критическую область $1-\gamma = 0,01$, то выдвинутую гипотезу отвергают. Если значения критерия попадают в критическую область при $1-\gamma = 0,05$ и в область допустимых значений при $\gamma = 0,01$, то нельзя принять какое-либо решение по выдвинутой гипотезе. В этом случае рекомендуется увеличить объем выборки и повторить проверку.

Однако в случае оценки уровня выявляемости ОДР эта неоднозначность может быть решена другим способом.

Часть выборочных значений при объеме выборки n с вероятностью $1-\gamma = 0,05$ могут иметь существенные отклонения и привести к пропуску дефекта. Возможный уровень этих отклонений будет

$$\beta = 0,05 * n * \bar{P}. \quad (3.69)$$

Если $\beta < 1$, то пропуск дефекта можно считать практически невозможным событием и нет оснований отвергнуть гипотезу. При $\beta \geq 1$ пропуск дефекта возможен и гипотезу следует отвергнуть.

Решение о возможности сокращения проверок с N_1 до N_2 принимается по данным таблицы 3.20 [42], где приведен порядок корректировки количества проверок при доведении их до расчетного уровня.

Таблица 3.20 – Порядок корректировки количества проверок

Соотношение среднего выхода ОДР	Величина критерия оценки t	Принимаемое решение
$\bar{P}_2 = \bar{P}_1$	-	Число последующих проверок принимается $N_{кор} = 0,75N_2$
$\bar{P}_2 > \bar{P}_1$	$ t > t_{k,\gamma=0,99}$	Число последующих проверок принимается $N_{кор} = N_2$
	$ t > t_{k,\gamma=0,95}$	Число последующих проверок принимается $N_{кор} = 0,75N_2$
$\bar{P}_2 < \bar{P}_1$	$t < t_{k,\gamma=0,95}$	Число последующих проверок принимается $N_{кор} = 0,85N_2$
	$t < t_{k,\gamma=0,95} \leq t < t_{k,\gamma=0,99}$	Число последующих проверок принимается $N_{кор} = 0,9N_2$, если $0,05 P_2L < 1$
		Число последующих проверок принимается $N_{кор} = N_2$, если $0,05 P_2L \geq 1$
	$t > t_{k,\gamma=0,99}$	Число последующих проверок принимается $N_{кор} = N_2$

Значения критерия $t_{k,\gamma}$ представлены в таблице 3.21.

Таблица 3.21 – Значения критерия $t_{k,\gamma}$

γ, k	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,95	4,30	3,18	2,77	2,57	2,45	2,36	2,31	2,26	2,23
0,99	9,92	5,84	4,69	4,03	3,71	3,50	3,36	3,25	3,17
γ, k	11	14	22	26	30	40	60	120	>120
0,95	2,14	2,10	2,07	2,06	2,04	2,02	2,00	1,98	1,96
0,99	2,98	2,88	2,82	2,78	2,75	2,70	2,66	2,62	2,58

Вначале предусматривают сокращение числа проверок, установленных в метрополитене на 25 %. Скорректированное число проверок

$$N_{кор} = N_2 = 0,75 * N_1. \quad (3.70)$$

Во всех случаях скорректированное число проверок не должно превышать расчетное $N_{расч}$, установленное по максимальному выходу ОДР на контролируемом участке за предыдущие 12 месяцев. Если $N_{кор} < N_{расч}$, то принимается $N_{кор} < N_{расч}$.

Далее определяется интервал между проверками, равный $365/N_{кор}$, и назначается следующая проверка.

На следующих этапах сравнивают средний выход ОДР \bar{P}_2 за N_2 проверок, выполненных за последние 12 месяцев с момента проведения последней проверки, и средний выход ОДР \bar{P}_1 за N_1 проверок, выполненных за последние 12 месяцев с момента проведения последней проверки (рисунок 3.21).

Корректировку продолжают до тех пор, пока

$$N_2 = N_1 = N_{\text{расч}}. \quad (3.71)$$

3.6.3 Оценка эффективности проводимых проверок

После доведения числа проверок до $N_{\text{расч}}$, следует контролировать эффективность работы дефектоскопных средств после каждой выполненной проверки, сравнивая расчетное число ОДР $\bar{P}_{\text{расч}}^{\text{пров}}$, которое необходимо было обнаружить на 1 км контролируемого участка, с фактическим количеством выявленных ОДР на 1 км за последнюю проверку $\bar{P}_{\text{факт}}^{\text{пров}}$.

Расчетное число ОДР $\bar{P}_{\text{расч}}^{\text{пров}}$, которое предполагается выявить за одну проверку на 1 км контролируемого участка, определяется по формуле

$$\bar{P}_{\text{расч}}^{\text{пров}} = \frac{\bar{P} * C_1}{k_{\text{ц}}}, \quad (3.72)$$

где \bar{P} – средний выход ОДР на 1 км контролируемого участка;

C_1 – коэффициент, определяемый по таблице 3.18;

$k_{\text{ц}}$ – число циклов контроля, определяемое по формуле

$$k_{\text{ц}} = \frac{N_{\text{зим}}}{N_{\text{зим}}^{\text{ц}}} + \frac{N_{\text{л}}}{N_{\text{л}}^{\text{ц}}}, \quad (3.73)$$

где $N_{\text{зим}}^{\text{ц}}$ и $N_{\text{л}}^{\text{ц}}$ число проверок в цикле контроля, определяемое по таблице 3.20.

Фактическое число ОДР $\bar{P}_{\text{факт}}^{\text{пров}}$, обнаруженных на 1 км контролируемого участка при текущей проверке, определяют по формуле

$$\bar{P}_{\text{факт}}^{\text{пров}} = \frac{P}{L}, \quad (3.74)$$

где P – число ОДР, обнаруженных при текущей проверке на участке длиной L .

Оценка эффективности контроля определяется степенью расхождения результатов выявления ОДР в среднем за одну проверку в прошедшем цикле и при текущей проверке.

Для оценки используется критерий Граббса [134], вычисляемый по формуле:

$$V = \frac{\bar{P}_{\text{расч}}^{\text{пров}} - \bar{P}_{\text{факт}}^{\text{пров}}}{C_2 * \bar{P}_{\text{расч}}^{\text{пров}}}, \quad (3.75)$$

где C_2 – коэффициент, определяемый по таблице 3.18.

Решение об уровне эффективности проведенной проверки принимают, исходя из условий таблицы 3.22 и значения критерия $V_{k,\gamma}$ для $k=N^{\text{ц}}-1$, определяемого по таблице 3.23. При этом

$$N^{\text{ц}} = N_{\text{зим}}^{\text{ц}} + N_{\text{л}}^{\text{ц}}, \quad (3.76)$$

где $N_{\text{зим}}^{\text{ц}}$ и $N_{\text{л}}^{\text{ц}}$ число проверок в цикле контроля, определяемое по таблице 3.20.

Таблица 3.22 – Порядок оценки эффективности проведенной проверки

Соотношение фактического и расчетного выхода ОДР	Величина критерия оценки V	Необходимость дополнительной проверки	Сроки проведения дополнительной проверки
$\bar{P}_{\text{расч}}^{\text{пров}} \geq \bar{P}_{\text{факт}}^{\text{пров}}$	-	Не требуется	-
$\bar{P}_{\text{расч}}^{\text{пров}} < \bar{P}_{\text{факт}}^{\text{пров}}$	$V < V_{k,\gamma=0,95}$	Не требуется	-
	$V > V_{k,\gamma=0,99}$	Требуется	В течение недели после проверки, признанной неэффективной
	$V_{k,\gamma=0,95} \leq V \leq V_{k,\gamma=0,99}$	Требуется	В течение недели после проверки, признанной неэффективной, если $0,05\bar{P}_{\text{расч}}^{\text{пров}} LN^{\text{ц}} \geq 1$

Таблица 3.23 – Значения критерия $V_{k,\gamma}$

γ, k	3	5	7	10	15	20	25	30	40	50
0,95	1,412	1,869	2,093	2,294	2,493	2,623	2,717	2,792	2,904	2,987
0,99	1,414	1,955	2,265	2,540	2,800	2,959	3,071	3,156	3,281	3,370

Если установлена необходимость проведения повторной проверки, следует провести более тщательную расшифровку результатов последней проверки. При

расшифровке дополнительных дефектов должен быть проведен вторичный контроль съемным дефектоскопом.

Если в ходе дополнительной проверки выявлены ОДР, то они учитываются при корректировке числа последующих проверок. Если в ходе дополнительной проверки ОДР не обнаружены, то для дальнейших расчетов используются данные последней плановой проверки.

После доведения числа проверок до $N_{расч}$, корректировку количества расчетных проверок проводят на основе сравнения среднего выхода ОДР \bar{P}_1 за последние 12 месяцев до проведения текущей проверки, и средний выход ОДР \bar{P}_2 за последние 12 месяцев с учетом текущей проверки.

По формуле (3.67) выполняется расчет среднегодового выхода ОДР на 1 км пути и далее по изложенной выше методике определяется количество проверок $N_{расч}$.

При отклонении числа проверок от $N_{расч}$ в большую или меньшую сторону, рассчитывается критерий оценки t по формуле, преобразованной из формулы (3.68) при одинаковых объемах выборок:

$$t = \frac{|\bar{P}_1 - \bar{P}_2|}{\sqrt{\frac{\bar{P}_1 + \bar{P}_2}{L * N_{расч}}}}, \quad (3.77)$$

Критерий $t_{k,\gamma}$ определяется при $k = 2*(N_{расч}-1)$ степенях свободы. Решение о необходимости корректировки числа проверок принимают, исходя из таблицы 3.24.

Таблица 3.24 – Порядок корректировки количества проверок

Величина критерия оценки	Соотношение выхода ОДР	Принимаемое решение
$t \geq t_{k,\gamma=0,95}$	$\bar{P}_1 > \bar{P}_2$	$N_{расч}$ определяется на основе значения \bar{P}_2
	$\bar{P}_1 < \bar{P}_2$	
$t < t_{k,\gamma=0,95}$	$\bar{P}_1 > \bar{P}_2$	Корректировка не делается, если $0,05\bar{P}_2L \geq 1$
		Корректировка делается, если $0,05\bar{P}_2L < 1$
	$\bar{P}_1 < \bar{P}_2$	Корректировка делается, если $0,05\bar{P}_2L \geq 1$
		Корректировка не делается, если $0,05\bar{P}_2L < 1$

Статистическая оценка результатов неразрушающего контроля рельсов дает возможность дальнейшей оптимизации числа проверок по мере накопления базы данных, включая переход к расчету периодичности по среднему выходу ОДР вместо максимального.

3.7 Выводы по главе 3

1) Принятое во второй главе значение удельного выхода рельсов в 6 шт./км позволяет пересмотреть нормативную наработку тоннажа до сплошной смены рельсов, на основе методов математической статистики и теории вероятностей. Основываясь на фактических данных по выходу рельсов, была подобрана наиболее подходящая функция распределения отказов рельсов, из наиболее применимых моделей: нормального распределения, распределения Вейбулла, экспоненциального и степенного распределения.

2) В качестве функции распределения выхода рельсов в результате анализа была выбрана степенная функция распределения, которая наиболее близка к фактическим данным.

3) Изменение текущих нормативов для рельсов типа Р50 в кривых участках пути радиусом менее 800 м незначительно, чего нельзя сказать про кривые радиусом 800 м и более и прямые участки пути, где нормативную наработку можно

увеличить на ощутимо большее значение, обеспечивая при этом безопасность движения поездов.

4) Изменение текущих нормативов для рельсов типа Р65 в кривых радиусом 300 м и менее незначительно, в кривых радиусом более 300 м оно уже более значительно. В кривых радиусом 600 м и более и прямых участках пути нормативную наработку можно увеличить более, чем в 1,5 раза, обеспечивая при этом безопасность движения поездов.

5) При увеличении нормативной наработки тоннажа рельсов суммарный экономический эффект к 18-му году эксплуатации составит для рельсов типа Р50 17,52 млн руб./км, для рельсов типа Р65 – 29,45 млн руб./км. Варианты сравнивались из условия, что в нулевой год была произведена сплошная смена всех лежащих рельсов, и следующая сплошная смена рельсов будет произведена для базового варианта по достижении действующей нормативной наработки тоннажа, для предлагаемого варианта – при достижении расчетной (предложенной) наработки тоннажа. Расчет экономической эффективности выполнен до 17 года эксплуатации ввиду того, что сплошная смена рельсов в прямых участках пути для расчетного варианта для рельсов типа Р65 будет произведена на 18 год эксплуатации, таким образом будет завершен самый продолжительный цикл от укладки рельсов в путь до их замены.

6) В качестве перехода от планово-периодического к планово-предиктивному контролю рельсов была использована методика, основанная на расчетной вероятности выявления дефектов в зависимости от интенсивности выхода и развития остродефектных рельсов, грузонапряженности участка, пропущенного тоннажа и условий эксплуатации пути, и адаптирована под условия метрополитена.

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ РЕЛЬСОВ НА БАЗЕ ИХ ФАКТИЧЕСКОГО ВЫХОДА

4.1 Общие положения

В предыдущей главе были предложены откорректированные значения нормативной наработки тоннажа, исходя из критерия выхода рельсов 6 шт./км. Г.М. Шахунянц, исследуя выход рельсов [3], при назначении предельного выхода рельсов использовал предположение о том, что его можно назначать исходя из критерия возможности замены рельсов на участке без потери качества других путевых работ. В своей работе Д.А. Погосян [80] получил, что на работы по устранению неисправностей ГРК на околотке бригаде требуется тратить 16 дней в месяц. Исходя из условия, что в месяце 22 рабочих дня, можно принять, что на одиночную замену рельсов можно тратить 6 дней в месяц. Принимая во внимание среднюю длину околотка $L_{ок} = 12$ км, получаем предельное количество рельсов на 1 км пути, которое можно заменить без ущерба другим путевым работам в год

$$n = \frac{n_{дн}^{зам} * 12}{L_{ок}} = \frac{6 * 12}{12} = 6 \frac{шт.}{км}, \quad (4.1)$$

где $n_{дн}^{зам}$ – число дней, которые можно тратить в месяц на замену одиночных дефектов без ущерба другим путевым работам;

$L_{ок}$ – средняя длина околотка в метрополитене.

В данной главе разработана методика увеличения срока службы рельсов на базе анализа их фактического выхода по мере наработки тоннажа. В этом случае, значение нормативной наработки, при которой должна быть выполнена сплошная смена рельсов, не назначают, а задают критерий предельного выхода рельсов на 1 км пути, при достижении которого назначают сплошную смену рельсов.

В третьей главе было показано, что наилучшую аппроксимацию выхода рельсов дает степенная функция. Поскольку категория рельсов типа Р50 не меняется, можно непосредственно использовать функции (3.50 – 3.54). Поскольку полигон применения рельсов типа Р65 постоянно увеличивается, а также меняются

их категории, то для рельсов типа Р65 необходимо получать новые коэффициенты аппроксимирующей функции.

Таким образом, учитывая значение одиночного выхода 6 шт./км, по фактическим данным можно следить за прогнозным значением выхода рельсов и планировать сплошную смену рельсов на участке. Сплошная смена рельсов в метрополитене происходит не сразу: необходимо время на их закупку, доставку, сварку в рельсовые плети, вывоз на участки сплошной смены рельсов и т.д. (около 2 лет) – поэтому при прогнозировании срока удобнее разбить его на интервалы по срочности смены: «необходима сплошная смена рельсов в течение 2 лет» (красный уровень), «необходима сплошная смена рельсов в течение 3 лет» (желтый уровень), «до сплошной смены рельсов больше 3 лет» (зеленый уровень). При расчете в методике было принято, что средняя грузонапряженность в метрополитене составляет 50 млн т брутто/км в год.

Суть методики состоит в следующем:

- по теоретическим функциям удельного выхода рельсов для соответствующего плана пути, полученным в третьей главе, строят графики интенсивности выхода рельсов на значения наработки в долях от нормативной, однако при разделении наработки от нуля до нормативного значения в первом приближении вместо пяти берут первые три интервала ($0,2N$, $0,4N$, $0,6N$);

- рассчитывают предполагаемый период до сплошной смены рельсов, за который принимают наработку тоннажа, когда достигается значение выхода рельсов в 6 шт./км;

- в случае, если при прогнозе возникает «красный уровень» (необходима сплошная смена рельсов в течение 2 лет), следует начать подготовку к смене рельсов на рассматриваемом участке;

- если «красного уровня» не возникает, продолжают наблюдение за выходом рельсов на участке, и после получения фактических данных по выходу рельсов при достижении следующего периода наработки рельсов ($0,8N$, N , а также последующие при необходимости), теоретическую кривую перестраивают с

учетом новых данных, и далее производят перерасчет значений выхода рельсов на последующие периоды наработки до возникновения «красного уровня».

Таким образом, по фактическим данным можно следить за значением выхода рельсов и планировать сплошную смену рельсов на участке.

Данная методика позволяет не учитывать значения нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов, а учитывать только критерий одиночного выхода рельсов при назначении сплошной смены рельсов. Таким образом, данная методика позволит делать прогноз сплошной смены рельсов не только для рельсов типа Р50 категории НТ260 и рельсов типа Р65 категории ОТ350 и ДТ350, но и для других типов и категорий рельсов, которые, возможно будут укладывать в метрополитене.

4.2 Определение сроков сплошной смены рельсов типа Р65

Для проверки правильности работы методики будет выполнен расчет сроков замены рельсов для имеющихся фактических данных.

Стоит отметить, что для кривых радиусом 300 м и менее ввиду малого значения нормативной наработки тоннажа «красный уровень» будет наступать до значения $0,6N$, в связи с этим данная методика применима для кривых радиусом более 300 м и для прямых участков пути.

Для начала производится подбор коэффициентов степенной функции распределения выхода рельсов при достижении 60% действующей нормативной наработки тоннажа и определяется значение наработки и срок до сплошной смены рельсов. Графики приведены на рисунках 4.1 – 4.3. Расчеты сведены в таблицу 4.1.

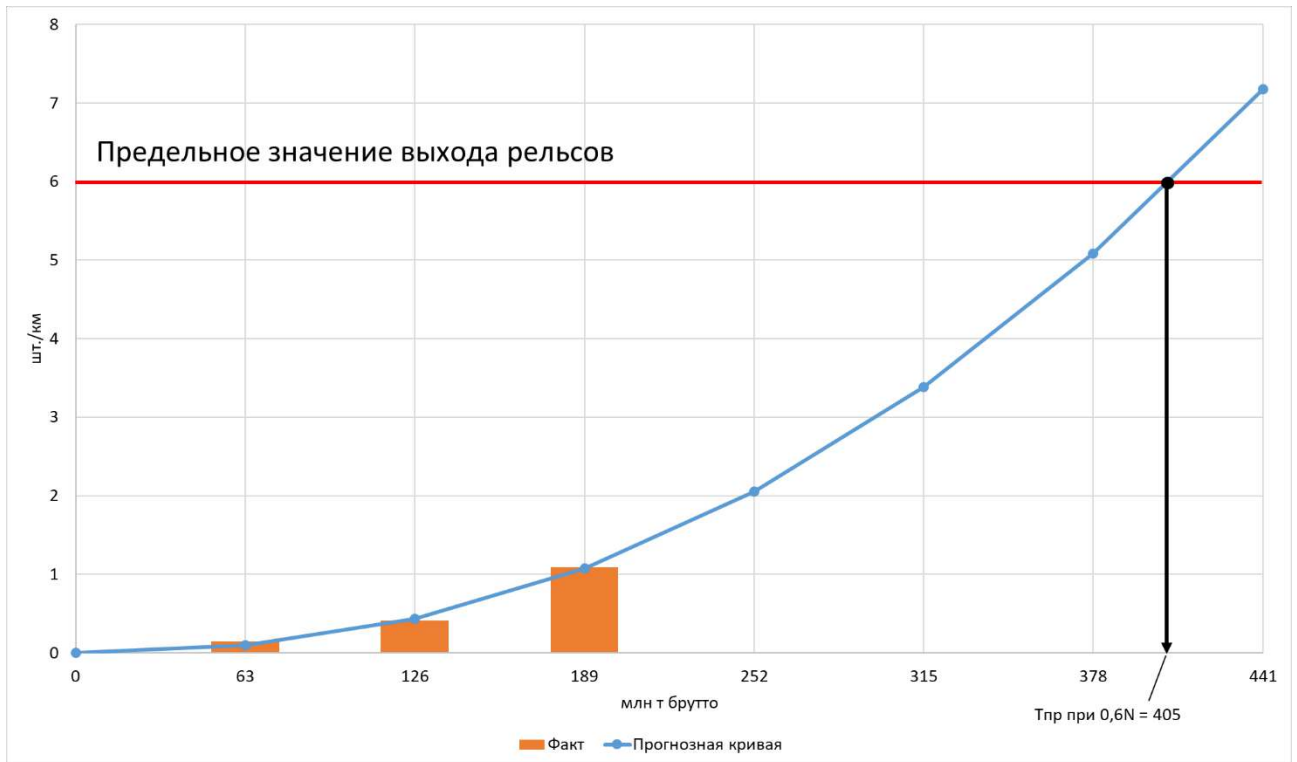


Рисунок 4.1 – Сравнение фактического выхода рельсов с его прогнозным значением при наработке тоннажа $0,6N$ для кривых радиусом от 301 до 599 м

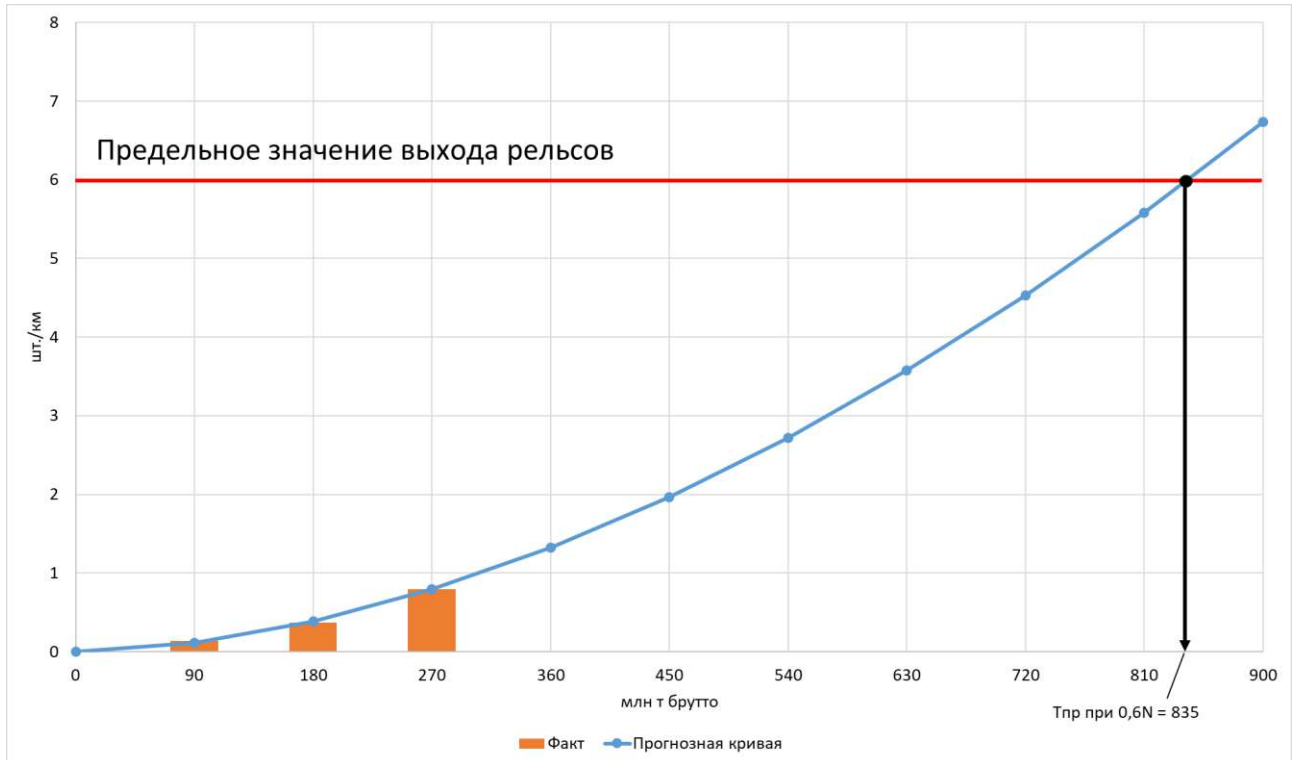


Рисунок 4.2 – Сравнение фактического выхода рельсов с его прогнозным значением при наработке тоннажа $0,6N$ для кривых радиусом 600 м и более

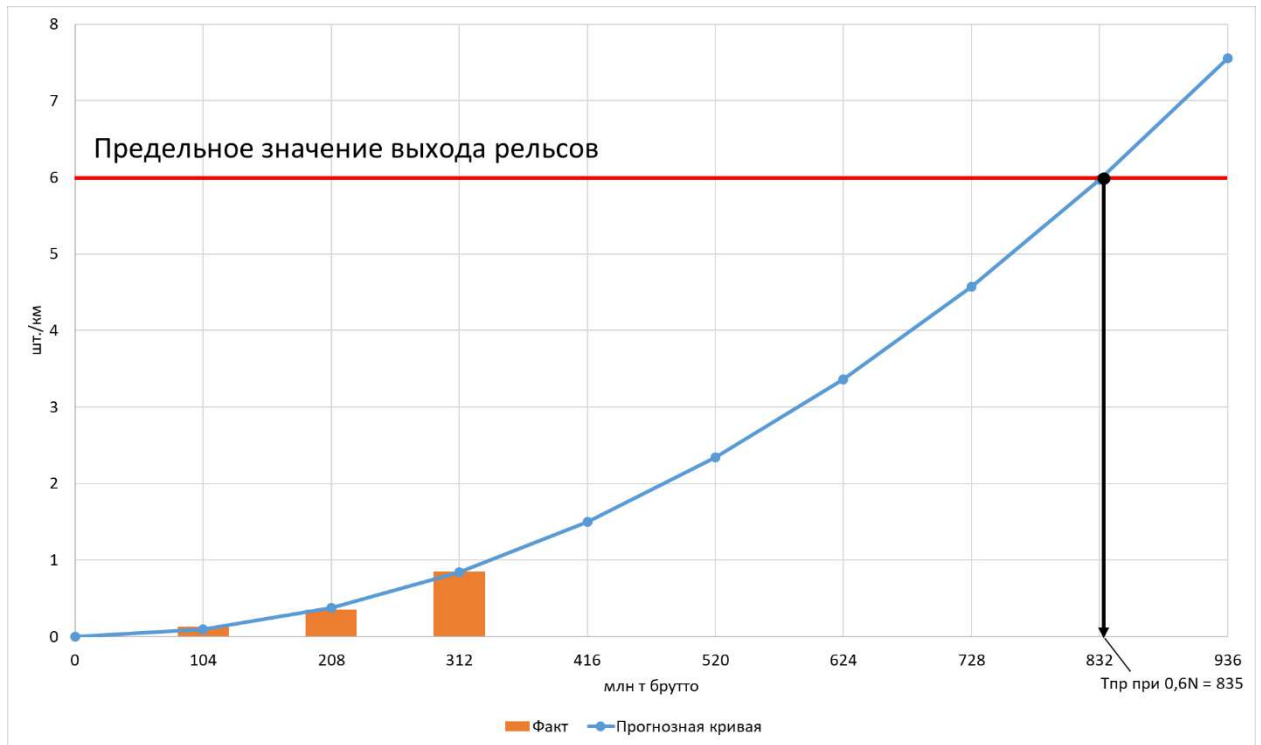


Рисунок 4.3 – Сравнение фактического выхода рельсов с его прогнозным значением при наработке тоннажа $0,6N$ для прямых участков пути

Таблица 4.1 – Расчет сроков замены рельсов при наработке $0,6N$

План пути	Наработка T , млн т брутто	Интенсивность отказов фактическая $R(T)$, шт./км	Интенсивность отказов $R(t_i)$ при учете 3 интервалов наработки, шт./км	Наработка для сплошной смены
1	2	3	4	5
$300 \leq R < 600$	0	0	0	405
	63	0,14	0,09	
	126	0,41	0,43	
	189	1,09	1,08	
	252	-	2,05	
	315	-	3,38	
	378	-	5,08	
	441	-	7,18	
$R \geq 600$	0	0	0	835
	90	0,13	0,11	
	180	0,37	0,39	
	270	0,80	0,79	
	360	-	1,32	
	450	-	1,96	
	540	-	2,72	
	630	-	3,57	
	720	-	4,53	
	810	-	5,58	
	900	-	6,73	

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5
Прямые	0	0	0	835
	104	0,13	0,09	
	208	0,35	0,38	
	312	0,85	0,84	
	416	-	1,50	
	520	-	2,34	
	624	-	3,36	
	728	-	4,58	
	832	-	5,97	
	936	-	7,55	

Далее аналогичные действия производятся при достижении 80 % от действующей нормативной наработки тоннажа. Графики приведены на рисунках 4.4 – 4.6. Расчеты сведены в таблицу 4.2.

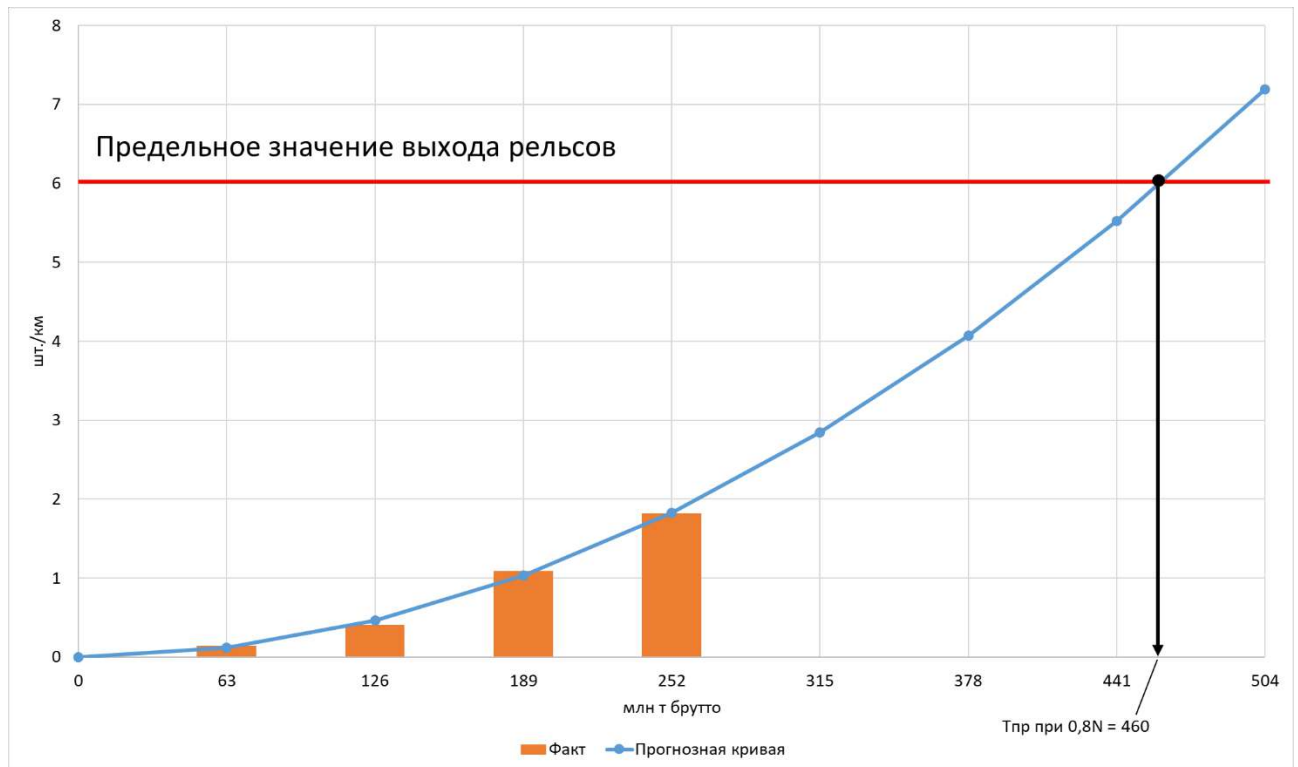


Рисунок 4.4 – Сравнение фактического выхода рельсов с его прогнозным значением при наработке тоннажа $0,8N$ для кривых радиусом от 301 до 599 м

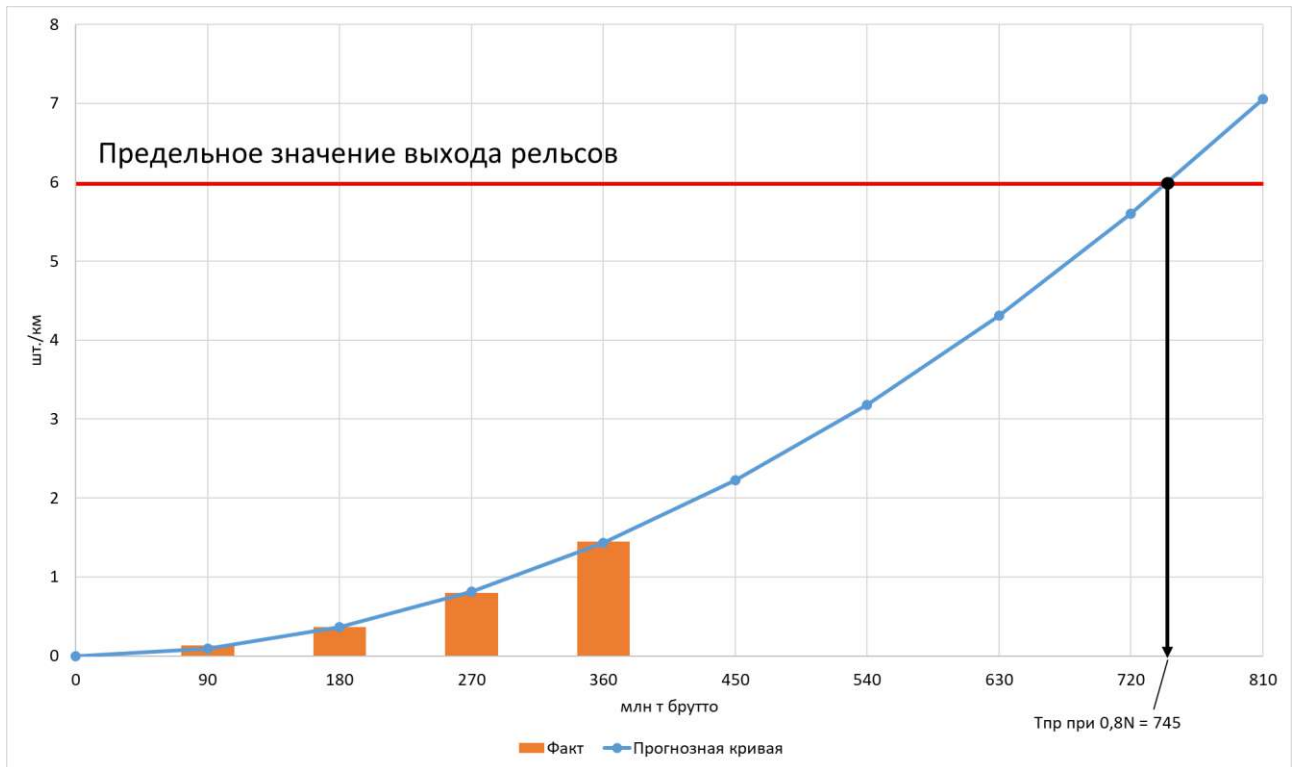


Рисунок 4.5 – Сравнение фактического выхода рельсов с его прогнозным значением при наработке тоннажа $0,8N$ для кривых радиусом 600 м и более

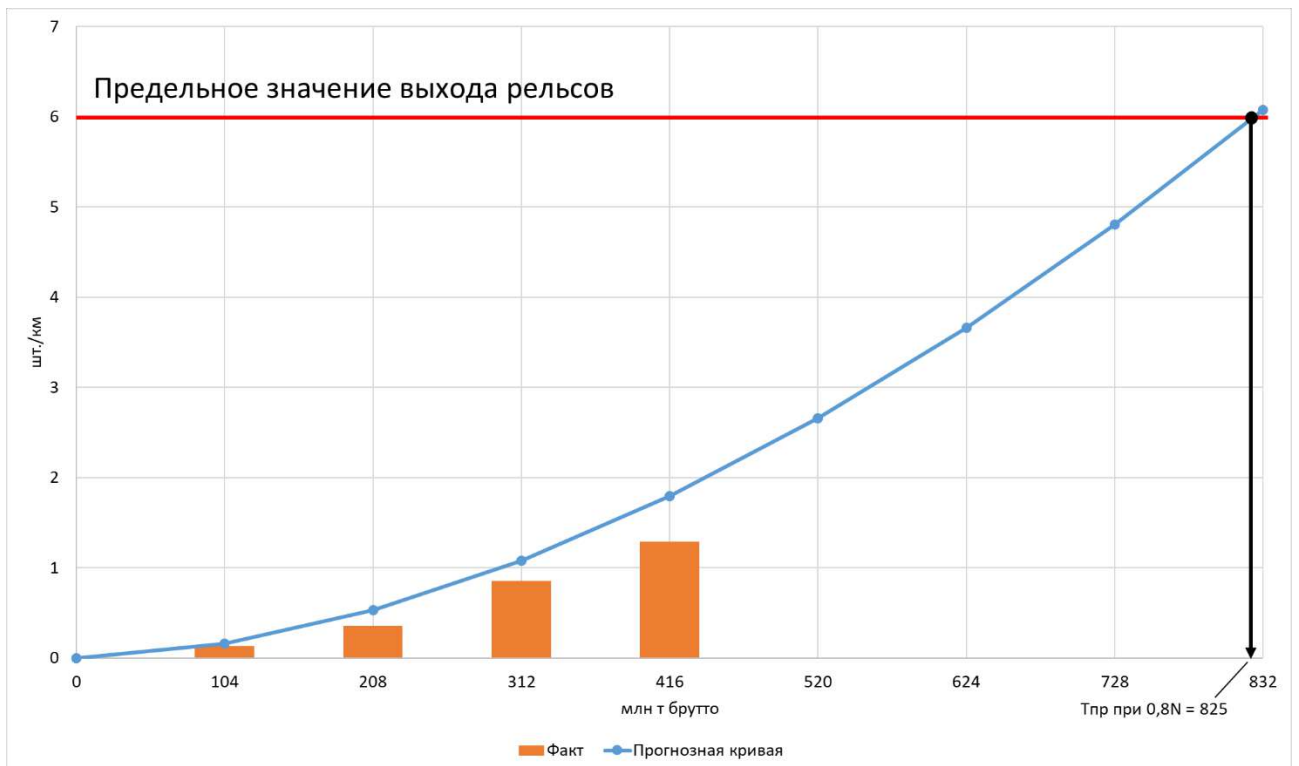


Рисунок 4.6 – Сравнение фактического выхода рельсов с его прогнозным значением при наработке тоннажа $0,8N$ для прямых участков пути

Таблица 4.2 – Расчет сроков замены рельсов при наработке $0,8N$

План пути	Наработка T , млн т брутто	Интенсивность отказов фактическая $R(T)$, шт./км	Интенсивность отказов $R(t_i)$ при учете 4 интервалов наработки, шт./км	Наработка для сплошной замены
$300 \leq R < 600$	0	0	0	460
	63	0,14	0,12	
	126	0,41	0,46	
	189	1,09	1,04	
	252	1,81	1,83	
	315	-	2,84	
	378	-	4,07	
	441	-	5,53	
	504	-	7,19	
$R \geq 600$	0	0	0	745
	90	0,13	0,09	
	180	0,37	0,37	
	270	0,80	0,82	
	360	1,45	1,44	
	450	-	2,22	
	540	-	3,18	
	630	-	4,31	
	720	-	5,60	
	810	-	7,06	
Прямые	0	0	0	825
	104	0,13	0,16	
	208	0,35	0,53	
	312	0,85	1,08	
	416	1,29	1,79	
	520	-	2,66	
	624	-	3,66	
	728	-	4,80	
	832	-	6,08	

Далее аналогичные действия производятся при достижении 100% от действующей нормативной наработки тоннажа. Графики приведены на рисунках 4.7 – 4.9. Расчеты сведены в таблицу 4.3.

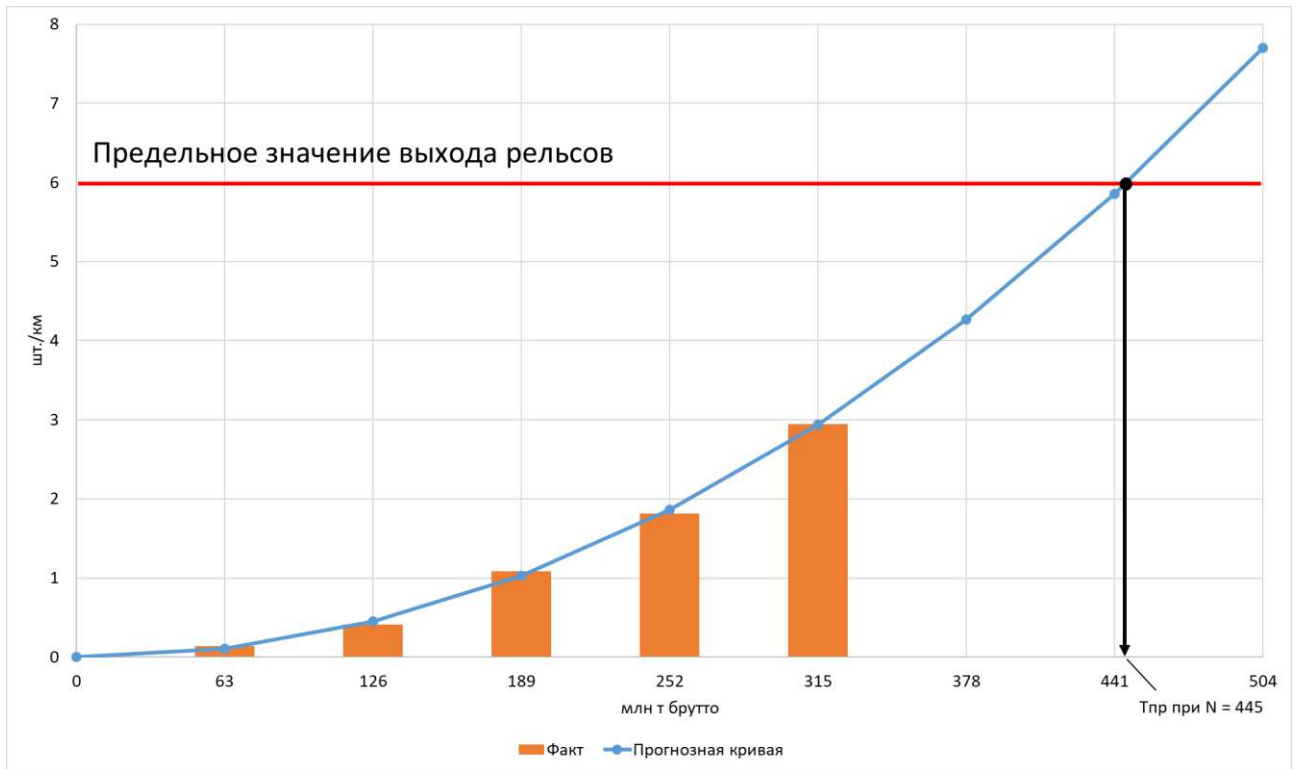


Рисунок 4.7 – Сравнение фактического выхода рельсов с его прогнозным значением при наработке тоннажа N для кривых радиусом от 301 до 599 м

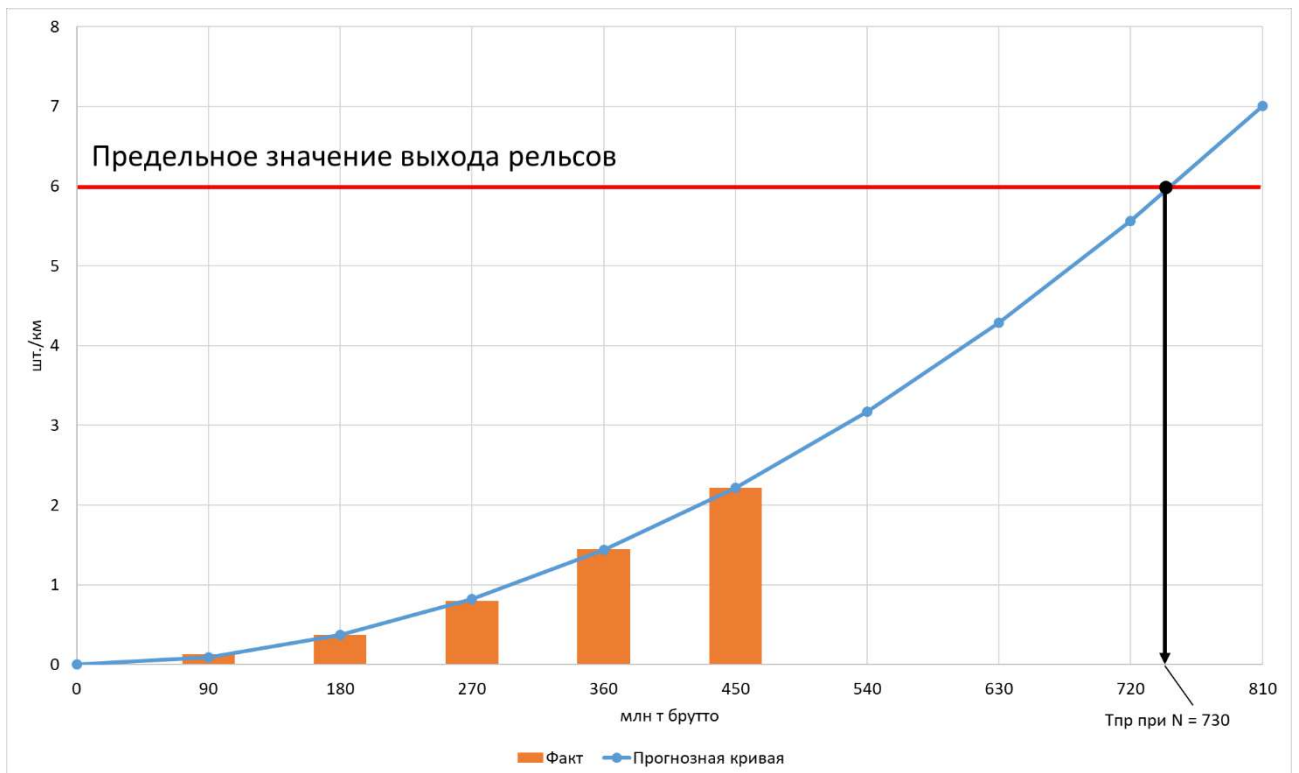


Рисунок 4.8 – Сравнение фактического выхода рельсов с его прогнозным значением при наработке тоннажа N для кривых радиусом 600 м и более

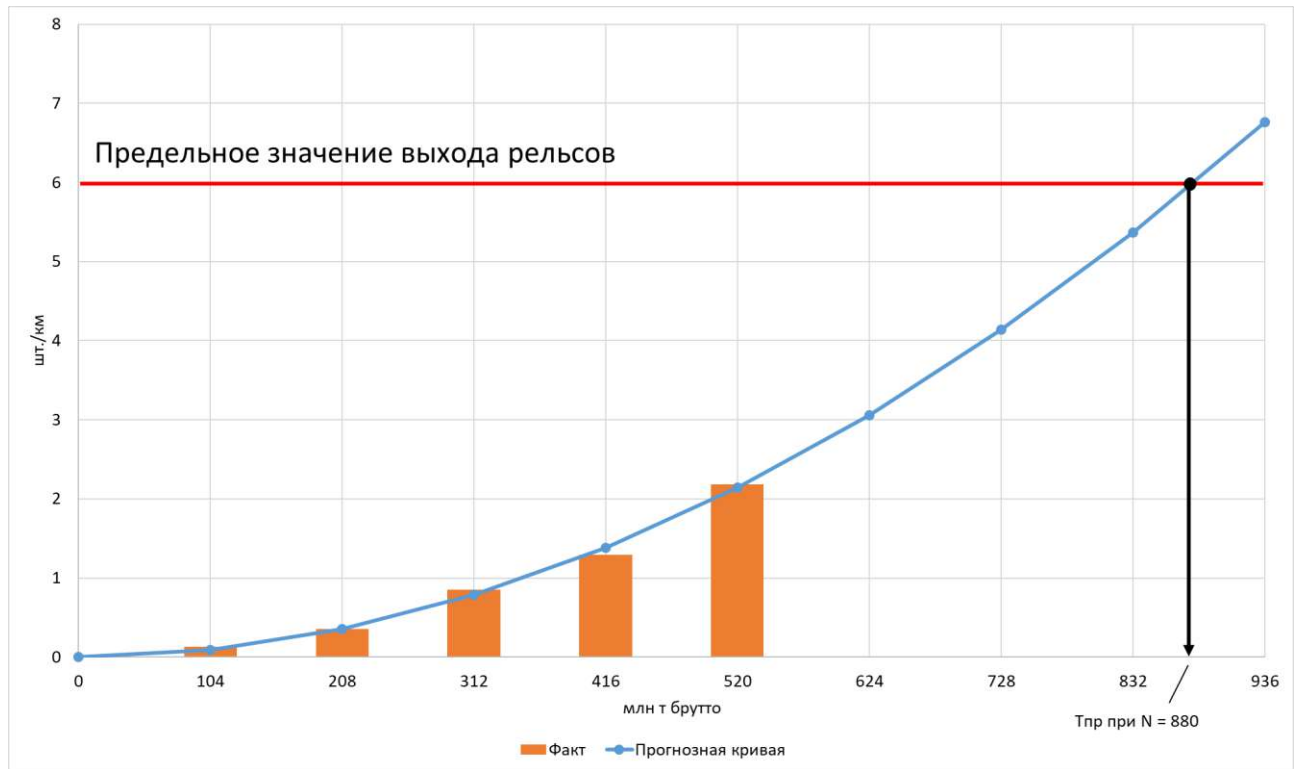


Рисунок 4.9 – Сравнение фактического выхода рельсов с его прогнозным значением при наработке тоннажа N для прямых участков пути

Таблица 4.3 – Расчет сроков замены рельсов при наработке N

План пути	Наработка T , млн т брутто	Интенсивность отказов фактическая $R(T)$, шт./км	Интенсивность отказов $R(t_i)$ при учете 5 интервалов наработки, шт./км	Наработка для сплошной смены
1	2	3	4	5
$300 \leq R < 600$	0	0	0	445
	63	0,14	0,11	
	126	0,41	0,45	
	189	1,09	1,03	
	252	1,81	1,86	
	315	2,95	2,94	
	378	-	4,27	
	441	-	5,86	
	504	-	7,70	
$R \geq 600$	0	0	0	730
	90	0,13	0,10	
	180	0,37	0,37	
	270	0,80	0,82	
	360	1,45	1,43	
	450	2,22	2,22	
	540	-	3,17	
	630	-	4,29	
	720	-	5,56	
	810	-	7,00	

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	4	5
Прямые	0	0	0	880
	104	0,13	0,09	
	208	0,35	0,36	
	312	0,85	0,79	
	416	1,29	1,38	
	520	3,73	2,14	
	624	-	3,06	
	728	-	4,14	
	832	-	5,37	
	936	-	6,76	

Анализируя результаты расчетов, можно сказать, что при наработке 189 млн т брутто (0,6N) в кривых радиусом от 301 до 599 м прогнозируемая наработка до сплошной смены рельсов составляет 405 млн т брутто. Таким образом, до сплошной смены рельсов 216 млн т брутто или 4,3 года (зеленый уровень). Следует продолжать наблюдение за участком. При получении фактических данных по выходу рельсов при достижении следующего периода наработки 252 млн т брутто (0,8N) прогнозируемая наработка до сплошной смены рельсов составит 460 млн т брутто и наработка до сплошной смены рельсов составит 208 млн т брутто или 4,1 года (зеленый уровень). Следует продолжать наблюдение за участком. При получении фактических данных по выходу рельсов при достижении следующего периода наработки 315 млн т брутто (N) прогнозируемая наработка до сплошной смены рельсов составит 445 млн т брутто и наработка до сплошной смены рельсов составит 130 млн т брутто или 2,6 года (желтый уровень). То есть сплошная смена рельсов необходима в течение 3 лет. Прогнозирование сплошной смены рельсов для остальных диапазонов плана пути представлено в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Прогнозирование сплошной смены рельсов типа Р65

План пути	Доля от действующей нормативной наработки (млн т брутто)	Прогнозируемая наработка до сплошной смены рельсов (млн т брутто)	Предложенная нормативная наработка (млн т брутто)	Расхождение прогнозируемой наработки до сплошной смены рельсов с предложенной, %	Уровень
$300 \leq R < 600$	0,6N (189)	405	445	9	Зеленый
	0,8N (252)	460		3	Зеленый
	N (315)	445		0	Желтый
$R \geq 600$	0,6N (270)	835	730	14	Зеленый
	0,8N (360)	745		2	Зеленый
	N (450)	730		0	Зеленый
Прямые	0,6N (312)	835	880	6	Зеленый
	0,8N (416)	825		6	Зеленый
	N (520)	880		0	Зеленый

4.3 Выводы по главе 4

1) Предложена методика увеличения срока службы рельсов на базе анализа их фактического выхода по мере наработки тоннажа. В этом случае, значение нормативной наработки, при которой должна быть выполнена сплошная смена рельсов, не назначают, а задают критерий предельного выхода рельсов на 1 км пути, при достижении которого назначают сплошную смену рельсов. Таким образом, учитывая это значение, по фактическим данным можно следить за прогнозным значением выхода рельсов и планировать сплошную смену рельсов на участке.

2) Разработанная методика позволяет не учитывать значения нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов, а учитывать только критерий одиночного выхода рельсов при назначении сплошной смены рельсов. Таким образом, методика позволит делать прогноз сплошной смены рельсов не только для рельсов типа Р65 категории ОТ350 и ДТ350, но и для других типов и категорий рельсов, которые, возможно, будут укладывать в метрополитене.

3) Для кривых радиусом 300 м и менее для всех типов рельсов и для кривых радиусом от 301 до 599 м для рельсов типа Р50 ввиду малого значения нормативной наработки тоннажа подготовку к сплошной смене рельсов следует начинать практически сразу после укладки новых рельсов.

4) Для проверки правильности работы методики был выполнен расчет сроков замены рельсов типа Р65 для имеющихся фактических данных. Был произведен подбор коэффициентов степенной функции распределения выхода рельсов при достижении 60 % наработки тоннажа и определяется значение наработки и срок до сплошной смены рельсов. Расчеты показали, относительная ошибка прогноза наработки до сплошной смены рельсов составляет менее 15 % в сравнении с предложенной наработкой в третьей главе во всех диапазонах плана пути, что подтверждает правильность применения данной методики.

5) Данные расчеты были выполнены для фактических значений, полученных в работе за рассматриваемый период, которые можно обновлять по мере накопления данных о фактическом выходе рельсов на полигоне метрополитена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Установлено, что условия эксплуатации рельсов в метрополитене в отличие от магистральных железных дорог, такие как однородность подвижного состава и его скоростей, определяющие возвышение наружного рельса в кривых, приводят к тому, что основной причиной развития дефектов является недостаточная контактно-усталостная прочность рельсового металла (91,5 %), а развитие дефектов рельсов, обусловленных их износом незначительно и составляет 1,3 %.

2) Получены зависимости выхода рельсов в метрополитене от таких эксплуатационных показателей как тип рельсов и план пути в виде степенных функций. Средневзвешенный по протяженности удельный выход рельсов типа Р50 за период с 2014 по 2019 годы составляет 2,43 шт./км, рельсов типа Р65 категорий ОТ350 и ДТ350 – 1,08 шт./км, а категории НТ260 – 2,00 шт./км. Получено, что при одинаковых параметрах плана пути удельный выход рельсов типа Р65 меньше, чем типа Р50. Ввиду того, что все рельсы типа Р50 категории НТ260, а рельсы типа Р65 категорий ОТ350 и ДТ350, можно сделать вывод о том, что меньший удельный выход рельсов типа Р65 обусловлен прежде всего не типом, а категорией (видом термоупрочнения). В условиях эксплуатации метрополитена (а также участков интенсивного пригородного движения) можно рекомендовать применение термоупрочненных рельсов общего назначения.

3) Получены функции степенного распределения выхода рельсов для типов Р50 и Р65 впервые для Московского метрополитена. Выявлен существенный запас наработки тоннажа до сплошной смены рельсов в кривых 800 м и более и в прямых участках пути для рельсов типа Р50 и в кривых 600 м и более и в прямых участках пути для рельсов типа Р65.

4) Обосновано увеличение критерия предельного выхода рельсов с 3 шт./км до 6 шт./км при обеспечении безопасности движения поездов. С момента назначения текущего значения критерия качество рельсовой стали значительно улучшено, повышается доля рельсов категорий ОТ350 и ДТ350. Действующий критерий выхода рельсов в 3 шт./км выполняется только в прямых участках пути

для рельсов типа Р50, и в пологих кривых и прямых участках пути для рельсов типа Р65, а в остальных диапазонах плана пути выход больше при достижении нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов, то есть это значение не является определяющим при назначении сплошной смены рельсов.

5) Предложено увеличение критерия предельного выхода рельсов с 3 шт./км до 6 шт./км и, соответственно, пересмотрены значения нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов, исходя из нового критерия предельного выхода рельсов на основании того, что Московский метрополитен по своим эксплуатационным характеристикам близок ко 2 классу пути железных дорог общего пользования, где грузонапряжённость составляет до 50 млн т брутто/км в год, скорости движения поездов составляют 61-100 км/ч, а предельное значение выхода рельсов – 6 шт./км.

6) Определены новые значения нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов, при которых обеспечивается безопасность движения поездов, исходя из критерия предельного выхода рельсов 6 шт./км и степенного характера распределения.

7) Разработан научно-обоснованный подход к определению срока сплошной смены рельсов на базе анализа их фактического выхода по критерию «одиночный удельный выход». По фактическим данным можно следить за прогнозным значением выхода рельсов и планировать сплошную смену рельсов на участке в режиме «реального времени». Данный подход можно применять не только для Московского, но и для других метрополитенов.

8) Рекомендуются применение методики предиктивного назначения сплошной смены рельсов на базе их фактического выхода в Московском метрополитене.

9) Дальнейшей перспективой разработки темы является проработка возможности изменения градации нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов по плану пути и более глубокий анализ вопросов дефектоскопии исходя из пересмотренных в работе критериев по назначению сплошной смены рельсов, а также обоснование применения термоупрочненных рельсов общего назначения в условиях интенсивного пригородного движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холодецкий А.А. Исследование влияния внешних сил на верхнее строение железнодорожного пути: извлечено из журн. "Инженер" за 1897 г. / А. А. Холодецкий. – Киев: Типо-лит. т-во И.Н. Кушнерев и К^о в Москве, Киев. отделение, 1897. – 177 с.
2. Цеглинский К. Железнодорожный путь в кривых. Исследование оснований устройства и условий работы пути в связи с особенностями криволинейного движения поездов / К. Цеглинский. – М., Т-во типо-литогр. В. Чичерин, 1903. – 161 с.
3. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь / Г.М. Шахунянц. – М.: ТрансЖелдорИздат, 1961. – 615 с.
4. Шахунянц Г.М. Проектирование железнодорожного пути / Г.М. Шахунянц. – М.: Транспорт, 1972. – 320 с.
5. Лысюк В.С., Бугаенко В.М. Повреждения рельсов и их диагностика / В.С. Лысюк, В.М. Бугаенко. – М.: ИЦК «Академкнига», 2006. – 638 с.
6. Лысюк В.С. Основы методики расчета отказов и межремонтного ресурса железнодорожного пути по повреждениям рельсов / В.С. Лысюк. – М.: ВНИИЖТ, 1983. – 57с. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 25.02.83г. №2120.
7. Лысюк В.С. Барабошин В.Ф., Лукьянов А.В. и др. Износ колес и долговечность рельсов / В.С. Лысюк, В.Ф. Барабошин, А.В. Лукьянов // «Путь и путевое хозяйство». – 1984. – № 5. – С. 27-28.
8. Шур Е.А. Повреждения рельсов / Е.А. Шур. – М.: Интекст, 2012. – 192 с.
9. Шур Е.А., Борц А.И., Абдурашитов А.Ю. Увеличить ресурс рельсов, лимитируемый их боковым износом / Е.А. Шур, А.И. Борц, А.Ю. Абдурашитов // «Путь и путевое хозяйство». – 2017. – № 5. – С. 2-8.
10. Горячева И.Г., Захаров С.М., Коган А.Я., Торская Е.В., Шур Е.А., Абдурашитов А.Ю., Борц А.И., Заграничек К.Л. Комплексный подход к прогнозированию работоспособности и ресурса рельсов нового поколения / И.Г.

Горячева, С.М. Захаров, А.Я. Коган, Е.В. Торская, Е.А. Шур, А.Ю. Абдурашитов, А.И. Борц, К.Л. Заграничек // Бюллетень ОУС ОАО «РЖД» – 2017. – № 5-6. – С. 16-26.

11. Шур Е.А., Борц А.И., Заграничек К.Л. Предложения по корректировке классификации дефектов рельсов / Е.А. Шур, А.И. Борц, К.Л. Заграничек // «Путь и путевое хозяйство». – 2019. – № 8. – С. 11-15.

12. Абдурашитов А.Ю., Шур Е.А. Совершенствовать систему ведения рельсового хозяйства / А.Ю. Абдурашитов, Е.А. Шур // «Путь и путевое хозяйство». – 2005. – № 16. – С. 2-7.

13. Коган А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А.Я. Коган. – М.: Транспорт, 1997. – 326 с.

14. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава / М.Ф. Вериго, А.Я. Коган. – М.: Транспорт, 1986, 560 с.

15. Коган А.Я. Оценка износа рельсов и бандажей колесных пар при движении подвижного состава в кривых участках пути / А.Я. Коган // «Вестник ВНИИЖТ». – 1990. – № 2. – С. 36-40.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. Краснов О.Г. Прогнозирование износа и контактно-усталостной повреждаемости рельсов для условий интенсификации грузового движения: дис. ... доктор техн. наук: 2.9.2. / Краснов Олег Геннадьевич. – Москва. 2022. – 408 с.

23. Абдурашитов А.Ю. Особенности работы рельсов в условиях сурового климата и необходимость их учета для повышения безопасности движения: автореферат дис. ... кан. техн. наук: 05.22.06 / Абдурашитов Анатолий Юрьевич. – Москва. 1988. – 24 с.

24. Абдурашитов А.Ю. Закономерности образования контактно-усталостных дефектов / А.Ю. Абдурашитов // «Путь и путевое хозяйство». – 2002. – № 11. – С. 16-21.

25. Лисицын А.И., Абдурашитов А.Ю. О продлении межремонтного эксплуатационного ресурса рельсов / А.И. Лисицын, А.Ю. Абдурашитов // «Путь и путевое хозяйство». – 2019. – № 2. – С. 2-6.

26. Абдурашитов А.Ю. Овчинников Д.В., Покацкий В.А. Расчеты предельного состояния рельсов на основе моделирования их ресурса по дефектам 21.1, 21.2, 53.1, 69 / А.Ю. Абдурашитов Д.В. Овчинников, В.А. Покацкий // «Путь и путевое хозяйство». – 2019. – № 6. – С. 2-6.

27. Абдурашитов А.Ю. Особенности работы рельсов в современных условиях эксплуатации / А.Ю. Абдурашитов // «Путь и путевое хозяйство». – 2020. – № 8. – С. 8-10.

28. Абдурашитов А.Ю. Одиночное изъятие рельсов – основной критерий назначения реконструкции пути / А.Ю. Абдурашитов // «Техника железных дорог». – 2015. – № 5. – С. 26-31.

29. Абдурашитов А.Ю. Особенности системы ведения рельсового хозяйства на российских железных дорогах: сб. трудов АО «ВНИИЖТ» / под. ред. А.Ю. Абдурашитова. М., 2017. – 160 с.
30. Крысанов Л.Г., Абдурашитов А.Ю. Свойства рельсов с контактно-усталостными повреждениями / Л.Г. Крысанов, А.Ю. Абдурашитов // «Путь и путевое хозяйство». – 1988. – № 8. – С. 2-4.
31. Васильева С.А., Борц А.И. О корректировке сфер применения рельсов различных категорий / С.А. Васильева А.И. Борц // «Путь и путевое хозяйство». – 2020. – № 11. – С. 24-26.
32. Заграничек К.Л., Рейхарт В.А., Светозарова И.В., Сравнение рельсов категорий ДТ350 и ОТ350 по стойкости к развитию трещин в подошве / К.Л. Заграничек, В.А. Рейхарт, И.В. Светозарова // «Путь и путевое хозяйство». – 2019. – № 10. – С. 8-13.
33. Каменский В.Б. Направления совершенствования системы ведения путевого хозяйства / В.Б. Каменский. – М.: ОАО НИИТКД, 2009. – 392 с.
34. Каменский В.Б. Причины роста бокового износа рельсов / В.Б. Каменский // «Путь и путевое хозяйство». – 2003. – № 11. – С. 5-8.
35. Каменский В.Б. Периодичность контроля рельсов / В.Б. Каменский // «Путь и путевое хозяйство». – 2006. – № 12. – С. 12-16.
36. Каменский В.Б. Оценка действующего регламента замены острodefектных рельсов / В.Б. Каменский // «В мире неразрушающего контроля». – 2003. – №2. – С. 64-66.
37. Каменский В.Б. Оценка действующего регламента замены острodefектных рельсов / В.Б. Каменский // Железнодорожный транспорт. Серия «Путь и путевое хозяйство» ЭИ/ЦНИИТЭИ МПС. – 2002. – №4. – С. 39-45.
38. Каменский В.Б. Система ведения путевого хозяйства нуждается в корректировке / В.Б. Каменский // «Путь и путевое хозяйство». – 2004. – № 10. – С. 22-23.
39. Каменский В.Б. Прогноз условий путевых работ до 2010 года / В.Б. Каменский // «Путь и путевое хозяйство». – 2005. – № 2. – С. 17-20.

40. Каменский В.Б. Каменская Г.М. Ресурсосбережение – важнейший элемент совершенствования системы ведения путевого хозяйства / В.Б. Каменский, Г.М. Каменская // Железнодорожный транспорт в РФ, СНГ и за рубежом. Об. ЦНИИТЭИ МПС. – 2000. – №27. – С. 61-81.

41. Каменский В.Б. Периодичность контроля рельсов / В.Б. Каменский // Состояние и направление развития средств дефектоскопии рельсов в условиях реформирования путевого хозяйства. – С-Пб.: ОАО «Радиоавионика». 2003.– С. 4-34.

42. Каменский В.Б. Периодичность контроля рельсов / В.Б. Каменский // «Наука и техника транспорта». – 2004. – №4. – С. 78-89.

43. Карпущенко Н.И., Котова И.А. Боковой износ рельсов и безопасность движения / Н.И. Карпущенко, И.А. Котова // «Путь и путевое хозяйство». – 2005. – № 5. – С. 9-11.

44. Карпущенко Н.И., Труханов П.С. Оценка ресурса рельсов в различных эксплуатационных условиях / Н.И. Карпущенко, П.С. Труханов // «Путь и путевое хозяйство». – 2017. – № 4. – С. 26-29.

45. Титаренко М.И. Эксплуатационная стойкость «сырых» рельсов / М.И. Титаренко // «Путь и путевое хозяйство». – 2004. – № 10. – С. 17-19.

46. Титаренко М.И. Выход рельсов с увеличением средней осевой нагрузки / М.И. Титаренко // «Путь и путевое хозяйство». – 2018. – № 5. – С. 16-18.

47. Титаренко М.И. Работа рельсов в условиях различных средних статических осевых нагрузок / М.И. Титаренко // «Вестник ВНИИЖТ». – 2018. – Т.77. № 3. – С. 172-178.

48. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике. Термины и определения

49. Замышляев, А.М. Результаты внедрения проекта УРРАН / А.М. Замышляев // Мир транспорта. – 2013. – № 1. – С. 100.

50. Замышляев, А.М. Система управления рисками / А.М. Замышляев // Мир транспорта. – 2011. – № 5. – С. 24.

51. Розенберг, Е.Н. Система КАС АНТ: задачи, возможности, перспективы развития / Е.Н. Розенберг, И.Н. Розенберг, А.М. Замышляев, Г.Б. Прошин // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 9. – С. 6.

52. Розенберг, И.Н. Создание системы АС УРРАН / И.Н. Розенберг, А.М. Замышляев, С.В. Калинин // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 10. – С. 41.
53. Гапанович, В.А. Система адаптивного управления техническим содержанием инфраструктуры железнодорожного транспорта (проект УРРАН) / В.А. Гапанович, И.Б. Шубинский, Е.Н. Розенберг, А.М. Замышляев // Надежность. – 2015. – № 2. – С. 4.
54. Гапанович В.А. Математическое и информационное обеспечение системы УРРАН / В.А. Гапанович, А.М. Замышляев, И.Б. Шубинский // Надежность. – 2013. – №1. – С. 3-11.
55. Акимов В.А. Надежность технических систем и техногенный риск: учебное пособие. / Акимов В.А., Лапин В.Л., Попов В.М., Пучков В.А., Томаков В.И., Фалеев М.И. // Изд.: Финансовый издательский дом "Деловой экспресс". – Москва. – 2002. – 368 с.
56. Кокушин Н.Н. Основы теории надежности: учебное пособие. / Н.Н. Кокушин, А.А. Тихонов, С.Г. Петров, В.Е. Головкин, И.В. Ключкин // Санкт-Петербург: ГОУВПО СПбГТУРП. – 2011. – 77 с.
57. Матвеевский В.Р. Надежность технических систем: учебное пособие. / В. Р. Матвеевский // Москва: МГИЭМ. – 2002. – 113 с.
58. Чебоксаров А.Н. Основы теории надежности и диагностика: курс лекций. / А. Н. Чебоксаров // Омск: СибАДИ. – 2012. – 77 с.
59. Марков А.А. Методология и средства ультразвукового контроля рельсов: автореферат дис. ... док. техн. наук: 05.02.11 / Марков Анатолий Аркадьевич. – Санкт-Петербург. 2003. – 40 с.
60. Антипов А.Г., Марков А.А. Новые возможности магнитодинамического метода контроля рельсов / А.Г. Антипов, А.А. Марков // «Путь и путевое хозяйство». – 2016. – № 8. – С. 27-32.
61. Мосягин В.В., Марков А.А. Ультразвуковой томограф в новом двухниточном дефектоскопе / В.В. Мосягин, А.А. Марков // «Путь и путевое хозяйство». – 2016. – № 8. – С. 33-35.

62. Антипов А.Г., Марков А.А. Оценка глубины выявления поперечных трещин магнитодинамическим методом в дефектоскопии рельсов // «Дефектоскопия». – 2014. – № 8. – С. 57-68.
63. Марков А.А., Мосягин В.В., Похоруков С.А. Обнаружение и оценка поперечных трещин под поверхностными расслоениями головки рельса // «В мире неразрушающего контроля». – 2015. – № 2. – С. 68-73.
64. Марков А.А., Максимова Е.А. Ультразвуковые и магнитные методы поиска дефектов в голове рельсов / А.А. Марков, Е.А. Максимова // «Путь и путевое хозяйство». – 2019. – № 7. – С. 13-19.
65. Марков А.А., Антипов А.Г., Максимова Е.А. Глубина обнаружения дефектов магнитным методом при скоростном контроле рельсов / А.А. Марков, А.Г. Антипов Е.А. Максимова // «Путь и путевое хозяйство». – 2019. – № 10. – С. 26-31.
66. Башкатова Л.В., Гурвич А.К., Лохач А.В., Марков А.А. Компьютеризированные средства неразрушающего контроля и диагностики железнодорожного пути. – С-Пб.: Радиоавионика, 1997. – 118 с.
67. Track Safety Standards, Part 213, Subpart A to F, Class of Track 1-5. Department of Transportation Federal Railroad Administration. 199. p. 74.
68. Palese J. W., Zarembski A.M. Ultrasonic Rail Test Scheduling on BNSF. Railway Track and Structures, 2001. vol. 2. pp. 16-21.
69. Risk Based Ultrasonic Rail Test Scheduling on Burlington Northern Sante Fe. The Permanent Way Institution, 2001, p. 119.
70. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 г. №3363-р.
71. В Москве построят 39 станций метро к 2033 году [Электронный ресурс] // Московский транспорт. – Режим доступа: <https://www.rbc.ru/rbcfreeneews/650021599a7947efec006aa3> (Дата обращения 2023.09.19).

72. Главатских В.А., Молчанов В.С. Строительство метрополитенов: учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта. / под ред. В.А. Главатских. – М.: Маршрут, 2006. – 680 с.

73. Основные решения и история проектирования Московского метрополитена [Электронный ресурс] // Московское метро. – Режим доступа: <https://nashemetro.ru/history/proj1/> (Дата обращения 2019.02.08).

74. Лиманов Ю.А. Метрополитены: учебник. / Ю.А. Лиманов. – М.: Транспорт, 1971. – 360 с.

75. Московский метрополитен в цифрах. [Электронный ресурс] // Московский метрополитен. – Режим доступа: <https://www.mosmetro.ru/press/digits> (Дата обращения 2019.02.08).

76. Статистика Московского транспорта [Электронный ресурс] // Управление Федеральной службы государственной статистики по г. Москве и Московской области. – Режим доступа: <https://mosstat.gks.ru/folder/64634> (Дата обращения 2019.02.08).

77. Подразделения Московского метрополитена [Электронный ресурс] // Московский метрополитен. – Режим доступа: <https://gur.mosmetro.ru/podrazdeleniya/4/> (Дата обращения 2019.02.08).

78. Броничев С.А., Кива М.Н., Шевелёв М.В. Актуализация строительных норм и правил на метрополитене / С.А. Броничев, М.Н. Кива, М.В. Шевелёв // «Путь и путевое хозяйство». – 2016. – № 10. – С. 31-33.

79. Приложение к постановлению Правительства Москвы от 28 апреля 2020 г. № 468-ПП «Об утверждении Правил технической эксплуатации метрополитена в городе Москве» «Правила технической эксплуатации метрополитена в городе Москве». Документ зарегистрирован № 17-08-115/20 от 29.04.2020 (Управление транспорта и дорожно-транспортной инфраструктуры).

80. Погосян Д.А. Повышение эксплуатационной надежности подрельсового основания пути метрополитена на основе анализа геометрии рельсовой колеи: дис. ... канд. техн. наук: 2.9.2. / Погосян Давид Арменович. – Москва. – 2021. – 208 с.

81. Рейхарт В.А. Надежность рельсов с трещинами / В.А. Рейхарт // «Путь и путевое хозяйство». – 2006. – № 1. – С. 12-15.
82. Козырев А.И. Истинные причины волнообразных неровностей/ А.И. Козырев // «Путь и путевое хозяйство». – 2003. – № 9. – С. 26-28.
83. Козырев А.И. От чего зависят короткие непрерывные неровности на рельсах/ А.И. Козырев // «Путь и путевое хозяйство». – 2003. – № 11. – С. 11-14.
84. Ахметзянов М.Х. О механизме развития контактно-усталостных повреждений в рельсах / М.Х. Ахметзянов // «Вестник ВНИИЖТ». – 2003. – № 2. – С. 41-45.
85. Мирошников Д.Н. Организация неразрушающего контроля рельсов / Д.Н. Мирошников// «Путь и путевое хозяйство». – 2000. – № 8. – С. 32-33.
86. Шилов М.Н. Регистратор сигналов сплошного контроля рельсов / М.Н. Шилов // «Путь и путевое хозяйство». – 2002. – № 11. – С. 12-16.
87. Воробьев В.Н. Надежная дефектоскопия – гарантия безопасности/ В.Н. Воробьев // «Путь и путевое хозяйство». – 2003. – № 11. – С. 2-4.
88. Молотков С.Л. Актуальные проблемы вторичного контроля рельсов / С.Л. Молотков // «Путь и путевое хозяйство». – 2016. – № 10. – С. 8-15.
89. Яблонский А.Н., Сокуров Д.В. Видеорегистрация в рельсовом хозяйстве – шаг в будущее / А.Н. Яблонский, Д.В. Сокуров // «Путь и путевое хозяйство». – 2017. – № 2. – С. 34-35.
90. Railway Track and Srtuct, 1978, vol. 12.
91. Railway Track and Srtuct., 1979, vol. 2.
92. Bull. AREA, vol. 673.
93. Майкл Д., Виллем Эберсён. Обеспечение оптимальных условий работы колеса и рельса. В кн.: Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса. Пер. с англ. С.М. Захарова. – М.: Интекст, 2002. – 408 с.
94. Нормативно-техническая документация метрополитена НТД/М-2019 «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов для метрополитена». Утв. 14.08.2019 УД-08-10350 19.

95. Инструкция по текущему содержанию пути и контактного рельса Московского метрополитена. Разработано АО «ВНИИЖТ». Утв. Д. А. Дощатовым (ГУП «Московский метрополитен»). – М. – 2018. – 337 с.

96. Инструкция «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и острodefектных рельсов». Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 23.10.2014 №2499р.

97. Лисицын А.И., Кузнецов И.А., Мартьянов Ю.А. Анализ эксплуатации рельсов на сети дорог России и перспективы повышения их надежности / А.И. Лисицын, И.А. Кузнецов, Ю.А. Мартьянов // «Путь и путевое хозяйство». – 2016. – № 12. – С. 6-8.

98. Богданов О.К., Ноздрачев Г.С. Анализ статистики ОДР с дефектом 21 / О.К. Богданов, Г.С. Ноздрачев // «Путь и путевое хозяйство». – 2017. – № 2. – С. 26-33.

99. Положение о проведении планово-предупредительного ремонта верхнего строения пути, контактного рельса и земляного полотна метрополитена. – 2000. – 40 с.

100. Правила назначения ремонтов железнодорожного пути. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 17.12.2021 г. №2888/р.

101. Яковлева Т.Г. Карпущенко Н.И., Клинов С.И., Путря Н.Н., Смирнов М.П. Железнодорожный путь / под. ред. Т.Г. Яковлевой 2-е изд., с измен. и дополн. – М.: Транспорт, 2001. – 407 с.

102. Труханов П.С. Обоснование рациональных параметров жизненного цикла верхнего строения пути с оценкой его надежности в сложных эксплуатационных условиях: автореферат дис. ... кан. техн. наук: 05.23.11 / Труханов Павел Станиславович. – Новосибирск. 2018. – 24 с.

103. Бельтюков В.П. Оптимизация системы содержания верхнего строения железнодорожного пути: дис. ... док. техн. наук: 05.22.06 / Бельтюков Владимир Петрович. – Санкт-Петербург. 2018. – 318 с.

104. Симонюк И.А. Прогнозирование интенсивности накопления остаточных деформация верхнего строения железнодорожного пути для

среднесрочного планирования путевых работ: дис. ... кан. техн. наук: 05.22.06 / Симонюк Иван Андреевич. – Санкт-Петербург. 2014. – 147 с.

105. Рельсовая дефектоскопия. [Электронный ресурс] // ЖД-Справочник, база знаний железнодорожника. – Режим доступа: https://wikirail.ru/wiki/Рельсовая_дефектоскопия (Дата обращения 2020.05.16).

106. Положение о системе неразрушающего контроля рельсов и эксплуатации средств рельсовой дефектоскопии в путевом хозяйстве железных дорог ОАО «РЖД». Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 26.07.2017 №1471р.

107. Вагон-дефектоскоп. [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/Вагон-дефектоскоп> (Дата обращения 2020.05.18).

108. Инновационный поезд-лаборатория «Синегрия-2». [Электронный ресурс] // Московский транспорт. – Режим доступа: https://transport.mos.ru/mostrans/all_news/2982 (Дата обращения 2020.05.18).

109. Официальный сайт научно-производственного предприятия РДМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rdm.md/> (Дата обращения 2020.05.18).

110. Рельсовая продукция. [Электронный ресурс] // Челябинский металлургический комбинат. – Режим доступа: https://mechel.ru/sector/steel/chelyabinskiy-metallurgicheskiy-kombinat/production/relsovaya_produktsiya_profili/ (Дата обращения 2020.04.28).

111. Рельсовая продукция. [Электронный ресурс] // ЕВРАЗ. – Режим доступа: https://www.evraz.com/ru/products/steel/rails/#relsy_zheleznodorozhnye_shirokoy_kol_ei_r50_r65_netermouprochnyennye-1 (Дата обращения 2020.04.28).

112. ГОСТ Р 51685-2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 101 с.

113. Методика расчета показателей надежности и безопасности функционирования верхнего строения пути. Утв. распоряжением ОАО "РЖД" от 04.12.2017 № 2500р.

114. Семёнов Е.В. Анализ удельного выхода рельсов в Московском метрополитене / Е.В. Семёнов // Путь и путевое хозяйство. – 2020. – № 5. – С. 10-12.
115. Семёнов Е.В. Выход рельсов в Московском метрополитене / Е.В. Семёнов // Путь и путевое хозяйство. – 2022. – № 3. – С. 10-12.
116. Положение о системе ведения путевого хозяйства ОАО «РЖД». Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 31.10.2015 №3212р.
117. Артамонова Е.Н., Соппротивление материалов: конспект лекций [Электронный ресурс] // Научная электронная библиотека. – Режим доступа: <https://monographies.ru/en/book/section?id=7042>. (Дата обращения 2020.08.27).
118. Виноградов В. В., Никонов А. М., Яковлева Т. Г. и др. Расчеты и проектирование железнодорожного пути: учебное пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта. / В. В. Виноградов, А. М. Никонов // М.: Маршрут, – 2003. – 486 с.
119. Щепотин Г.К. Прогнозирование отказов рельсов и аварийных ситуаций / Г.К. Щепотин // Вестник СГУПС – 2019. – №4(51). – С. 5-11.
120. Тарнопольский Г.И., Шкляр В.Н. Расчеты усталостной надежности железнодорожных рельсов / Г.И. Тарнопольский, В.Н. Шкляр // Механика деформируемого тела и расчет транспортных сооружений. Новосибирск, – 1970. – С. 165-169.
121. Тарнопольский Г.И., Сухов И.Ф. Анализ усталостной надежности железнодорожных рельсов на основе модели распределения Вейбулла / Г.И. Тарнопольский, И.Ф. Сухов // Механика деформируемого тела и расчет транспортных сооружений. Новосибирск, – 1978. – С. 80-86.
122. Щепотин Г.К. Эксплуатационная надежность железнодорожного пути / Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2008. – 144 с.
123. Вентцель Е.С. Исследование операций / М.: Сов.радио, 1972. – 552 с.
124. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической обработки наблюдений / Ю.В. Линник – М.: Физматгиз, 1958. – 334 с.
125. Коэффициент детерминации. [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа:

https://ru.wikipedia.org/wiki/Коэффициент_детерминации (Дата обращения 2020.12.03).

126. Chaddock, R.E. Principles and methods of statistics. Robert Emmet Chaddock. – Boston: Houghton Mifflin Company, 1925.

127. Дисконтированный чистый доход: индекс доходности, понятие и расчет. [Электронный ресурс] // Бизнес идеи. – Режим доступа: <https://businessman.ru/new-diskontirovannyj-chistyj-dohod-indeks-dohodnosti-ponyatie-i-raschet.html> (Дата обращения 2021.03.04).

128. Коэффициент дисконтирования. Норма дисконта. [Электронный ресурс] // Студопедия. – Режим доступа: https://studopedia.ru/9_46006_koeffitsient-diskontirovaniya-norma-diskonta.html (Дата обращения 2021.03.04).

129. Семёнов Е.В. Экономическая эффективность повышения нормативной наработки тоннажа при назначении сплошной смены рельсов в метрополитене / Е.В. Семёнов // Транспортное строительство. – 2022. – № 1. – С. 22-24.

130. D.D. Davis, M.J. Joerms, O. Orringer and R.K. «Steele The Economic Consequences of Rail Integrity» in Proceedings of the 3rd International Heavy Haul Association Conference, Vancouver, Canada, 1985.

131. Корн Г., Корн Т., Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 230 с.

132. t-критерий Стьюдента. [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/T-критерий_Стьюдента (Дата обращения 2020.12.03).

133. Митков А.Л., Кардашевский С.В. Статистические методы в сельхозмашиностроении / М.: Машиностроение, – 1978. – 360 с.

134. Критерий Граббса. [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Критерий_Граббса (Дата обращения 2020.12.03).

ПРИЛОЖЕНИЕ А**(рекомендуемое)****Программный код для нахождения принадлежности рельса к типу плана
линии и пропущенного тоннажа**

ПОИСК РАДИУСА

*Dim a**Dim b**Dim myArray()**Dim Nach_r()**Dim Radius()**Dim Nach_kriv()**Dim Rad()**Dim Dlina_r()*

'Ввод количества строк столбца "Конец рельса"

*Range("C2").Select**a = Val(ActiveCell.FormulaR1C1)*

'Ввод количества строк столбца "Радиус" и "Конец кривой"

*Range("C3").Select**b = Val(ActiveCell.FormulaR1C1)*

'Ввод массива "Начало рельса"

*myArray() = Range(Cells(6, 2), Cells(a + 5, 2))**Nach_r() = myArray()**Rad() = myArray()*

'Ввод массива длина рельса

*myArray() = Range(Cells(6, 5), Cells(a + 5, 5))**Dlina_r() = myArray()*

'Ввод массива "Радиус"

*myArray() = Range(Cells(6, 3), Cells(b + 5, 3))**Radius() = myArray()*

'Ввод массива "Начало кривой"

myArray() = Range(Cells(6, 4), Cells(b + 5, 4))

Nach_kriv() = myArray()

i = 1

j = 1

c = Nach_kriv(j, 1)

d = Radius(j, 1)

For i = 1 To a

If Nach_r(i, 1) <= Nach_kriv(j + 1, 1) Then

Rad(i, 1) = Radius(j, 1)

Else

j = j + 1

If j = b Then Exit For

Rad(i, 1) = Radius(j, 1)

If (Nach_kriv(j, 1) - Nach_r(i, 1)) < Dlina_r(i - 1, 1) / 2 Then

Rad(i - 1, 1) = Radius(j, 1)

End If

End If

Next

Range(Cells(6, 1), Cells(a + 5, 1)).Value = Rad()

'РАСЧЕТ ПРОПУЩЕННОГО ТОННАЖА

Dim god_ukl()

Dim Mesyac_ukl()

Dim god()

Dim Gruzonapr()

Dim e As Integer

Dim Prop_tonnag()

'Ввод количества строк в столбце "Год"

Range("C1").Select

```

e = Val(ActiveCell.FormulaR1C1)
'ВВОД массива "год укладки"
myArray() = Range(Cells(6, 11), Cells(a + 5, 11))
god_ukl() = myArray()
Prop_tonnag() = myArray()
'ВВОД массива "месяц укладки"
myArray() = Range(Cells(6, 10), Cells(a + 5, 10))
Mesyac_ukl() = myArray()
'ввод массива "год"
myArray() = Range(Cells(6, 7), Cells(e + 5, 7))
god() = myArray()
'ВВОД массива "грузонапряженность"
myArray() = Range(Cells(6, 8), Cells(e + 5, 8))
Gruzonapr() = myArray()
i = 1
j = 1
For i = 1 To a
Prop_tonnag(i, 1) = 0
For j = 1 To e
If god_ukl(i, 1) = god(j, 1) Then
Prop_tonnag(i, 1) = Gruzonapr(j, 1) * (13 - Mesyac_ukl(i, 1)) / 12
Else
If god_ukl(i, 1) < god(j, 1) Then
Prop_tonnag(i, 1) = Prop_tonnag(i, 1) + Gruzonapr(j, 1)
End If
End If
Next
Next
Range(Cells(6, 6), Cells(a + 5, 6)).Value = Prop_tonnag()
End Sub

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Расчет выхода рельсов по различным законам распределения

Таблица Б.1 – Расчет выхода рельсов типа Р50 по нормальному распределению

План пути	Наработка t_i , млн т брутто	Интенсивность отказов $R(t_i)$, шт./км	Вероятность отказа $F(t_i)$	Квантиль, U_p	T_{cp}	σ_t	Квантиль, U_p	Вероятность отказа $F(t_i)$	Интенсивность отказов $R(t_i)$, шт./км	Средняя ошибка прогноза, E_n	R^2
$R \leq 300$	30	0,15	0,0019	2,89	245,7	75,72	2,85	0,0022	0,18	11,5	0,991
	60	0,71	0,0089	2,37			2,45	0,0071	0,57		
	90	1,43	0,0179	2,10			2,06	0,0199	1,59		
	120	4,16	0,0520	1,63			1,66	0,0485	3,88		
	150	7,78	0,0973	1,30			1,26	0,1031	8,25		
$300 < R < 600$	42	0,06	0,0008	3,16	350	100,3	3,07	0,0011	0,09	20,3	0,925
	84	0,40	0,0050	2,58			2,65	0,0040	0,32		
	126	1,30	0,0162	2,14			2,23	0,0128	1,02		
	168	2,95	0,0368	1,79			1,81	0,0348	2,78		
	210	5,36	0,0670	1,50			1,40	0,0814	6,51		
$600 \leq R < 800$	69	0,08	0,0010	3,09	586,8	172,9	2,99	0,0014	0,11	21,4	0,924
	138	0,50	0,0063	2,50			2,60	0,0047	0,38		
	207	1,39	0,0174	2,11			2,20	0,0140	1,12		
	276	2,98	0,0372	1,78			1,80	0,0361	2,89		
	345	5,34	0,0667	1,50			1,40	0,0810	6,48		
$R \geq 800$	80	0,07	0,0009	3,13	768,6	225,1	3,06	0,0011	0,09	17,4	0,930
	160	0,32	0,0040	2,65			2,70	0,0034	0,27		
	240	0,99	0,0124	2,24			2,35	0,0094	0,75		
	320	1,87	0,0233	1,99			1,99	0,0231	1,85		
	400	3,39	0,0424	1,72			1,64	0,0508	4,06		
Прямые	94	0,07	0,0009	3,12	1037	310,4	3,04	0,0012	0,10	16,7	0,957
	188	0,33	0,0042	2,64			2,74	0,0031	0,25		
	282	0,68	0,0085	2,39			2,43	0,0075	0,60		
	376	1,31	0,0164	2,13			2,13	0,0166	1,33		
	470	2,35	0,0294	1,89			1,83	0,0339	2,71		

Таблица Б.2 – Расчет выхода рельсов типа Р50 по распределению Вейбулла

План пути	Наработка T , млн т брутто	Интенсивность отказов $R(T)$, шт./км	Вероятность отказа $F(T)$	Y	X	$b=\eta$	c	α	Вероятность отказа $F(t_i)$	Интенсивность отказов $R(t_i)$, шт./км	Средняя ошибка прогноза, E_n	R^2
$R \leq 300$	30	0,15	0,0019	-6,250	3,401	2,43	-14,63	412,8	0,0017	0,14	14,8	0,954
	60	0,71	0,0089	-4,722	4,094				0,0092	0,74		
	90	1,43	0,0179	-4,013	4,500				0,0244	1,95		
	120	4,16	0,0520	-2,929	4,787				0,0485	3,88		
	150	7,78	0,0973	-2,280	5,011				0,0820	6,56		
$300 < R < 600$	42	0,06	0,0008	-7,134	3,738	2,789	-17,6	550,3	0,0008	0,06	3,0	0,999
	84	0,40	0,0050	-5,305	4,431				0,0053	0,42		
	126	1,30	0,0162	-4,115	4,836				0,0162	1,30		
	168	2,95	0,0368	-3,283	5,124				0,0359	2,87		
	210	5,36	0,0670	-2,669	5,347				0,0658	5,27		
$600 \leq R < 800$	69	0,08	0,0010	-6,916	4,234	2,628	-18,04	957,7	0,0010	0,08	1,2	1,000
	138	0,50	0,0063	-5,066	4,927				0,0061	0,49		
	207	1,39	0,0174	-4,044	5,333				0,0177	1,42		
	276	2,98	0,0372	-3,271	5,620				0,0373	2,98		
	345	5,34	0,0667	-2,673	5,844				0,0661	5,29		
$R \geq 800$	80	0,07	0,0009	-7,049	4,382	2,437	-17,78	1474,2	0,0008	0,07	5,3	0,997
	160	0,32	0,0040	-5,518	5,075				0,0045	0,36		
	240	0,99	0,0124	-4,382	5,481				0,0119	0,95		
	320	1,87	0,0233	-3,747	5,768				0,0239	1,91		
	400	3,39	0,0424	-3,139	5,991				0,0408	3,26		
Прямые	94	0,07	0,0009	-6,997	4,543	2,12	-16,63	2551,3	0,0009	0,07	5,5	0,989
	188	0,33	0,0042	-5,475	5,236				0,0040	0,32		
	282	0,68	0,0085	-4,769	5,642				0,0093	0,75		
	376	1,31	0,0164	-4,103	5,930				0,0171	1,37		
	470	2,35	0,0294	-3,512	6,153				0,0273	2,19		

Таблица Б.3 – Расчет выхода рельсов типа Р50 по экспоненциальному распределению

План пути	Наработка T , млн т брутто	Интенсивность отказов $R(T)$, шт./км	Вероятность отказа $F(T)$	a	b	Вероятность отказа $F(t_i)$	Интенсивность отказов $R(t_i)$, шт./км	Средняя ошибка прогноза, E_n	R^2
$R \leq 300$	30	0,15	0,0019	0,17560	0,02539	0,0047	0,38	38,2	0,990
	60	0,71	0,0089			0,0101	0,81		
	90	1,43	0,0179			0,0216	1,73		
	120	4,16	0,0520			0,0462	3,70		
	150	7,78	0,0973			0,0990	7,92		
$300 < R < 600$	42	0,06	0,0008	0,14630	0,01724	0,0038	0,30	88,7	0,989
	84	0,40	0,0050			0,0078	0,62		
	126	1,30	0,0162			0,0161	1,28		
	168	2,95	0,0368			0,0331	2,65		
	210	5,36	0,0670			0,0683	5,46		
$600 \leq R < 800$	69	0,08	0,0010	0,168	0,01009	0,0042	0,34	74,2	0,990
	138	0,50	0,0063			0,0084	0,67		
	207	1,39	0,0174			0,0169	1,35		
	276	2,98	0,0372			0,0339	2,71		
	345	5,34	0,0667			0,0680	5,44		
$R \geq 800$	80	0,07	0,0009	0,116	0,008475	0,0029	0,23	57,8	0,990
	160	0,32	0,0040			0,0056	0,45		
	240	0,99	0,0124			0,0111	0,89		
	320	1,87	0,0233			0,0219	1,75		
	400	3,39	0,0424			0,0431	3,45		
Прямые	94	0,07	0,0009	0,0921	0,006922	0,0022	0,18	30,6	0,995
	188	0,33	0,0042			0,0042	0,34		
	282	0,68	0,0085			0,0081	0,65		
	376	1,31	0,0164			0,0155	1,24		
	470	2,35	0,0294			0,0298	2,38		

Таблица Б.4 – Расчет выхода рельсов типа Р50 по степенному распределению

План пути	Наработка T , млн т брутто	Интенсивность отказов $R(T)$, шт./км	Вероятность отказа $F(T)$	a	b	Вероятность отказа $F(t_i)$	Интенсивность отказов $R(t_i)$, шт./км	Средняя ошибка прогноза, E_n	R^2
$R \leq 300$	30	0,15	0,0019	2,53E-06	2,982	0,0008	0,06	21,9	0,996
	60	0,71	0,0089			0,0063	0,51		
	90	1,43	0,0179			0,0212	1,70		
	120	4,16	0,0520			0,0501	4,01		
	150	7,78	0,0973			0,0975	7,80		
$300 < R < 600$	42	0,06	0,0008	2,14E-06	2,756	0,0008	0,06	2,3	1,000
	84	0,40	0,0050			0,0054	0,43		
	126	1,30	0,0162			0,0164	1,31		
	168	2,95	0,0368			0,0363	2,90		
	210	5,36	0,0670			0,0671	5,37		
$600 \leq R < 800$	69	0,08	0,0010	1,23E-06	2,616	0,0010	0,08	1,0	1,000
	138	0,50	0,0063			0,0061	0,49		
	207	1,39	0,0174			0,0175	1,40		
	276	2,98	0,0372			0,0372	2,98		
	345	5,34	0,0667			0,0667	5,33		
$R \geq 800$	80	0,07	0,0009	9,53E-07	2,517	0,0007	0,06	6,0	0,999
	160	0,32	0,0040			0,0042	0,34		
	240	0,99	0,0124			0,0117	0,93		
	320	1,87	0,0233			0,0241	1,92		
	400	3,39	0,0424			0,0422	3,38		
Прямые	94	0,07	0,0009	9,43E-07	2,392	0,0006	0,05	12,3	0,997
	188	0,33	0,0042			0,0032	0,26		
	282	0,68	0,0085			0,0086	0,68		
	376	1,31	0,0164			0,0170	1,36		
	470	2,35	0,0294			0,0290	2,32		

Таблица Б.5 – Расчет выхода рельсов типа Р65 по нормальному распределению

План пути	Наработка t_i , млн т брутто	Интенсивность отказов $R(t_i)$, шт./км	Вероятность отказа $F(t_i)$	Квантиль, U_p	T_{cp}	σ_t	Квантиль, U_p	Вероятность отказа $F(t_i)$	Интенсивность отказов $R(t_i)$, шт./км	Средняя ошибка прогноза, E_n	R^2
$R \leq 300$	45	0,51	0,0064	2,49	475,3	169,1	2,54	0,0055	0,44	9,5	0,993
	90	0,81	0,0101	2,32			2,28	0,0113	0,91		
	135	1,59	0,0198	2,06			2,01	0,0221	1,77		
	180	3,51	0,0439	1,71			1,75	0,0404	3,23		
	225	5,52	0,0691	1,48			1,48	0,0694	5,55		
$300 < R < 600$	63	0,14	0,0018	2,92	691,4	218,7	2,87	0,0020	0,16	11,7	0,949
	126	0,41	0,0051	2,57			2,59	0,0049	0,39		
	189	1,09	0,0136	2,21			2,30	0,0108	0,86		
	252	1,81	0,0227	2,00			2,01	0,0223	1,78		
	315	2,95	0,0369	1,79			1,72	0,0426	3,41		
$R \geq 600$	90	0,13	0,0017	2,94	1098	348,2	2,89	0,0019	0,15	10,0	0,972
	180	0,37	0,0046	2,60			2,64	0,0042	0,34		
	270	0,77	0,0097	2,34			2,38	0,0087	0,70		
	360	1,44	0,0180	2,10			2,12	0,0170	1,36		
	450	2,24	0,0281	1,91			1,86	0,0314	2,51		
Прямые	104	0,13	0,0016	2,94	1279	405,3	2,90	0,0019	0,15	11,4	0,962
	208	0,35	0,0044	2,62			2,64	0,0041	0,33		
	312	0,85	0,0107	2,30			2,39	0,0085	0,68		
	416	1,29	0,0161	2,14			2,13	0,0166	1,33		
	520	2,18	0,0273	1,92			1,87	0,0306	2,44		

Таблица Б.6 – Расчет выхода рельсов типа Р65 по распределению Вейбулла

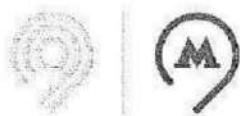
План пути	Наработка T , млн т брутто	Интенсивность отказов $R(T)$, шт./км	Вероятность отказа $F(T)$	Y	X	$b=\eta$	c	α	Вероятность отказа $F(t_i)$	Интенсивность отказов $R(t_i)$, шт./км	Средняя ошибка прогноза, E_n	R^2
$R \leq 300$	45	0,51	0,0064	-5,046	3,807	1,51	-11,06	1495,1	0,0050	0,40	24,6	0,906
	90	0,81	0,0101	-4,594	4,500				0,0141	1,13		
	135	1,59	0,0198	-3,910	4,905				0,0260	2,08		
	180	3,51	0,0439	-3,104	5,193				0,0398	3,19		
	225	5,52	0,0691	-2,637	5,416				0,0554	4,43		
$300 < R < 600$	63	0,14	0,0018	-6,345	4,143	1,923	-14,4	1787,0	0,0016	0,13	7,3	0,994
	126	0,41	0,0051	-5,277	4,836				0,0061	0,49		
	189	1,09	0,0136	-4,293	5,242				0,0132	1,06		
	252	1,81	0,0227	-3,775	5,529				0,0229	1,83		
	315	2,95	0,0369	-3,282	5,753				0,0349	2,79		
$R \geq 600$	90	0,13	0,0017	-6,396	4,500	1,766	-14,43	3536,9	0,0015	0,12	8,1	0,987
	180	0,37	0,0046	-5,378	5,193				0,0052	0,41		
	270	0,77	0,0097	-4,632	5,598				0,0106	0,85		
	360	1,44	0,0180	-4,009	5,886				0,0175	1,40		
	450	2,24	0,0281	-3,559	6,109				0,0259	2,07		
Прямые	104	0,13	0,0016	-6,421	4,644	1,756	-14,65	4199,9	0,0015	0,12	7,8	0,986
	208	0,35	0,0044	-5,422	5,338				0,0051	0,41		
	312	0,85	0,0107	-4,536	5,743				0,0104	0,83		
	416	1,29	0,0161	-4,119	6,031				0,0171	1,37		
	520	2,18	0,0273	-3,588	6,254				0,0252	2,02		

Таблица Б.7 – Расчет выхода рельсов типа Р65 по экспоненциальному распределению

План пути	Наработка T , млн т брутто	Интенсивность отказов $R(T)$, шт./км	Вероятность отказа $F(T)$	a	b	Вероятность отказа $F(t_i)$	Интенсивность отказов $R(t_i)$, шт./км	Средняя ошибка прогноза, E_n	R^2
$R \leq 300$	45	0,51	0,0064	0,28480	0,01329	0,0065	0,52	7,9	0,988
	90	0,81	0,0101			0,0118	0,94		
	135	1,59	0,0198			0,0214	1,71		
	180	3,51	0,0439			0,0389	3,12		
	225	5,52	0,0691			0,0708	5,66		
$300 < R < 600$	63	0,14	0,0018	1,63E-01	0,009272	0,0037	0,29	27,2	0,994
	126	0,41	0,0051			0,0065	0,52		
	189	1,09	0,0136			0,0117	0,94		
	252	1,81	0,0227			0,0211	1,69		
	315	2,95	0,0369			0,0378	3,02		
$R \geq 600$	90	0,13	0,0017	1,32E-01	0,006363	0,0029	0,23	18,7	0,989
	180	0,37	0,0046			0,0052	0,41		
	270	0,77	0,0097			0,0092	0,73		
	360	1,44	0,0180			0,0163	1,30		
	450	2,24	0,0281			0,0289	2,31		
Прямые	104	0,13	0,0016	1,30E-01	0,005453	0,0029	0,23	22,3	0,854
	208	0,35	0,0044			0,0051	0,40		
	312	0,85	0,0107			0,0089	0,71		
	416	1,29	0,0161			0,0157	1,26		
	520	2,18	0,0273			0,0277	2,22		

Таблица Б.8 – Расчет выхода рельсов типа Р65 по степенному распределению

План пути	Наработка T , млн т брутто	Интенсивность отказов $R(T)$, шт./км	Вероятность отказа $F(T)$	a	b	Вероятность отказа $F(t_i)$	Интенсивность отказов $R(t_i)$, шт./км	Средняя ошибка прогноза, E_n	R^2
$R \leq 300$	45	0,51	0,0064	0,00004	2,18	0,0021	0,17	18,4	0,989
	90	0,81	0,0101			0,0094	0,75		
	135	1,59	0,0198			0,0227	1,82		
	180	3,51	0,0439			0,0425	3,40		
	225	5,52	0,0691			0,0691	5,53		
$300 < R < 600$	63	0,14	0,0018	2,22E-05	2,05	0,0014	0,11	9,9	0,946
	126	0,41	0,0051			0,0056	0,45		
	189	1,09	0,0136			0,0129	1,03		
	252	1,81	0,0227			0,0233	1,86		
	315	2,95	0,0369			0,0367	2,94		
$R \geq 600$	90	0,13	0,0017	1,07E-05	2,006	0,0011	0,09	9,4	0,963
	180	0,37	0,0046			0,0045	0,36		
	270	0,77	0,0097			0,0101	0,81		
	360	1,44	0,0180			0,0179	1,43		
	450	2,24	0,0281			0,0280	2,24		
Прямые	104	0,13	0,0016	1,04E-05	1,956	0,0011	0,09	9,4	0,996
	208	0,35	0,0044			0,0045	0,36		
	312	0,85	0,0107			0,0099	0,79		
	416	1,29	0,0161			0,0173	1,38		
	520	2,18	0,0273			0,0268	2,14		

ПРИЛОЖЕНИЕ В**(обязательное)****Протокол совещания начальника Службы пути и искусственных сооружений
Дирекции инфраструктуры ГУП «Московский метрополитен» № П-01-03/37****от 31.03.21 г.****Протокол**

совещания начальника Службы
пути и искусственных сооружений
Дирекции инфраструктуры
Д.В. Шумного

от 31.03.2021 № П-01-03/37

Присутствовали:

Главный инженер Службы	– Зимин А.Б.
Заместитель начальника Службы	– Митрясов Д.В.
Начальник Производственно-технического отдела Службы	– Крикун А.В.
Заместитель начальника 6 дистанции Службы	– Суханов С.А.
Главный инженер 7 дистанции Службы	– Овчинников К.В.
Помощник мастера 6 дистанции Службы, аспирант ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)	– Погосян Д.А.
Кандидат технических наук ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)	– Замуховский А.В.
Аспирант ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)	– Семёнов Е.В.

I. О повышении эксплуатационной надежности подрельсового основания пути метрополитена на основе анализа геометрии рельсовой колеи и повышении эффективности рельсового хозяйства

(все присутствующие)

31.03.2021 состоялось совещание под председательством начальника Службы пути и искусственных сооружений Дирекции инфраструктуры (далее – Служба) по рассмотрению научных работ по темам «Повышение эксплуатационной надежности подрельсового основания пути метрополитена на основе анализа геометрии рельсовой колеи» (далее – ГРК) и «Повышение эффективности рельсового хозяйства метрополитена».

В ходе совещания был заслушан доклад помощника мастера 6 дистанции Службы, аспиранта ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ) Погосяна Д.А. о повышении эксплуатационной надежности подрельсового основания пути метрополитена на основе анализа геометрии рельсовой колеи (далее – ГРК). Также были рассмотрены методика для определения показателей надежности конструкций

пути метрополитена на основе данных о состоянии ГРК и методика рационального распределения контингента работников эксплуатационных подразделений в зависимости от состояния ГРК на обслуживаемых участках пути.

В ходе совещания был заслушан доклад аспиранта ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ) Семёнова Е.В. о повышении эффективности рельсового хозяйства Московского метрополитена за счет мониторинга обнаружения (замены) дефектных рельсов и прогноза интенсивности их образования.

II. Решения

В ходе совещания были приняты следующие решения:

1. Принять к сведению доклад Погосьяна Д.А. на тему: «Повышение эксплуатационной надежности подрельсового основания пути метрополитена на основе анализа геометрии рельсовой колеи».

2. Отметить, что предложенный подход, основанный на «Методике расчета показателей надежности и безопасности функционирования верхнего строения пути», являющаяся поддерживающим документом концепции УРРАН (Управление надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте) ОАО «РЖД». Принципы определения показателей надежности в методике соответствуют правилам, установленным ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике. Термины и определения» и ГОСТ 33886-2016 «Железнодорожный путь. Номенклатура показателей надежности и функциональной безопасности».

Из множества показателей надежности, принятых в концепции УРРАН, в исследовании определены наиболее значимые для метрополитена показатели, представленные показатели безотказности, ремонтпригодности, готовности и функциональной безопасности. В исследовании в качестве «отказа» принято единичное отступление от норм содержания ГРК, определяемое действующими на метрополитене нормативно-техническими документами. При этом в исследовании принята гипотеза о том, что ГРК напрямую зависит от состояния подрельсового основания (элементов промежуточных рельсовых скреплений, подрельсовых опор и их оснований). Отказы рельсов, как элемента железнодорожного пути, не учитываются.

Разработан научно-обоснованный подход к определению участков железнодорожного пути метрополитена для проведения адресных (локальных) ремонтных работ. На его основе возможно определение и ранжирование участков пути, нуждающихся в первоочередном ремонте, в целях повышения

уровня обеспечения безопасности движения поездов и компенсации отсутствия капитальных ремонтных работ.

Показана возможность рационального распределения контингента работников эксплуатационных дистанций пути, в зависимости от фактического состояния ГРК и типа конструкции на обслуживаемых участках.

3. Рекомендовать при доработке методики для опытного применения на дистанции пути метрополитена ввести показатели текущего содержания геометрии контактного рельса и выхода отдельных элементов верхнего строения пути (за исключением рельсов).

4. Принять к сведению доклад Семёнова Е.В. на тему: «Повышение эффективности рельсового хозяйства метрополитена».

5. Отметить, что выполненный анализ замененных дефектных рельсов за 2017-2020 гг. позволяет сделать достоверный прогноз (степень достоверности – 95 %, при сверхнормативной наработке тоннажа до 40 %).

Отметить, что принятый в работе подход позволяет существенно продлить жизненный цикл рельсов в прямых и пологих кривых.

6. Рекомендовать продолжить исследования и анализ дефектности рельсов в Московском метрополитене с разработкой методики прогноза интенсивности выхода рельсов по дефектам, методики назначения периодичности неразрушающего контроля рельсов мобильными и съемными дефектоскопными средствами.

7. Считать целесообразным рассмотреть возможность изменения нормативных наработок рельсов в зависимости от марки и категории качества на основе мониторинга их дефектности.

Начальник Службы



Д.В. Шумный