

На правах рукописи



Семёнов Евгений Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЛЬСОВОГО ХОЗЯЙСТВА
В МОСКОВСКОМ МЕТРОПОЛИТЕНЕ**

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2024

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
Замуховский Александр Владимирович

Официальные оппоненты: **Краснов Олег Геннадьевич,**
доктор технических наук,
акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), отдел пути и специального подвижного состава, заведующий

Абдурашитов Анатолий Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент,
проектно-конструкторское бюро по инфраструктуре – филиал ОАО «РЖД» (ПКБ И),
отдел рельсов, начальник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Защита состоится «16» мая 2024 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета 40.2.002.03 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 (ул. Часовая, д. 22/2, стр. 1, ауд. 329).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.rut-miit.ru.

Автореферат разослан «___» марта 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Гринь Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 и К.Ю. Цеглинский. Также, стоит сказать о выдающемся отечественном ученом Г.М. Шахунянце, который провел исследования в области обоснования срока службы железнодорожных рельсов. 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. 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, который занимается совершенствованием системы рельсового хозяйства.

Кроме того, стоит упомянуть профессора А.Я. Когана, 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.

Стоит отметить работы А.Ю. Абдурашитова по прочности и трещиностойкости рельсов, системе ведения путевого хозяйства и повышению надежности рельсов.

Большое количество исследований дефектов рельсов провели А.И. Борц и К.Л. Заграничек.

Значительный вклад в совершенствование путевого хозяйства, в том числе в области статистического анализа рельсового хозяйства и вопросах дефектоскопии внес В.Б. Каменский. Статистическим анализом рельсового хозяйства также занимались такие ученые, как Н.И. Карпущенко и М.И. Титаренко.

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

Фундаментальные труды по определению эксплуатационной надежности технических систем принадлежат В.А. Акимову, А.А. Кокушину, В.Р. Матвеевскому, А.Н. Чебоксарову.

Переходя к вопросам дефектоскопии рельсов, стоит выделить такого ученого как А.А. Марков, 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.

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 (Р50 или Р65);
- 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).

Диссертационная работа на основе докладов была одобрена на заседании кафедры «Путь и путевое хозяйство», РУТ (МИИТ), 13.11.2023 г.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложения. Работа изложена на 153 страницах машинописного текста, в том числе 39 таблиц, 54 рисунка. Список литературы насчитывает 134 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна. Определена

теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования.

В первой главе приведен обзор рельсового хозяйства метрополитена, под которым подразумевают: непосредственно рельсы, лежащие в пути; причины и интенсивность возникновения отказов рельсов; вопросы дефектоскопии. Кроме того, выполнен анализ отечественных и зарубежных исследований в области рельсового хозяйства железных дорог.

Также в главе представлен анализ нормативно-технической базы рельсового хозяйства метрополитена и её сравнение с нормативно-технической базой железных дорог общего пользования, который показывает схожесть классификации дефектов рельсов. Следует отметить, 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, в то время как на дорогах общего пользования дефектные рельсы могут лежать в пути более продолжительное время. В связи с малым периодом времени между обнаружением дефектного рельса и его заменой, остродефектные рельсы в метрополитене практически не фиксируются (их суммарное количество за анализируемый период с 2014 по 2019 годы – 5 шт.), а число замененных рельсов за 2019 год – 554 шт., что составляет 1,0 % от общего числа рельсов, лежащих в пути.

Кроме того, за этот же временной период был выполнен анализ выхода рельсов по коду дефекта (рисунок 1).

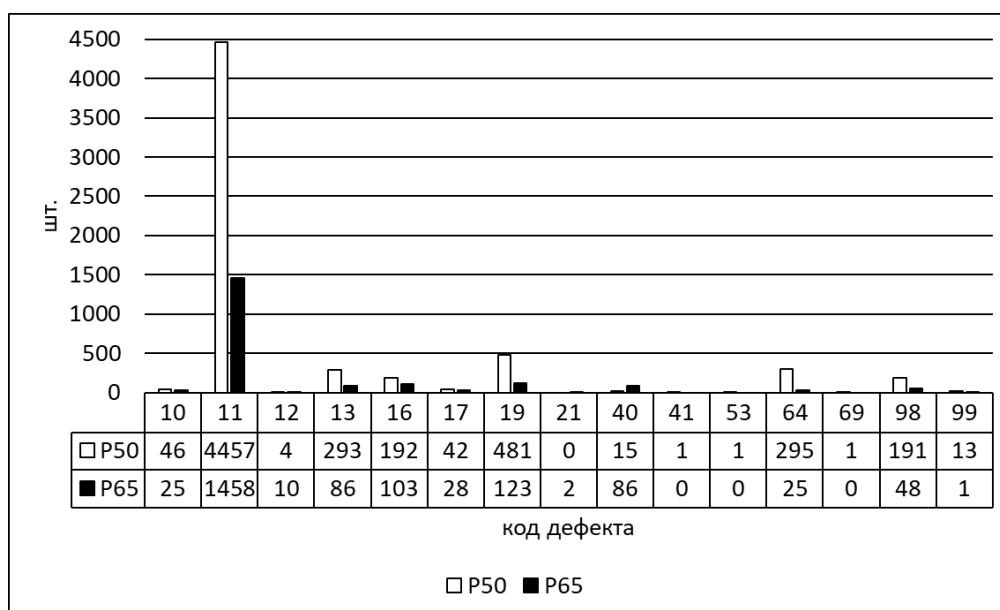


Рисунок 1 – Распределение рельсов по коду дефекта

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 в то время, как на железных дорогах общего пользования в период с 2019 по 2022 годы – 49,0 %.

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, что существенно меньше, чем на железных дорогах общего пользования, где это значение составляет 32,0 %.

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 в метрополитене – первая (трещины и выкрашивания металла на поверхности катания головки рельса).

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 зависит от класса пути, и для пути 1 класса он составляет 4 шт./км, для пути 2-3 класса – 6 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 звеньевоего пути. В метрополитене критерии нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов зависят от типа рельсов и плана пути и представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Действующие критерии нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов

План пути	Наработка нормативная, млн т брутто	
	P50	P65
$R \leq 300$	150	225
$300 < R < 600$	210	315
$600 \leq R < 800$	345	450
$R \geq 800$	400	
Прямые	470	520

Также, был описан и проанализирован процесс дефектоскопии рельсов в метрополитене. Ввиду отсутствия инструкции по дефектоскопии рельсов периодичность контроля установлена начальником Службы Пути и искусственных сооружений. Количество проверок зависит от грузонапряженности на участке и составляет 4 раза в месяц при грузонапряженности менее 50 млн т брутто в год и 6 раз в месяц при грузонапряженности 50 и более млн т брутто в год. Такое число проверок позволяет вовремя обнаруживать дефектные рельсы и предотвращать их развитие в остродефектные.

В ходе сравнительного анализа мест возникновения дефектов рельсов в метрополитене и на железных дорогах общего пользования в исследовании были выявлены отличия в причинах их возникновения (в метрополитене практически отсутствуют дефекты рельсов 4 группы и преобладают дефекты 1 группы), кроме того, критерии по сплошной смене рельсов в метрополитене жестче, чем железных дорогах общего пользования. Это различие связано с тем, что действующий критерий выхода рельсов для метрополитена был обоснован для незакаленных рельсов типа P50, которые при новом строительстве не используются уже около 25 лет.

Во второй главе был проведен анализ рельсового хозяйства метрополитена в период с 2014 по 2019 годы (таблица 2). Для анализа был взят весь полигон главных путей метрополитена.

Таблица 2 – 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
Р50	412,8	412,8	412,8	412,8	412,8	412,8
Р65	209,7	211,8	250,8	271,5	285,1	310,7
Протяженность в зависимости от плана пути (Р50), 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 (Р65), 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 (Р50), км:						
НТ260	412,8	412,8	412,8	412,8	412,8	412,8
Протяженность в зависимости от категории рельсов (Р65), 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
Р50	929	1840	1316	920	683	324
Р65 категории:						
НТ260	146	125	136	146	132	62
ОТ350 и ДТ350	101	307	243	235	200	168

Общая протяженность рельсов главных путей метрополитена на 2020 год составила 723,5 км. Для дальнейшего анализа весь полигон был разбит на две основные группы (по типу рельсов): Р50 и Р65. Был проведен анализ протяженности в зависимости от плана пути, соответствующего таблице 1. Из таблицы 2 видно, что протяженность прямых участков пути составляет более 60 % от общей протяженности главных путей. Следует отметить рост протяженности рельсов типа Р65, это связано с тем, что на всех новых участках укладывают рельсы этого типа.

Кроме того, был выполнен анализ изменения протяженности различных категорий рельсов по ГОСТ Р 51685-2013. Все рельсы типа Р50 уложены только

категории НТ260. Рельсы типа Р65 уложены трех категорий: НТ260 (аналог категории Н по предыдущей классификации ГОСТ), ОТ350 (аналог категории Т1 по предыдущей классификации ГОСТ) и ДТ350. Анализируя изменение протяженности полигона рельсов типа Р65 этих категорий, можно сделать вывод, что рельсы категории НТ260 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 ДТ350 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 ОТ350 – 186,0 км (59,8 % общей длины главных путей метрополитена с рельсами Р65).

Кроме того, средневзвешенный по протяженности удельный выход рельсов типа Р50 за рассматриваемый период – 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 (видом термоупрочнения).

Также, в работе выполнен анализ выхода рельсов в зависимости от выделенных выше эксплуатационных параметров в период с 2014 по 2019 годы.

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 характеристик плана пути, по которому назначается сплошная смена рельсов (см. табл. 1);
- 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.

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 (см. табл. 1) для разных типов рельсов и плана пути замененные рельсы были объединены в массивы с интервалом 20 % от значения нормативной наработки до сплошной смены рельсов. При более подробном делении возникает статистическая недостоверность данных в массивах, а при более грубом делении уменьшается точность построения кривой выхода рельсов;

- 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 и 3 представлены графики выхода рельсов типа Р50 и Р65, соответственно.

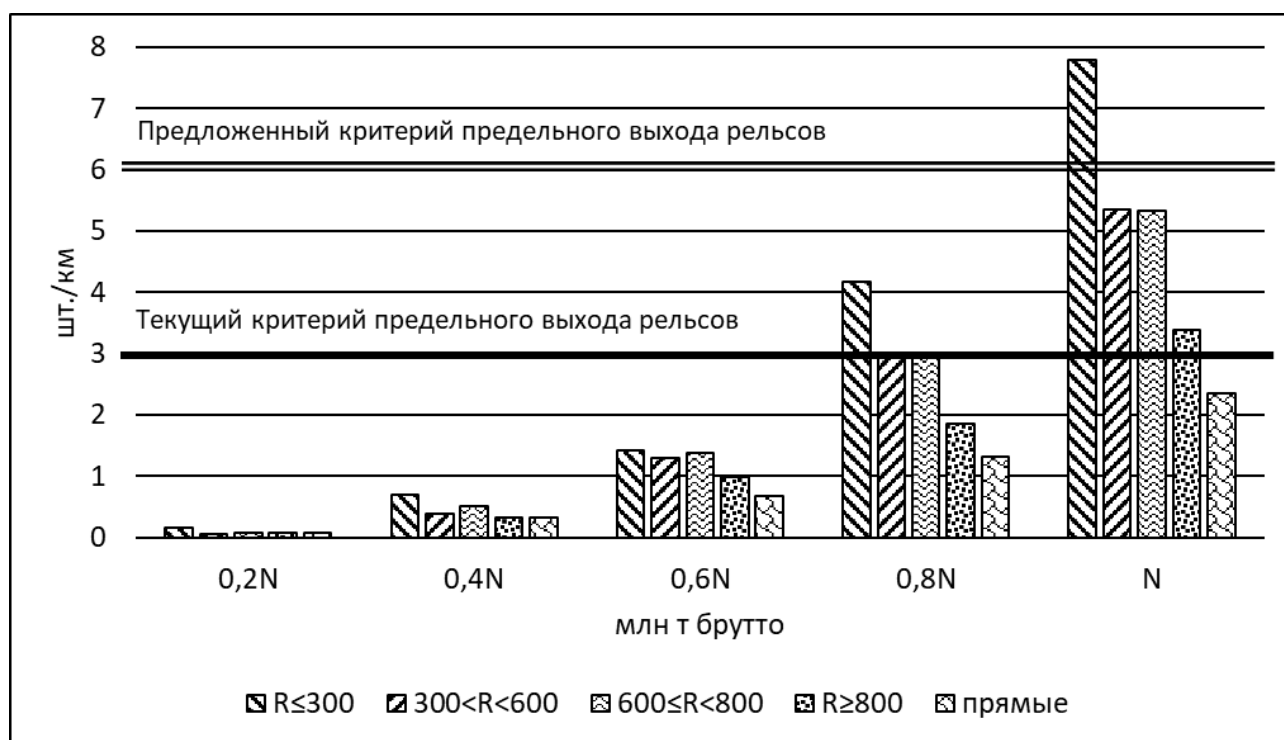


Рисунок 2 – Выход рельсов типа Р50

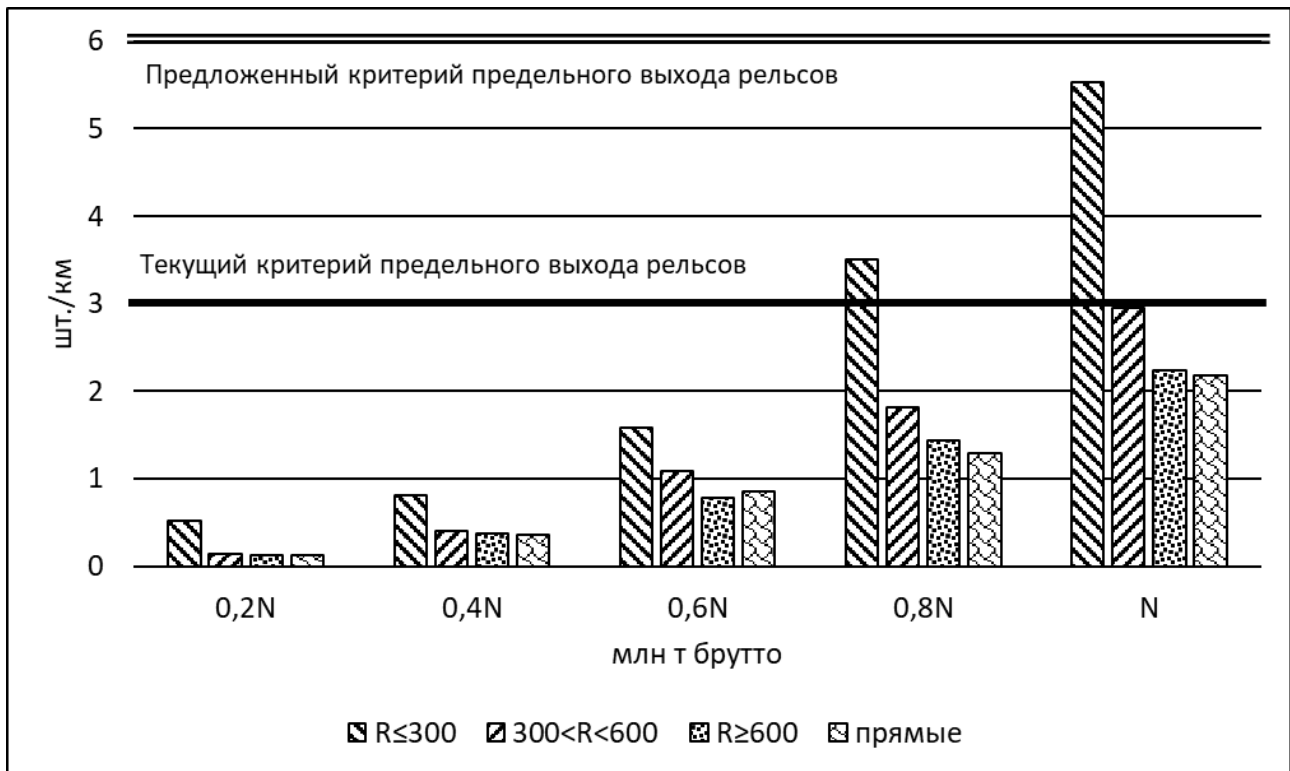


Рисунок 3 – Выход рельсов типа Р65

Из рисунков 2 и 3 видно, 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. 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.

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-км 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.

Исходя из исследования, проведенного в работе, 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.

В третьей главе приведены расчеты по прогнозированию выхода рельсов, описаны и проанализированы различные функции распределения отказов рельсов и выбрана наиболее подходящая. Приведены предложения по корректировке нормативной наработки тоннажа до сплошной смены рельсов.

Для выбора функции распределения отказов рельсов были рассмотрены наиболее подходящие законы распределения: степенное, экспоненциальное, нормальное и Вейбулла. Оценка достоверности корреляционной связи производилась с применением коэффициента детерминации R^2 .

Представленный в работе расчет показал, что рассмотренные распределения дают относительно похожие значения выхода рельсов, поэтому изначально сложно судить о том, какое распределение выбрать в качестве нулевой гипотезы. Однако, во всех диапазонах плана пути (см. табл. 1) имелись значения удельного выхода рельсов сверхнормативной наработки тоннажа ($1,2N$, в некоторых диапазонах плана – $1,4N$ и $1,6N$). При сопоставлении с ними оказалось, что экспоненциальное и нормальное распределения дают слишком «пессимистический прогноз», то есть прогнозные значения оказались существенно больше фактических. Обратная ситуация возникает при распределении Вейбулла, при котором прогнозные значения оказались ниже фактических. Наилучший прогноз значений выхода рельсов со сверхнормативной наработкой тоннажа дает степенное распределение, которое и было выбрано в качестве теоретической функции выхода рельсов.

В таблице 3 представлены результаты подбора коэффициентов степенной функции распределения выхода рельсов вида $n=a*10^{-6} \times T^b$, где T – наработка тоннажа в млн т брутто для каждого диапазона плана пути.

Таблица 3 – Коэффициенты степенной функции выхода рельсов

План пути	P50		P65	
	a	b	a	b
$R < 300$	2,53	2,98	41,2	2,18
$300 < R < 600$	2,14	2,76	22,2	2,05
$600 \leq R < 800$	1,23	2,62	11,1	2,00
$R \geq 800$	0,95	2,52		
Прямые	0,94	2,39	10,4	1,96

Из таблицы 3 видно, что коэффициенты степенной функции имеют близкие значения и хорошо коррелируют с планом пути. Исходя из предложенного предельного значения выхода рельсов $n=6$ шт./км, используя зависимости из таблицы 3 были посчитаны новые значения наработки тоннажа до сплошной смены рельсов, представленные в таблице 4.

Таблица 4 – Откорректированные значения наработки тоннажа до сплошной смены рельсов при выходе рельсов $n=6$ шт./км

План пути	Наработка предложенная, млн т брутто	
	P50	P65
$R \leq 300$	135	230
$300 < R < 600$	215	445
$600 \leq R < 800$	360	730
$R \geq 800$	500	
Прямые	700	880

Анализируя таблицы 1 и 4 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 и прямых участках пути нормативную наработку можно увеличить более, чем в 1,5 раза, обеспечивая при этом безопасность движения поездов.

Представленный в работе расчет показал, что при увеличении нормативной наработки тоннажа рельсов суммарный экономический эффект к 18-му году эксплуатации составит для рельсов типа P50 17,52 млн руб./км, для рельсов типа P65 – 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 P65 будет произведена на 18 год эксплуатации, таким образом будет завершен самый

продолжительный цикл от укладки рельсов в путь до их замены.

В четвертой главе описана 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. Г.М. Шахунянц, исследуя выход рельсов, при назначении критерия 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. Д.А. Погосян в своей диссертационной работе получил, что на работы по устранению неисправностей геометрии рельсовой колеи (далее – ГРК) на околотке бригаде требуется 16 дней в месяц. Исходя из условия, что в месяце 22 рабочих дня, можно принять, что на одиночную смену 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, равное 6 шт./км.

В третьей главе было показано, что наилучшую аппроксимацию выхода рельсов дает степенная функция. Поскольку категория рельсов типа Р50 не меняется, можно непосредственно использовать функции распределения для рельсов этого типа. 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.

Для доказательства работы предложенного алгоритма был выполнен прогноз

срока сплошной смены рельсов для имеющихся фактических данных. Например, для рельсов типа Р65 при наработке 189 млн т-км брутто ($0,6N$) в кривых $300 \leq R < 600$ прогнозируемая наработка до сплошной смены рельсов составляет 405 млн т-км брутто. Таким образом, до сплошной смены рельсов 216 млн т-км 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. Аналогичные расчеты сделаны для других диапазонов плана пути и представлены в таблице 5.

Таблица 5 – 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

Таблица рассчитана для фактических значений, полученных в работе за рассматриваемый период, которые можно обновлять по мере накопления данных о фактическом выходе рельсов на полигоне метрополитена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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) Рекомендуется 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**а) в рецензируемых научных изданиях**

1. Замуховский, А.В. Анализ удельного выхода рельсов в Московском метрополитене / А.В. Замуховский, Е.В. Семёнов // Путь и путевое хозяйство. – 2020. – № 5. – С. 10-12.

2. Семёнов, Е.В. Выход рельсов в Московском метрополитене / Е.В. Семёнов // Путь и путевое хозяйство. – 2022. – № 3. – С. 10-12.

3. 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.

б) в других изданиях и материалах конференций

1. Семёнов, Е.В. Анализ рельсового хозяйства Московского метрополитена / Е.В. Семёнов // Сборник научных статей аспирантов Института пути, строительства и сооружений Российского университета транспорта. – 2019. – С. 75-81.

2. Семёнов, Е.В. О необходимости изменения нормативов по выходу рельсов в московском метрополитене / Е.В. Семёнов // Неделя науки – 2021 (Москва, МИИТ, 2021 год) – М.: МИИТ. – 2021. – С. 89-90.

3. Семёнов, Е.В. Предложения по корректировке нормативного срока службы рельсов типа Р50 в Московском метрополитене / Е.В. Семёнов // Сборник научных статей аспирантов РУТ(МИИТ) «Аспирантские чтения». – 2021. С. 251-255.

Семёнов Евгений Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЛЬСОВОГО ХОЗЯЙСТВА
В МОСКОВСКОМ МЕТРОПОЛИТЕНЕ**

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «04» марта 2024 г.

Формат 60×90/16

Объем 1,5 усл. п.л.

Заказ № 458 от 04.03.2024 г.

Тираж 80 экз.

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

Типография Юридического института РУТ (МИИТ)