

Оригинальная статья

УДК 625.151.3

EDN: <https://elibrary.ru/pvmugq>

Обеспечение перевозочного процесса при нагрузках на стрелочные переводы, превышающих проектные и нормативные критерии

Б. Э. Глюзберг✉, М. И. Титаренко, П. В. ТрегубчакНаучно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Необходимость быстрого наращивания объемов перевозок железнодорожным транспортом обеспечивается использованием тяжеловесных поездов повышенной массы с повышенными нагрузками на ось вагонов. Возможности инфраструктуры железнодорожного транспорта не всегда позволяют осуществлять неограниченное использование такой организации движения. Замена эксплуатируемых конструкций пути на современные, предназначенные для работы в условиях обращения тяжеловесных поездов, требует значительного времени и материальных затрат. В течение этого времени перевозки должны осуществляться по существующим конструкциям пути, в том числе и по пути из рельсов легкого типа Р50. Предлагаемое вниманию читателей исследование посвящено анализу возможностей стрелочного хозяйства по обеспечению безопасного движения тяжеловесных поездов на эксплуатируемых конструкциях стрелочных переводов до их замены на специальные, предназначенные для работы в условиях тяжеловесного движения.

Материалы и методы. Работа базируется на результатах исследований напряженно-деформированного состояния основных элементов стрелочных переводов под воздействием подвижного состава с различными нагрузками на ось. Используются результаты анализа ресурсных показателей стрелочных переводов в различных условиях эксплуатации на сети дорог. При анализе влияния осевых нагрузок подвижного состава на ресурсные показатели элементов стрелочных переводов применены методы математической статистики и теории надежности.

Результаты. Получены предиктивные данные об изменении ресурса, вероятности безотказной работы и интенсивности отказов основных элементов стрелочных переводов при повышении нагрузок обращающегося по переводам подвижного состава до 25 т/ось. Разработана методика предиктивного анализа ресурсных показателей стрелочных переводов.

Обсуждение и заключение. Методика предиктивного анализа является универсальной и может быть использована для оценки влияния осевых нагрузок подвижного состава на ресурсные показатели элементов верхнего строения пути. Разработаны предложения по обеспечению безопасности движения в условиях обращения по эксплуатируемым стрелочным переводам тяжеловесных поездов. Полученные выводы целесообразно использовать при организации текущего содержания стрелочных переводов на участках, на которых планируется введение в обращение тяжеловесных поездов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный путь, стрелочные переводы, тяжеловесное движение, нагрузки на ось, предиктивный анализ, ресурсные показатели, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, безопасная эксплуатация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Глюзберг Б. Э., Титаренко М. И., Трегубчак П. В. Обеспечение перевозочного процесса при нагрузках на стрелочные переводы, превышающих проектные и нормативные критерии // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024. Т. 83, № 3. С. 205–214.

Original article

UDK 625.151.3

EDN: <https://elibrary.ru/pvmugq>



Ensuring transportation under turnout switches loads exceeding design and regulatory criteria

Boris E. Glyuzberg✉, Mikhail I. Titarenko, Pavel V. Tregubchak

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The need to rapidly increase the volume of railway transport is ensured by the use of heavy-load trains of increased weight and higher carriage axle loads. The capacity of the railway infrastructure does not always allow for unlimited use of such traffic organisation. Replacement of the existing track structures with modern ones designed for operation under heavy-load trains requires considerable time and material costs. During this time transportation has to continue on existing track structures, including the R50 light rail tracks. This research examines the capacity of switch economy in terms of safe movement of heavy-load trains on operated turnout switches before they are replaced by special ones designed for heavy-load traffic.

Materials and methods. The paper is based on the results of research of stress-deformation state of the main elements of turnout switches affected by rolling stock with different axle loads. It also uses the results of analysis of resource indicators of turnouts under different operating conditions on the road network. The analysis of the influence of rolling stock axle loads on the service life indicators of turnout switches elements applied the methods of mathematical statistics and reliability theory.

Results. The authors obtained predictive data on the service life trends, failure-free operation likelihood and failure rate of the main elements of turnout switches with an increase in the loads of rolling stock circulating on the turnout switches up to 25 t/axle. The researchers developed a method of predictive analysis of turnout switches service life indicators.

Discussion and conclusion. The predictive analysis is versatile and could be used for assessing the influence of rolling stock axle loads on service life indicators of track structure elements. The authors developed proposals to ensure traffic safety under heavy-load train traffic on the operated turnout switches. These conclusions are useful in organising the current maintenance of turnout switches on sections with heavy-load trains to be put into circulation.

KEYWORDS: railway track, turnout switches, heavy-load traffic, axle loads, predictive analysis, service life indicators, failure-free operation likelihood, failure rate, safe operation

FOR CITATION: Glyuzberg B. E., Titarenko M. I., Tregubchak P. V. Ensuring transportation under turnout switches loads exceeding design and regulatory criteria. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(3):205-214. (In Russ.).

Введение. Современные условия развития экономики страны связаны с необходимостью оперативных изменений логистических направлений грузопотоков. Это в первую очередь касается железнодорожного транспорта, где приоритетными направлениями перевозок массовых видов грузов становятся направления на север и восток к новым потребителям и портам отгрузки основных потоков экспортных российских продуктов. Наиболее эффективный путь быстрого наращивания объемов перевозок железнодорожным транспортом — это использование тяжеловесных поездов повышенной массы с повышенными нагрузками на ось вагонов [1].

На важнейших направлениях намечены и проводятся ускоренными темпами работы по усилению провозной способности линий и реконструкции путевого хозяйства, однако интенсифицировать перевозочный процесс на ряде направлений требуется уже сегодня. При этом работы по его интенсификации необходимо организовать так, чтобы была обеспечена безопасность движения поездов при существующих возможностях содержания и обслуживания пути.

Возможности инфраструктуры железнодорожного транспорта, и в первую очередь путевого хозяйства, на направлениях, на которых требуется быстрое наращивание объема перевозок, не всегда позволяют осуществлять неограниченное использование тяжеловесных поездов. Замена эксплуатируемых конструкций пути на современные, предназначенные для работы в условиях движения тяжеловесных поездов, требует значительного времени и материальных затрат. В течение этого времени перевозки должны осуществляться по существующим конструкциям пути, уже выработавшим часть своего ресурса, в том числе и по пути из рельсов легкого типа P50.

Наблюдения за стрелочными переводами в процессе их эксплуатационной работы показали, что повышенное воздействие на стрелочные переводы приводит к сокращению ресурса их элементов и необходимости выполнения дополнительных работ по поддержанию их в работоспособном состоянии [2–4]. Характерные повреждения элементов стрелочных переводов от воздействия повышенных нагрузок показаны на рис. 1–3.

Рассмотрим эти вопросы более подробно.

Изменение ресурса элементов стрелочных переводов при повышении воздействия на них. Стрелочные переводы и их элементы работают в условиях циклического нагружения от проходящих колес подвижного состава [5, 6]. По мере наработки, под воздействием циклической нагрузки в элементах стрелочных переводов возникают и развиваются повреждения, которые приводят к отказам элементов, требующим их замены. Цель



Рис. 1. Трещина в литой части сердечника крестовины типа P50

Fig. 1. Crack in the cast part of the common crossing of R50 type

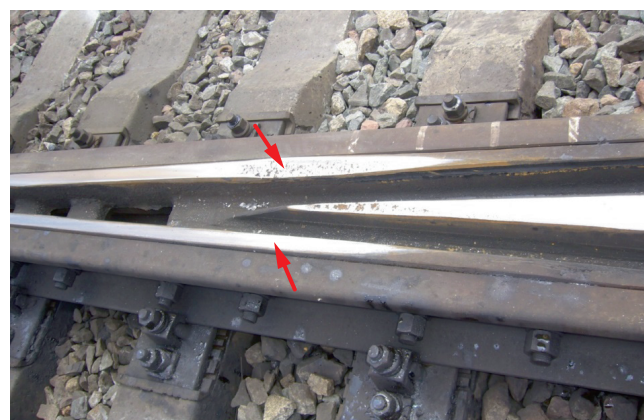


Рис. 2. Сплывы и выкрашивание металла на рабочих поверхностях крестовин типа Р65 из-за воздействия колес с повышенной нагрузкой

Fig. 2. Metal spalling and pitting on the working surfaces of R65 type crosspieces caused by wheels with increased load



Рис. 3. Выкрашивание металла на рабочей поверхности острйка типа Р65 из-за воздействия колес с повышенной нагрузкой

Fig. 3. Metal pitting on the working surface of R65 type switch blade caused by wheels with increased load

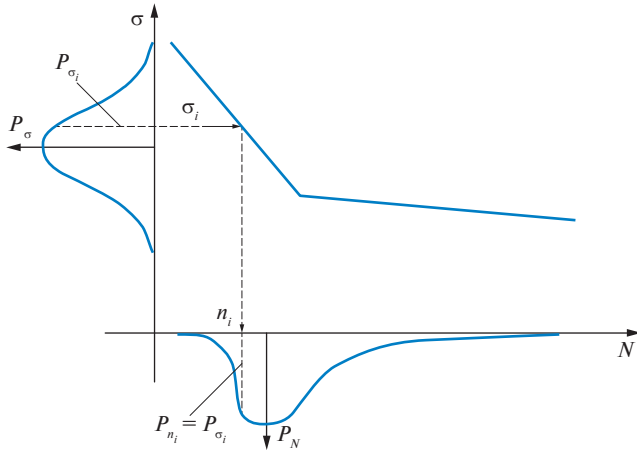


Рис. 4. Схематизированная кривая вторичной усталости $N = N(\sigma)$: N — число циклов до отказа элемента; σ — наибольшие напряжения в цикле нагружения

Fig. 4. Secondary fatigue curve $N = N(\sigma)$: N — cycles to failure; σ — highest stresses in the loading cycle

данного исследования — разработка мероприятий по обеспечению безопасной эксплуатации стрелочных переводов в условиях обращения подвижного состава с повышенными нагрузками. Содержание мероприятий должно базироваться на прогнозировании изменения ресурса основных элементов перевода в условиях повышенного воздействия на них.

Для прогнозирования зависимости отказов основных элементов стрелочных переводов от наработки при циклических нагружениях целесообразно использовать модель, построенную на основе модифицированной теории суммирования повреждений [7–9], которую иллюстрирует рис. 4.

Исходя из теории суммирования повреждений, каждый цикл нагружения с напряжениями большими, чем предел длительной выносливости, использует часть ресурса элемента. Если число таких циклов (вероятность их возникновения) — $P(N_{i,r})$, а общее число циклов, которые может выдержать элемент при таких циклах нагружения, — $N_{i,r}$, то доля ресурса, которая будет использована элементом за все такие циклы нагружения, составит $P(N_{i,r})/N_{i,r}$.

Просуммировав все циклы нагружения за срок работы элемента до отказа — N_0 и учитывая, что вероятность появления циклов $P(N_{i,r})$ соответствует вероятности возникновения напряжений $P(N_{i,r}) = P(\sigma_{i,r})$ (см. рис. 4), после простейших преобразований получим выражение для определения ресурса элемента — N_0 :

$$\frac{k}{N_0} = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{P(N_{i,r})}{N_{i,r}} = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{P(\sigma_{i,r})}{N_{i,r}}, \quad (1)$$

где k — коэффициент, характеризующий работу элемента в условиях переменного (не стационарного)

характера нагружения; $\sigma_{i,r}$ — напряжения в i -м цикле нагружения (коэффициент асимметрии цикла — r); N_0 — общее число циклов до возникновения дефекта, требующего замены элемента; $N_{i,r}$ — число циклов до возникновения дефекта, требующего замены элемента при напряжениях, если все циклы определяются параметрами $\sigma_{i,r}$; $P(N_{i,r})$, $P(\sigma_{i,r})$ — вероятность (частота) возникновения циклов нагружения с напряжениями $\sigma_{i,r}$ за время работы элемента до возникновения дефекта, требующего его замены.

В процессе работы в пути изменение амплитуд напряжений циклов нагружения элементов стрелочных переводов является непрерывным. С учетом этого, принимая во внимание, что усталостные зависимости в области повреждающих напряжений имеют вид $N_i \sigma_i^m = \text{const}$, где m — параметр, характеризующий усталостную зависимость в области повреждающих напряжений (котангенс угла наклона линии $N = N(\sigma)$ на участке повреждающих напряжений в логарифмических координатах), получим (рис. 4) $f(N_{i,r}) = f(\sigma_{i,r})$, $d(n_i) = m_i d(\sigma_i)$. Тогда зависимости (1) с учетом непрерывности изменения циклов нагружения приобретают вид

$$\frac{k}{N_0} = \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \frac{f(\sigma_{i,r}) m_i d(\sigma_i)}{N_{i,r}} = m \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \frac{f(\sigma_{i,r}) d(\sigma_i)}{N_{i,r}} \quad (2)$$

или

$$N_0 = \frac{k}{m \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \frac{f(\sigma_{i,r}) d(\sigma_i)}{N_{i,r}}}. \quad (3)$$

Наработка T элемента в N циклах нагружения при проходе экипажей с нагрузкой на ось Q составит $T = QN$.

Записав уравнения (3) для двух случаев обращения подвижного состава с различными нагрузками на ось и поделив их одно на другое, получим

$$T_2 = T_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{\sigma_{\max}} \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \frac{f_1(\sigma_{i,r}) d(\sigma_i)}{N_{i,r}} / \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \frac{f_2(\sigma_{i,r}) d(\sigma_i)}{N_{i,r}}, \quad (4)$$

где $f_1(\sigma_{i,r})$, $f_2(\sigma_{i,r})$ — распределения циклов напряжений в элементе при эксплуатации в условиях осевых нагрузок подвижного состава соответственно Q_1 и Q_2 .

Таким образом, чтобы спрогнозировать наработку элемента стрелочного перевода в изменившихся условиях, необходимо иметь распределения напряжений в его наиболее нагруженных сечениях при исходных

и изменившихся условиях нагружения (нагрузках на ось) и зависимость $N = N(\sigma)$.

Распределения напряжений в каждом элементе $f_i(\sigma_{i,r})$ могут быть получены в результате натурных динамико-прочностных испытаний стрелочных переводов непосредственно в пути под воздействием подвижного состава с различными нагрузками. Осредненные зависимости $N = N(\sigma)$ можно получить из данных по анализу отказов элементов стрелочных переводов в различных условиях эксплуатационной работы.

Для прогнозирования изменения ресурса стрелочных переводов при повышении нагрузок на ось выполним такой расчет для основных элементов стрелочных переводов — острияков, рамных рельсов, крестовин, рельсов соединительных путей, крестовин и контррельсовых узлов. В качестве объектов исследования рассмотрим широко применяемые в настоящее время стрелочные переводы типа Р65 марки 1/11 на железобетонных брусках в главных путях станций и стрелочные переводы типа Р50 марки 1/9 на деревянных брусках, эксплуатируемые в приемоотправочных путях станций.

Результаты. Распределения напряжений в элементах стрелочных переводов могут быть приняты по результатам испытаний стрелочных переводов при воздействии подвижного состава с нагрузками до 25 т/ось, проведенных в АО «ВНИИЖТ» [10–12]. Такие исследования проводились в последние десятилетия неоднократно. В частности, в 2020–2023 гг. были проведены исследования по изучению работы стрелочных переводов под воздействием тяжеловесных и длинносоставных поездов в условиях Восточного полигона.

Интерпретацию результатов исследования напряжений проведем с учетом того, что распределения напряжений в элементах стрелочных переводов с высокой степенью вероятности аппроксимируются нормальным законом распределения (критерий Пирсона $P(\chi^2) \geq 0,95$) [13].

С учетом этого изменение параметров распределений напряжений в основных элементах стрелочных переводов $f_{25\text{ т/ось}}(\sigma)$ по отношению к параметрам $f_{23,5\text{ т/ось}}(\sigma)$ можно охарактеризовать изменением математических ожиданий (средних величин) напряжений и их среднеквадратических отклонений при повышении нагрузок подвижного состава с 23,5 до 25 т/ось. Они изменяются в соответствии с данными, приведенными в табл. 1.

Хорошее соответствие полученных в испытаниях распределений напряжений в наиболее нагруженных сечениях основных элементов стрелочных переводов нормальному закону позволило оценить максимальные вероятные значения напряжений (с вероятностью непревышения 0,994), сопоставив их с нормируемыми наибольшими величинами.

Таблица 1

Изменение параметров распределений напряжений в наиболее нагруженных сечениях основных элементов стрелочных переводов при повышении нагрузок на ось вагонов с 23,5 до 25 т

Table 1

Stress distribution trends in the most stressed cross-sections of the main elements of turnout switches at increase of wagon axle loads from 23.5 to 25 tons

Вид перевода, условия работы	Элемент	Математическое ожидание σ_{cp}	Среднеквадратическое отклонение S_{σ}
Р65, железобетонное основание, главные пути	Остряки	1,08	1,02
	Рамные рельсы	1,08	1,04
	Литая часть крестовин	1,11	1,08
	Рельсы соединительных путей	1,10	1,04
	Контррельсы	1,05	1,00
Р50, деревянные бруска, приемоотправочные пути	Остряки	1,12	1,02
	Рамные рельсы	1,10	1,03
	Литая часть крестовин	1,15	1,05
	Рельсы соединительных путей	1,12	1,16
	Контррельсы	1,05	0,97

В основных элементах стрелочных переводов типа Р65 наибольшие вероятные значения напряжений от воздействия подвижного состава с нагрузками 25 т/ось не превышают нормируемых величин: 240 МПа — в рельсовых элементах, 275 МПа — в остриях, 110 МПа — в литой части крестовин и 330 МПа — в контррельсах. У стрелочных переводов типа Р50 основные элементы нагружены в значительно большей степени. Под воздействием подвижного состава с нагрузками 25 т/ось наибольшие вероятные значения напряжений в них превышают нормируемые величины: на 10–15 % — в рельсовых элементах, 5–17 % — в остриях, 18–22 % — в литой части крестовин и на 5–7 % — в контррельсах.

Зависимости $N = N(\sigma)$ получены из данных по анализу отказов элементов стрелочных переводов, на основании которых установлены нормативные сроки службы стрелок и крестовин, приведенные в [14].

В качестве примера ниже приведены результаты расчетов по описанной выше методике для условий эксплуатационной работы — грузонапряженность по главным путям 80–100 млн т·км на км в год, по приемоотправочным путям — 40–50 млн т·км на км в год, соотношение грузопотоков по прямому и боковому путям 0,75/0,25 (табл. 2).

Таблица 2

Изменение средней наработки до отказа основных элементов стрелочных переводов при повышении нагрузок на ось вагонов с 23,5 до 25 т

Table 2

Trends of mean time to failure of the main turnout switches elements under increasing wagon axle loads from 23.5 to 25 tons

Вид перевода, условия работы	Элемент перевода	Средняя наработка до отказа относительно 23,5 т/ось, ед.
Р65, железобетонное основание, главные пути	Остряки	0,90
	Рамные рельсы	0,91
	Стрелка в целом (ремкомплект)	0,90
	Конструктивная прочность крестовин	0,86
	Общая наработка крестовин до отказа	0,88
	Рельсы соединительных путей	0,94
	Контррельсы	1,0
	Контррельсовые узлы	0,82
Р50, деревянные брусья, приемоотправочные пути	Остряки	0,85
	Рамные рельсы	0,87
	Стрелка в целом (ремкомплект)	0,86
	Конструктивная прочность крестовин	0,80
	Общая наработка крестовин до отказа	0,83
	Рельсы соединительных путей	0,91
	Контррельсы	1,0
	Контррельсовые узлы	0,80

Как видно из табл. 2, для сохранения действующих в настоящее время ремонтных схем при повышении нагрузок на ось подвижного состава до 25 т необходимо увеличить ресурс элементов стрелки переводов типов Р65 и Р50 соответственно на 10 и 14%. Получить увеличение наработки до отказа элементов стрелки можно за счет более тщательного текущего содержания — своевременного удаления сплывов металла, зашлифовки дефектов, уположения седловин и других мероприятий.

Дополнительным требованием, повышающим ресурс стрелки в целом, является повышение прочности стрелочных башмаков (подкладка с подушкой). Такие башмаки в настоящее время разработаны и находятся в стадии испытаний. Предварительные результаты испытаний показывают, что средний ресурс башмаков, изготовленных по усовершенствованной технологии, возрастет на 15–20%.

Данные, представленные в табл. 2, показывают, что увеличение нагрузок подвижного состава до 25 т/ось потребует увеличения ресурса крестовин типа Р65 на 12%, а типа Р50 на 17%. Особое внимание следует уделить конструктивной прочности литой части крестовин. Ресурс конструктивной прочности крестовин типа Р65 и Р50 необходимо увеличить соответственно в 1,15 и 1,21 раза. Положительный эффект в решении этого вопроса можно получить за счет широкого применения крестовин с приварными рельсовыми окончаниями, разработки крестовин в виде моноблоков с четырьмя рельсовыми окончаниями и других технических решений.

В качестве мероприятий по повышению ресурса крестовин до появления новых разработок следует рекомендовать тщательное соблюдение технологии их текущего содержания — своевременное снятие сплывов металла, уположение неровностей в зоне перекатывания, ликвидацию ступенек в заднем стыке, своевременную наплавку и др.

Ресурс рельсов соединительных путей следует повысить практически пропорционально росту нагрузок на ось.

Каких-либо дополнительных требований к контррельсам при повышении нагрузок на ось до 25 т выдвигать не требуется, однако при повышенных нагрузках следует усилить конструкцию крепления контррельсов в узлах их соединения с опорами (контррельсовыми башмаками), что целесообразнее всего сделать за счет изготовления подкладок усиленной конструкции.

Поддержание стрелочных переводов в работоспособном состоянии при повышении воздействия на них. Система обслуживания стрелочных переводов (система текущего содержания) предназначена для обеспечения безопасного обращения подвижного состава по стрелочным переводам в процессе перевозочной работы. Периодическое обследование геометрии рельсовой колеи стрелочных переводов и дефектоскопия их элементов должны позволять своевременно выявлять и ликвидировать неисправности, препятствующие нормальному перевозочному процессу или требующие введения ограничения скоростей движения поездов.

Периоды между обследованиями стрелочных переводов должны быть такими, чтобы выявление неисправностей носило предупредительный характер. Случаи возникновения неисправностей, развитие которых угрожает безопасности движения поездов, должны выявляться и устраняться своевременно. Для того чтобы обеспечить своевременное обнаружение опасных неисправностей, назначение периодичности обследования стрелочных переводов должно исходить из интенсивности их возникновения и обеспечения требуемой вероятности безотказной работы. В частности, при повышении нагрузок

на ось подвижного состава периодичность обследований стрелочных переводов должна исходить из того, чтобы интенсивность износа и образования (роста) повреждений элементов за период между обследованиями не превышала аналогичных параметров при действующих нагрузках.

Имеющиеся в настоящее время данные по работе стрелочных переводов в эксплуатации показывают, что при обращении по стрелочным переводам подвижного состава с нагрузками на ось до 25 т характер износа и механизм возникновения повреждений не меняются. Изменяются только численные значения скорости износа и интенсивности накопления повреждений. Более того, между отказами по износу и дефектам элементов стрелочных переводов современных конструкций существует устойчивая корреляционная связь с величинами коэффициентов корреляции от 0,78 — для рельсов соединительных путей до 0,94 — для остряков (табл. 3).

Эта корреляционная связь позволяет для получения предиктивных оценок влияния нагрузок на ресурс элементов стрелочных переводов интерполировать и экстраполировать данные о работе этих элементов при обращении действующего подвижного состава с учетом изменения нагруженности элемента (напряжений в наиболее нагруженных сечениях).

Вероятность безотказной работы и интенсивность возникновения неисправностей и отказов элементов стрелочных переводов можно исследовать, опираясь на методы теории надежности^{1, 2}.

Распределение отказов в условиях работы под воздействием подвижного состава с повышенными нагрузками можно получить, используя подход, аналогичный использованному при определении ресурса, развернув его по всей совокупности для каждого из рассматриваемых элементов.

Плотность распределения отказов элемента стрелочного перевода в новых условиях работы $f_{\text{нов}}(n)$ получим с использованием данных по распределению отказов в существующих условиях $f_{\text{сущ}}(n)$ и распределений напряжений в существующих $f_{\text{сущ}}(\sigma)$ и новых условиях $f_{\text{нов}}(\sigma)$:

$$f_{\text{нов}}(n) = f_{\text{сущ}}(n) \left[n_0 \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} f_{\text{нов}}(\sigma) \sigma_{\text{нов}}^m d\sigma / \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} f_{\text{сущ}}(\sigma) \sigma_{\text{нов}}^m d\sigma \right]. \quad (5)$$

Вероятность безотказной работы в новых условиях получим из соотношения (5) по известным зависимостям

$$R(T) = 1 - F(T); F_i(T_i) = P_{\text{ос}} \int_0^{N_i} f_{\text{нов}}(n) d(n), \quad (6)$$

где $R(T)$ и $F(T)$ — вероятность безотказной работы и вероятность отказа на момент наработки T ; $P_{\text{ос}}$ — средняя нагрузка на ось.

Интенсивность отказов $L(T)$ определяется по формуле

$$L_{\text{нов}}(T) = \frac{f_{\text{нов}}(T)}{R_{\text{нов}}(T)}. \quad (7)$$

Для разработки предложений по периодичности осмотров и обслуживания стрелочных переводов в условиях обращения подвижного состава с повышенными нагрузками на ось рассмотрим изменение вероятности безотказной работы и интенсивности отказов, сопоставив значения этих параметров для условий обращения подвижного состава с нагрузками 23,5 и 25 т/ось в приведенном выше примере условий эксплуатации [15].

Для корректности сравнения определим вероятность безотказной работы и интенсивность отказов основных элементов стрелочных переводов при средней наработке (математическом ожидании), соответствующей условиям работы при обращении подвижного состава с нагрузками 23,5 т/ось. Средние значения параметров и среднеквадратические отклонения наработки до отказа получим из распределений $f_{\text{нов}}(n)$. Результаты расчетов сведены в табл. 4.

Из данных таблицы видно, что повышение нагрузок подвижного состава приводит к снижению показателей безотказности основных элементов стрелочных переводов.

Хуже всего обстоит дело с элементами стрелок. Вероятность безотказной работы стрелок у стрелочных переводов типа Р65 при введении в обращение подвижного состава с нагрузками 25 т/ось снижается до 0,29, т. е. в 1,72 раза, а у стрелочных переводов типа Р50 до 0,18, или в 2,78 раза.

Таблица 3

Показатели взаимосвязи между отказами элементов стрелочных переводов по износу и дефектам

Table 3

Indicators of interrelation between turnout switches element failures by wear and defects

Элемент перевода	Коэффициент корреляции
Остряки	0,94
Рамные рельсы	0,88
Рельсы соединительных путей и ходовые рельсы	0,78
Крестовины	0,91

¹ Карпушенко Н. И., Тарпольский Г. Н. Надежность железнодорожного пути : учеб. пособие для студентов вузов. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 1989. 103 с.

² Показатели надежности соединений и пересечений рельсовых путей: памятка ОСЖД Р749/1. Варшава, 2015. 19 с.

Таблица 4

Вероятность безотказной работы и интенсивность отказов элементов стрелочных переводов на момент средней наработки до отказа соответствующего элемента при обращении подвижного состава с нагрузкой 23,5 и 25 т/ось

Table 4

Likelihood of failure-free operation and failure rate of turnout switches elements at mean time to failure of the corresponding element for rolling stock with 23.5 and 25 tons/axle load

Элемент перевода	Тип перевода, основание*	Нагрузка на ось подвижного состава, т			
		23,5		25	
		Вероятность безотказной работы	Интенсивность отказов, ед. / на 1 млн циклов	Вероятность безотказной работы	Интенсивность отказов, ед. / на 1 млн циклов
Стрелка	P65, ж.б.	0,5	0,186	0,29	0,349
	P50, дер.	0,5	0,319	0,18	0,817
Рельсы соединительных путей	P65, ж.б.	0,5	0,169	0,38	0,300
	P50, дер.	0,5	0,220	0,32	0,278
Крестовина	P65, ж.б.	0,5	0,347	0,41	0,527
	P50, дер.	0,5	0,469	0,26	1,048
Контррельсовый узел	P65, ж.б.	0,5	0,155	0,44	0,255
	P50, дер.	0,5	0,225	0,39	0,320

* ж.б. — железобетонное основание, дер. — деревянное основание

У рельсов соединительных путей стрелочных переводов типа P65 вероятность безотказной работы снижается в 1,31 раза, а на переводах типа P50 в 1,56 раза.

Крестовины стрелочных переводов типа P65 при нагрузках на ось 25 т имеют вероятность безотказной работы на 12 % ниже, чем при нагрузках 23,5 т/ось. Вызывают озабоченность крестовины стрелочных переводов типа P50, у которых повышение нагрузок обращающегося подвижного состава до 25 т/ось приводит к снижению вероятности безотказной работы до 0,26, или почти в два раза по сравнению с аналогичным показателем при нагрузках 23,5 т/ось.

Вероятность безотказной работы контррельсовых узлов переводов обоих типов уменьшается на величину около 15 % в основном за счет отказов подкладок с упором (контррельсовых башмаков).

Наиболее важным результатом расчетов являются данные об изменении интенсивности отказов, так как они определяют необходимость изменения периодичности обследований и дефектоскопирования элементов стрелочных переводов с тем, чтобы не пропустить появление дефектов, угрожающих безопасности движения.

Интенсивность отказов стрелок у стрелочных переводов типа P65 при введении в обращение подвижного состава с нагрузками 25 т/ось возрастает в 1,88 раза, а у стрелочных переводов типа P50 в 2,56 раза.

У рельсов соединительных путей стрелочных переводов типа P65 интенсивность отказов увеличивается в 1,78 раза, на переводах типа P50 в меньшей степени — в 1,26 раза.

У крестовин стрелочных переводов типа P65 при нагрузках 25 т/ось интенсивность отказов на 52 % выше, чем при нагрузках 23,5 т/ось. Вызывают озабоченность крестовины стрелочных переводов типа P50, у которых повышение нагрузок обращающегося подвижного состава до 25 т/ось приводит к росту интенсивности отказов более чем в 2,23 раза по сравнению с аналогичным показателем при нагрузках 23,5 т/ось.

Более интенсивно выходят из строя и элементы крепления контррельсовых узлов: в 1,64 раза на стрелочных переводах типа P65 и более чем в 1,42 раза на переводах типа P50.

Обобщая эти результаты, необходимо отметить, что для сохранения уровня безопасности периодические осмотры и дефектоскопный контроль металлических частей стрелочных переводов при повышении нагрузок обращающегося подвижного состава до 25 т/ось следует производить на переводах типа P65 в 2 раза чаще, а на переводах типа P50 в 2,5 раза чаще, чем при нагрузках до 23,5 т/ось.

Обсуждение и заключение. Результатом повышения показателей воздействия на стрелочные переводы при введении в обращение подвижного состава с нагрузками до 25 т/ось будет сокращение ресурса их элементов и повышение интенсивности их отказов, поэтому в целях обеспечения безопасности движения поездов необходимо реализовать комплекс мероприятий по повышению надежности конструкций.

С учетом необходимости обеспечения обращения уже в настоящее время поездов с повышенными нагрузками и массой такой комплекс должен включать три основных этапа: неотложные мероприятия по обеспечению контроля состояния стрелочных переводов в условиях воздействия подвижного состава с повышенными нагрузками; мероприятия по усилению конструкции стрелочных переводов, которые могут быть реализованы в пути силами линейных эксплуатирующих подразделений; плановую замену стрелочных переводов легкого типа Р50 и устаревших конструкций типа Р65 на специальные типа Р65, предназначенные для работы в условиях обращения подвижного состава с повышенными нагрузками.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. На маршрутах обращения поездов повышенной массы и длины целесообразно предусмотреть плановое усиление конструкций. Для этого вместо стрелочных переводов типа Р50 на деревянном основании при плановой замене предусматривать укладку переводов типа Р65 на железобетонном основании, что будет способствовать повышению скоростного режима и пропускной способности.

2. Для повышения стабильности колеи на стрелочных переводах типа Р50 до замены их на переводы типа Р65 зону стрелки целесообразно усилить тяжкими элементами и увеличить опорные поверхности контррельсов в зоне крестовин за счет увеличения опорной площади подкладок и количества крепежных элементов подкладок к основанию.

3. В связи с тем, что уровень напряжений в элементах конструкции стрелочных переводов на маршрутах обращения поездов с повышенными нагрузками существенно возрастает, а на переводах типа Р50 превышает допустимый, необходим усиленный контроль за ними, в том числе за счет изменения периодичности осмотров, с целью обеспечить своевременное обнаружение дефектов, угрожающих безопасности движения поездов.

4. В случае выявления дефектов металлических частей стрелочного перевода следует незамедлительно принимать меры в соответствии с указанными в Классификаторе дефектов и повреждений элементов стрелочных переводов.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to the reviewers for their constructive comments, improving the quality of the article.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Конструкция и содержание железнодорожной инфраструктуры / пер. с англ. под ред. С. М. Захарова. М.: Интекст, 2012. 567 с.
- Zakharov S. M. (transl.) *Summary of the global heavy-weight traffic experience. Structure and maintenance of railway infrastructure*. Moscow: Intext Publ.; 2012. 567 p. (In Russ.).
2. Воробейчик Л. Я. Стрелочные переводы при повышенных осевых нагрузках // Путь и путевое хозяйство. 1990. № 2. С. 15.
- Vorobeychik L. Ya. Turnouts under increased axial loads. *Railway Track and Facilities*. 1990;(2):15. (In Russ.).
3. Рыбкин В. В., Васильев А. С. Надежность работы крестовин стрелочных переводов при повышенной осевой нагрузке // Тезисы докладов XII научно-технической конференции сотрудников ИРИИТа и специалистов эксплуатации и строительства железных дорог Сибири и БАМа (к 150-летию железных дорог СССР). Иркутск: ИРИИТ, 1987. С. 11–13.
- Rybkin V. V., Vasil'ev A. S. Reliability of turnout crosspiece operation under increased axial load. In: *Theses of reports of the XII Scientific and Technical Conference of the Irkutsk State Transport University Employees and Specialists of Operation and Construction of Siberian and BAM Railways (to the 150th Anniversary of the USSR Railways)*. Irkutsk: IrIIT; 1987. p. 11–13. (In Russ.).
4. Крысанов Л. Г., Михайлова В. П. Износ переводов с железобетонными брусками // Путь и путевое хозяйство. 1983. № 9. С. 26–27.
- Krysanov L. G., Mikhaylova V. P. Wear of railway turnouts with reinforced concrete bars. *Railway Track and Facilities*. 1983;(9):26–27. (In Russ.).
5. Глюзберг Б. Э. Система критериев и требований, определяющих скорости движения подвижного состава по стрелочным переводам // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 3. С. 198–211. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-198-211>. EDN: <https://elibrary.ru/fvoefa>.
- Glyuzberg B. E. System of criteria and requirements that determine rolling stock velocities along railroad switches. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(3):198–211. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-3-198-211>. EDN: <https://elibrary.ru/fvoefa>.
6. Желнин Г. Г. Напряженно-деформированное состояние стрелочных переводов и установление допустимых скоростей движения // Подвижной состав и путь в условиях интенсификации работы железных дорог: сб. науч. тр. М.: Транспорт, 1989. С. 77–90. (Труды ВНИИЖТ).
- Zhelnin G. G. Stress-deformation state of turnouts and establishment of allowable speeds. In: *Rolling stock and track under intensified railway operation: Proceeding of sci. articles*. Moscow: Transport Publ.; 1989. p. 77–90. (Proceedings of the Railway Research Institute). (In Russ.).
7. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. М.: Мир, 1980. 604 с.
- Kapur K., Lamberson L. *Reliability in Engineering Design*. Moscow: Mir Publ.; 1980. 604 p. (In Russ.).
8. Коллинз Д. А. Повреждение материалов в конструкциях: анализ, предсказание, предотвращение. М.: Мир, 1984. 624 с.
- Kollinz D. A. *Damage of materials in structures: analysis, prediction, prevention*. Moscow: Mir Publ.; 1984. 624 p. (In Russ.).
9. Гохфельд Д. А., Чернявский О. Ф. Несущая способность конструкций при повторных нагружениях. М.: Машиностроение, 1979. 263 с.
- Gokhfeld D. A., Chernyavskiy O. F. *Bearing capacity of structures under repeated loading*. Moscow: Mashinostroyeniye Publ.; 1979. 263 p. (In Russ.).

10. Глюзберг Б. Э. Модельные ряды стрелочной продукции // Транспортное строительство: сб. ст. Третьей Всерос. науч.-техн. конф., Москва, 12–13 апреля 2022 г. М.: Перо, 2022. С. 27–39.

Glyuzberg B. E. Modelling series of turnout products. In: *Transport Construction: Collection of articles of the Third All-Russian Scientific and Technical Conf., Moscow, 12–13 April 2022*. Moscow: Pero Publ.; 2022. p. 27–39. (In Russ.).

11. Королев В. В. Перспективные разработки стрелочных переводов для российских железных дорог // Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути: тр. XIV Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 5–6 апреля 2017 г. М., 2017. С. 193–194.

Korolev V. V. Perspective developments of turnouts for Russian railways. In: *Modern issues of design, construction and operation of the railway track: Proceedings of the XIV International Scientific and Technical Conf., Moscow, 5–6 April 2017*. Moscow; 2017. p. 193–194. (In Russ.).

12. Титаренко М. И. Совершенствование конструкции стрелочных переводов // Путь и путевое хозяйство. 2002. № 9. С. 29–30.

Titarenko M. I. Improvement of turnout design. *Railway Track and Facilities*. 2002;(9):29–30. (In Russ.).

13. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971. 576 с.

Mitropolskiy A. K. *Techniques of statistical calculations*. Moscow: Nauka Publ.; 1971. 576 p. (In Russ.).

14. Руководство по ведению стрелочного хозяйства / А. Б. Косарев [и др.]; ОАО «РЖД», Департамент пути и сооружений, ОАО «ВНИИЖТ». М., 2009. 240 с.

Kosarev A. B., Abdurashitov A. Yu., Glyuzberg B. E., Titarenko M. I., Teytel A. M., Donets V. G. *Turnout facility management guidelines*. Moscow; 2009. 240 p. (In Russ.).

15. Трегубчак П. В. Современные конструкции стрелочных переводов для тяжеловесного движения // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 9. С. 14–18. EDN: <https://www.elibrary.ru/qgczir>.

Tregubchak P. V. Modern designs of turnouts for heavy-weight traffic. *Railway Track and Facilities*. 2023;(9):14–18. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/qgczir>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Борис Эйнихович ГЛЮЗБЕРГ,

д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, научный центр «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 298472, <https://orcid.org/0000-0003-2430-7894>

Михаил Иванович ТИТАРЕНКО,

канд. техн. наук, научный консультант, научный центр «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 451163

Павел Владимирович ТРЕГУБЧАК,

заместитель директора центра, научный центр «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 10), Author ID: 779415, <https://orcid.org/0009-0002-1097-9227>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris E. GLYUZBERG,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Infrastructure Science Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 298472, <https://orcid.org/0000-0003-2430-7894>

Mikhail I. TITARENKO,

Cand. Sci. (Eng.), Academic Advisor, Infrastructure Science Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 451163

Pavel V. TREGUBCHAK,

Deputy Director of the Centre, Infrastructure Science Centre, Railway Research Institute (129626, Moscow, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 779415, <https://orcid.org/0009-0002-1097-9227>

ВКЛАД АВТОРОВ

Борис Эйнихович ГЛЮЗБЕРГ. Формирование направления исследований, разработка методики работы, выполнение расчетов, участие в формулировке выводов (60%).

Михаил Иванович ТИТАРЕНКО. Проведение наблюдений за работой стрелочных переводов, обобщение результатов эксплуатационных наблюдений, построение распределений отказов элементов, участие в формулировке выводов (25%).

Павел Владимирович ТРЕГУБЧАК. Формулировка цели работы, сбор информации для проведения расчетов, участие в формулировке выводов (15%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Boris E. GLYUZBERG. Formulation of research focus, development of research methods, calculations, participation in conclusions drawing (60%).

Mikhail I. TITARENKO. Observation of turnout switches operation, summarising operational observations, plotting element failure distributions, participation in conclusions drawing (25%).

Pavel V. TREGUBCHAK. Formulation of the goal and objectives, collecting information for calculations, participation in conclusions drawing (15%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 21.06.2024, рецензия от первого рецензента получена 24.06.2024, рецензия от второго рецензента получена 05.08.2024, рецензия от третьего рецензента получена 07.08.2024, принята к публикации 12.08.2024.

The article was submitted 21.06.2024, first review received 24.06.2024, second review received 05.08.2024, third review received 07.08.2024, accepted for publication 12.08.2024.