

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ



В.П. Сычев



Д.В. Овчинников

Разработана методика определения ресурса железнодорожного пути в зависимости от условий его эксплуатации, учитывающая не только силовые параметры воздействия на путь от подвижного состава, но и напряженно-деформированное состояние рельсов в процессе нагружения непосредственно в месте контактирования с колесами, а также изгибные напряжения в подошве.

Ключевые слова: железнодорожный путь, рельсы, моделирование, напряженно-деформированное состояние, ресурс

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_44

Одним из основных показателей для выбора участков железнодорожного пути, подлежащих ремонтам, является такой показатель как среднее значение одиночных замен рельсов по дефектности (выход рельсов) на участке пути после окончания гарантийной наработки рельсов (пропущенного тоннажа).

Большинство методик прогнозирования срока службы рельсов основано на оценке действующих на рельс вертикальных осевых и боковых сил под действием подвижного состава. Напряженно-деформированное состояние системы «колесо-рельс» либо

не учитывается вовсе, либо учитывается в неполном объеме [1]. Проведенный анализ замены рельсов по видам дефектов показал, что появлению излома в рельсах предшествует появление дефектов контактно-усталостного происхождения в головке рельсов, развитие которых зависит от количественных значений их напряженно-деформированного состояния, и вызванных, в том числе, таким фактором, как пропущенный тоннаж.

Поэтому задача моделирования напряженно-деформированного состояния железнодорожного пути в зависимости от условий эксплуатации явля-

Сычев Вячеслав Петрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Транспортное строительство» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: создание новых технологий и технических средств для повышения эффективности технического обслуживания железнодорожного пути. Автор 151 научной работы. Имеет 20 патентов на изобретения.

Овчинников Дмитрий Владиславович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС). Область научных интересов: оценка устойчивости работы железнодорожного пути и предельного состояния рельсов, моделирование развития трещин в рельсах, теория упругости, остаточный ресурс. Автор 34 научных работ.

Абдурашитов Анатолий Юрьевич, кандидат технических наук, начальник отдела Проектно-конструкторского бюро по инфраструктуре – филиала ОАО «РЖД» (ПКБ И). Область научных интересов: система ведения путевого хозяйства, планирование путевых работ, взаимодействие в системе «колесо-рельс». Автор 140 научных работ.

Сычева Анна Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Здания и сооружения на транспорте» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: инженерное обеспечение строительства, инженерная геология. Автор 56 научных работ.

ется актуальной, направленной на решение задачи повышения надежности железнодорожного пути и перспективной в части перехода на рельсы Р 75 [2].

Методика исследований

Ресурс усталостной прочности материала G зависит от напряжения в металле, образующийся при нагружении σ_0 и числа циклов нагрузки для достижения усталостного ресурса материала n_0 по следующей зависимости:

$$\sigma_0^m n_0 = G = \text{const}, \quad (1)$$

где m зависит от свойств материала и для сталей колеблется в пределах 3–5.

Средневзвешенные механические напряжения $\bar{\sigma}_j$ вычисляются как произведение сумм механических напряжений σ_j , возникающих в системе «колесо-рельс», изгибных напряжений в подошве рельса на сумму весовых коэффициентов, учитывающих преобладание конкретных дефектов рельсов на рассматриваемом участке пути. В первом приближении весовые коэффициенты k_j принимаются равными процентному соотношению выявленных дефектов в головке и подошве к общему числу дефектов. Таким образом учитывается влияние особенностей подвижного состава, обращающегося на рассматриваемом конкретном участке, и наносящего повреждения рельсам в каждом цикле воздействия:

$$\bar{\sigma}_j = \sum \sigma_j \sum k_j. \quad (2)$$

Формула для определения размеров тоннажа брутто T_i , который можно пропустить по участку i с заданными эксплуатационными характеристиками, при известном тоннаже брутто T_0 , пропущенном на опытном участке с учетом эмпирических коэффициентов a_1 (учитывающий влияние шлифовки рельсов); a_2 (учитывающий кратность тяги, рекуперативное торможение и рельеф участка); a_3 (учитывающий влияние климатических условий), примет вид:

$$T_i = T_0 \frac{\bar{\sigma}_0}{\bar{\sigma}_i} \frac{\langle P_i \rangle}{\langle P_0 \rangle} a_1 a_2 a_3. \quad (3)$$

Коэффициенты a_1 и a_2 принимаются по нормативным документам ОАО «РЖД» и зависят от многих условий: невыполнения всего объема или части по шлифовке рельсов; на участках с рекуперативным торможением и кратной тяги; на участках со сложными условиями: уклоны большой протяженностью, перевальные участки и т.д. Коэффициент a_3 зависит от климатической зоны, учитывает влияние растягивающих напряжений в рельсах, скорость роста трещины, критические размеры дефекта (внутренней и внешней трещины в головке рельса) и ряд других факторов [3–5].

Ресурс прочности рельсов, на основе которого определяется прогнозное значение пропущенного тоннажа до истощения этого ресурса зависит от многих факторов: типы обрабатываемого по участку подвижного состава, скорость, осевые нагрузки, тип верхнего строения пути, план линии, состояние рельсовой колеи по геометрическим очертаниям, при этом напряженно-деформированное состояние рельсов σ_0 определяется математическим моделированием. В зависимости от этих факторов участок железнодорожного пути разбивается на мелкие i -е участки с идентичными характеристиками и эксплуатационными факторами длиной равной 1 км пути.

Известна методика напряженно-деформируемого состояния рельсов, основанная на использовании коэффициентов, полученных эмпирическим путем для определенных конструкций верхнего строения пути и условий их эксплуатации с адаптацией к новым эксплуатационным условиям. Однако погрешность в получаемых результатах достигает 25% [6].

Предлагается с целью повышения точности расчетов применить метод конечных элементов, основанный на разбиении модели на совокупность элементов простейшей формы, в частности, в форме гексаэдров. Схема разбиения модели на элементы простейшей формы приведена на рис. 1.

В рамках данной работы разработаны конечно-элементные модели участка пути мощностью порядка двух миллионов узлов действующей конструкции железнодорожного пути с промежуточными рельсовыми скреплениями двух типов: подкладочного ЖБР-65Ш и бесподкладочного ЖБР-65ПШМ. Общий вид конечно-элементной модели приведен на рис. 2.

Алгоритм расчета напряженно-деформируемого состояния следующий.

1. Вычисляется U модуль упругости подрельсового основания в вертикальной плоскости [7]:

$$U = \sqrt[3]{\left(\frac{P}{y}\right)^4 \frac{1}{64EJ}}, \quad (4)$$

где P — нагрузка от колеса на рельс; y — прогиб рельсовой нити; E — модуль упругости рельсовой стали; J — момент инерции рельса в вертикальной плоскости.

2. Вычисляется коэффициент относительной жесткости рельсового основания и рельса:

$$k = \sqrt[4]{\frac{U}{4EJ}}, \quad (5)$$

3. Определяется η ордината линии влияния упругого прогиба рельса:

$$\eta = e^{-kx} (\cos(kx) + \sin(kx)), \quad (6)$$

где k — коэффициент относительной жесткости рель-

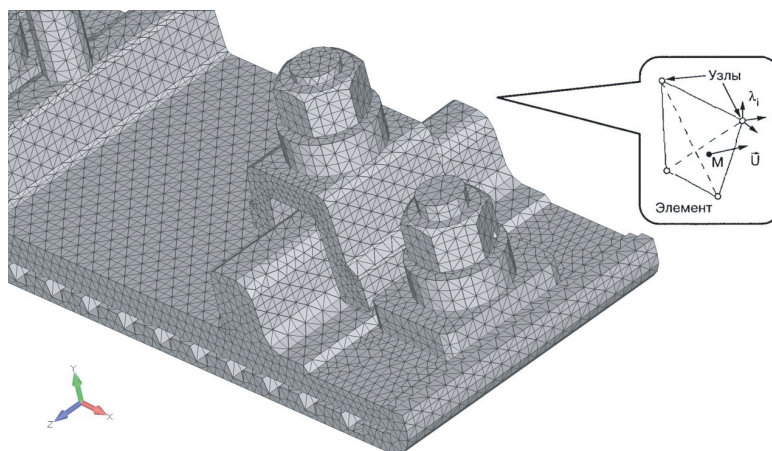


Рис. 1. Схема разбиения модели на элементы в форме гексаэдра (конечно-элементная модель)

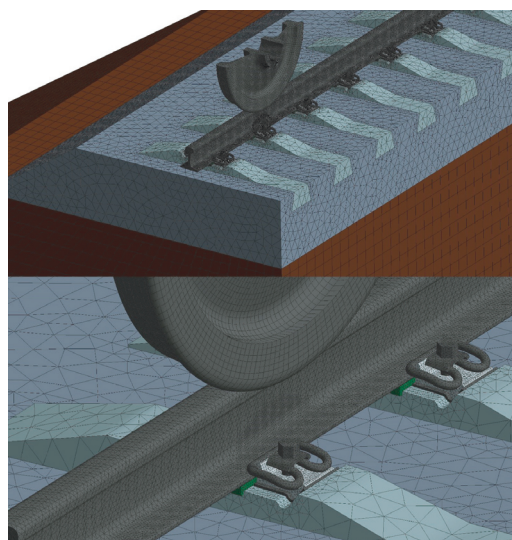


Рис. 2. Конечно-элементная модель пути со креплениями ЖБР-65Ш

сового основания и рельса; x — расстояние между осями тележки.

4. Вычисляется эквивалентная нагрузка $P_{\text{ЭКВ}}$ для напряженно-деформированного состояния рельса:

$$P_{\text{ЭКВ}} = P + \sum \bar{P} \cdot \eta. \quad (7)$$

Исходные данные для моделирования принимаются на основе нормативных документов [8–10] и результатов известных исследований [11–13]:

- Вертикальное усилие, передаваемое от колеса: 5, 10 и 15 тонн;
- Боковое усилие, передаваемое от колеса: 5 и 10 тонн;

- Затяжка прикрепителей рельсовых креплений — нормативная;

- Этапы нагружения: затяжка прикрепителей, учет собственного веса элементов пути и приложение нагрузки от подвижного состава;

- Свойства элементов верхнего строения пути соответствуют эксплуатируемой конструкции железнодорожного пути;

- Свойства материалов грунта и балластного слоя согласно нормативным документам.

Результаты исследований

Получены величины деформаций и напряжений в рельсах, возникающих в процессе воздействия подвижного состава, представленные на рис. 3–5.

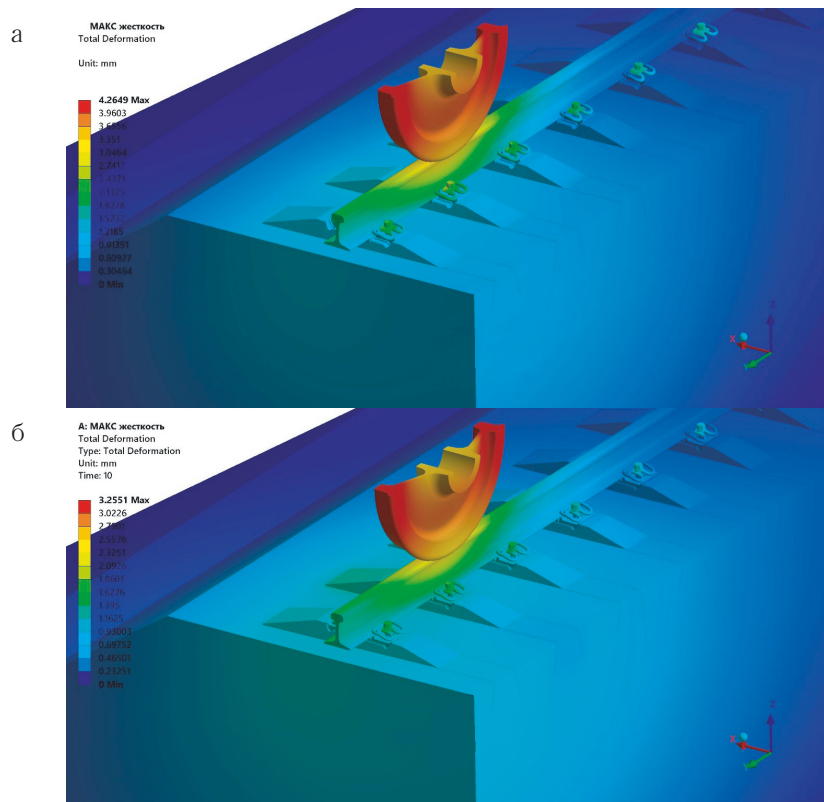


Рис. 3. Общие деформации железнодорожного пути при воздействии нагрузки от колеса 15 тонн и боковой силы 10 тонн: а – для ЖБР-65Ш; б – для ЖБР-65ПШМ

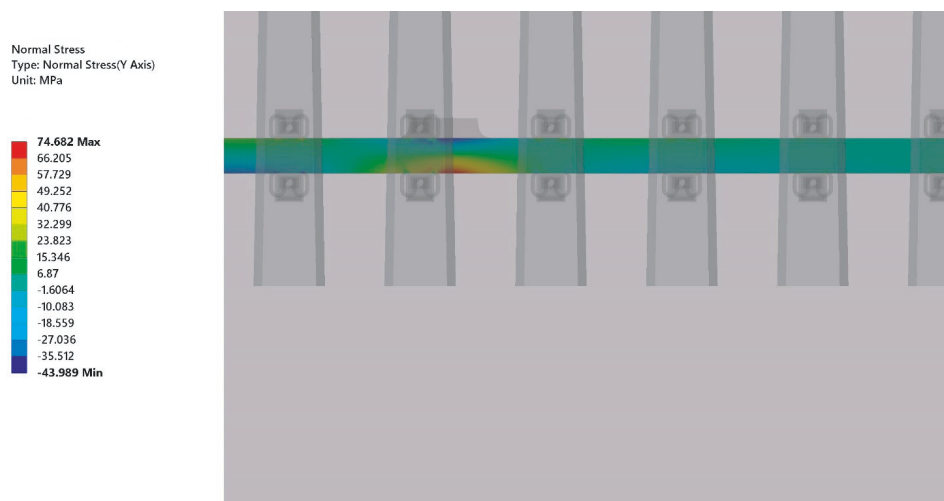


Рис. 4. Нормальные напряжения в рельсе при воздействии нагрузки от колеса 5 тонн и боковой силы 5 тонн (скрепления ЖБР-65Ш)

По результатам проведенных исследований были построены на основе известной теории регрессионного анализа [14] графики зависимости нормальных напряжений в рельсах от вертикальной силы при нагрузках от колес 5–15 тонн для участков пути со скреплениями ЖБР-65Ш, приведенные для иллюстрации на рис. 6.

На рис. 7,8 представлены графики зависимости нормальных напряжений в рельсах от боковой силы при различной нагрузке от колес подвижного состава для промежуточных рельсовых скреплений ЖБР-

65Ш и ЖБР-65ПШМ. По оси абсцисс представлена боковая сила в тоннах, по оси ординат нормальные напряжения в МПа. Аппроксимация проводилась по линейным и квадратичным моделям.

Как видно из рис. 6–8 и анализа полученных зависимостей, результаты аппроксимации по построенным моделям показывают сходимость, близкую к единице.

Итоговые результаты моделирования сведены в таблицу.



Рис. 5. Нормальные напряжения в рельсе при воздействии нагрузки от колеса 15 тонн и боковой силы 5 тонн (скрепления ЖБР-65ПШМ)

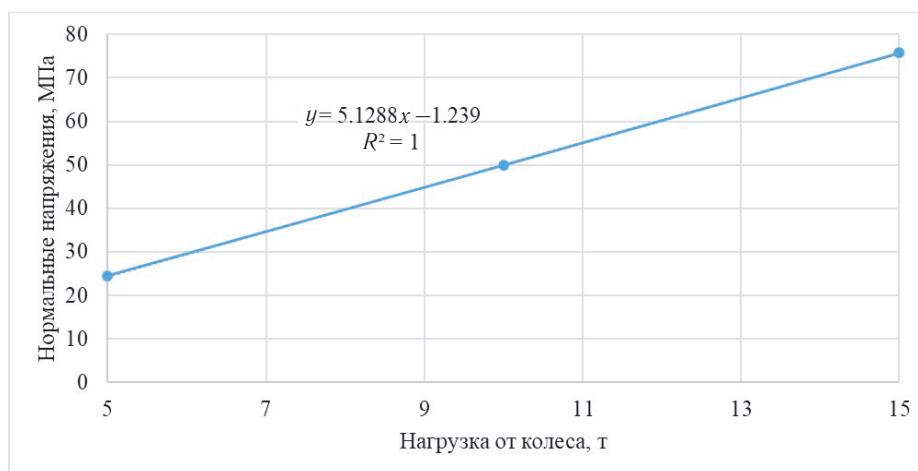


Рис. 6. График зависимости нормальных напряжений в рельсах от вертикальной силы для участка пути с промежуточными скреплениями ЖБР-65Ш

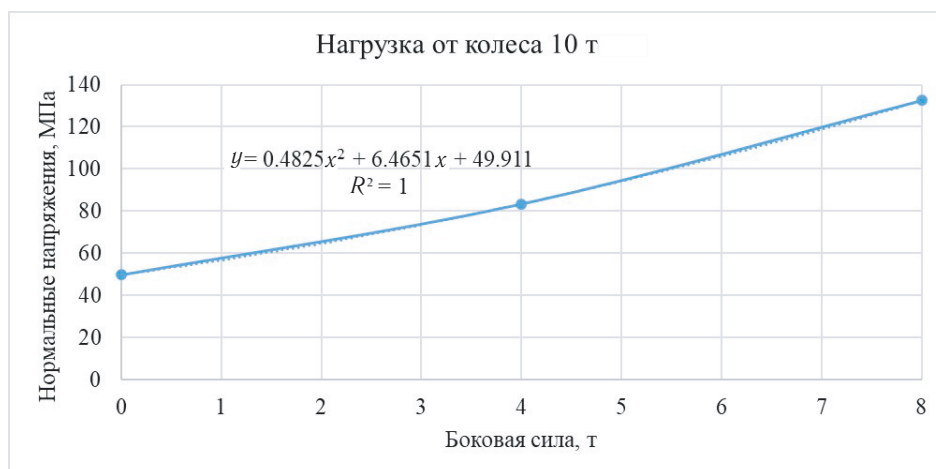


Рис. 7. График зависимости нормальных напряжений в рельсах от боковой силы при нагрузке от колес подвижного состава 10 тонн для пути с промежуточными скреплениями ЖБР-65Ш

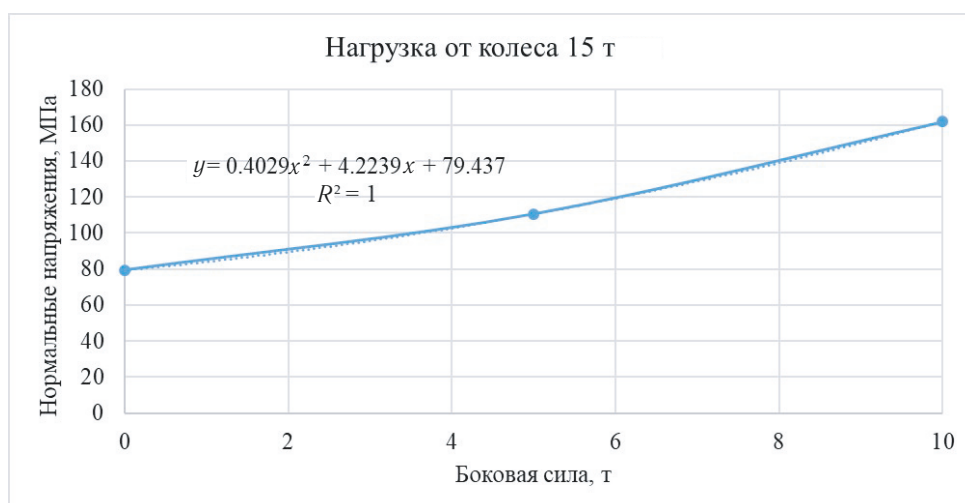


Рис. 8. График зависимости нормальных напряжений в рельсах от боковой силы при нагрузке от колес подвижного состава 15 тонн для пути с промежуточными скреплениями ЖБР-65ПШМ

Таблица

Результаты моделирования

Нагрузка на колесо, т		Максимальные значения, МПа	
вертикальная	боковая	Участок со скреплениями ЖБР-65Ш	Участок со скреплениями ЖБР-65ПШМ
5–15	0	63,4	67,75
5	0–5	74,68	68,87
10	0–8	126,01	114,94
15	0–10	165,26	150,81

Заключение

1. Разработана модель оценки ресурса рельсов, основанная не только на оценке вертикальных усилий, но и учитывающая напряженно-деформированное состояние рельсов при воздействии подвижного состава: изгибных напряжений в подошве, контактных напряжений в головке рельса;
2. Для реализации предложенной методики проведена оценка напряженного состояния рельсов в зависимости от условий эксплуатации (прямые, кривые, наружные и внутренние нити при различном плане и профиле пути, тип локомотива, состояние пути, обращение длинносоставных тяжеловесных поездов);
3. Получены уравнения аппроксимации для определения напряженного состояния рельсов в зависимости от колесной нагрузки. Уравнения аппроксимации имеют достоверность, близкую к единице, что говорит о значительной точности получаемых с помощью представленных уравнений выходных данных напряжений в рельсах в зависимости от колесной нагрузки.



Литература

1. Коган, А.Я. Динамика пути и его взаимодействие с подвижным составом / А.Я. Коган. — Москва: Транспорт, 1997. — 326 с. — ISBN 5-277-02025-X. — Текст: непосредственный.
2. Лисицын, А.И. Перспективы развития конструкции верхнего строения пути и его элементов / А.И. Лисицын. — Текст: непосредственный // Путь и путевое хозяйство. — 2019. — № 10. — С. 2–7.
3. Makhutov N.A., Kossov V.S., Oganyan E.S., Volokhov G.M., Ovechnikov M.N., Protopopov A.L. Prediction of contact-fatigue damage to rails using computational-experimental methods. Industrial laboratory. Diagnostics of materials. 2020;86(4):46-55. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-4-46-55>
4. Abdurashitov A.Y., Sychev V.P. // Evaluation of the strain-stress condition of rails. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. 2020. С. 012001.
5. Maksimenko A S, Sychev V P, Abdurashitov A Y // Identification of transverse defects of the head and bottom of the rails path and track // Facilities. 2018. № 3. С. 2.
6. Ovchinnikov, D.V., Pokatsky, V.A., Gallyamov, D.I.: Factors Affecting the Dynamic Rail Canting of the Railway Track, Transportation Research Procedia, Volume 54, 2021, Pages 544-551, doi: 10.1016/j.trpro.2021.02.106
7. Расчеты и проектирование железнодорожного пути: Учебное пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта / В.В. Виноградов, А.М. Никонов, Т.Г. Яковлева [и др.]; под редакцией В.В. Виноградова и А.М. Никонова. — Москва: Маршрут, 2003. — 486 с. — ISBN 5-89035-112-5. — Текст: непосредственный.
8. ГОСТ 32698-2014 Крепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля = Rail fastening. Safety requirements* and methods* of control: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 августа 2014 г. № 932-ст: введен впервые: дата введения 2015-03-01 / разработан Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»): переиздание сентябрь 2019 г. — Москва: Стандартинформ, 2019. — 10 с. — Текст: непосредственный.
9. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 г. № 2544р.
10. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 г. № 2288р.
11. Абдурашитов, А.Ю. Моделирование напряженного состояния рельса на основе трехмерной задачи теории упругости и влияния краевого эффекта / А.Ю. Абдурашитов, В.П. Сычев. — Текст: непосредственный // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. — 2019. — Т.14, № 14(14). — С. 178–189.
12. Сычева, А.В. Управление жесткостью пути на переходных участках / А.В. Сычева, А.А. Локтев, В.П. Сычев. — Текст: непосредственный // Путь и путевое хозяйство. — 2021. — № 2. — С. 16–20.
13. Сычева, А.В. Повышение несущей способности грунтов земляного полотна и балластного слоя при строительстве железнодорожного пути / А.В. Сычева, М.В. Гридчин. — Текст: непосредственный // Наука и техника транспорта. — 2017. — № 2. — С. 92–101.
14. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы, формулы / Г. Корн. — Москва: Книга по Требованию, 2014. — 832 с. — ISBN 978-5-458-25439-7. — Текст: непосредственный.

