

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ НА ПОДРЕЛЬСОВЫХ ОСНОВАНИЯХ С ВЯЗКИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Построены математические модели в среде конечно-элементного анализа типового железнодорожного пути и временного железнодорожного пути оперативного развертывания на подрельсовых основаниях с элементами оболочек, наполненных жидкостью Ньютона с разным уровнем заполнения.

Ключевые слова: железнодорожный путь, деформирование, анализ, конечно-элементный, подрельсовое устройство, жидкость Ньютона

EDN: YJCNIV



А.В. Сычева



Д.В. Овчинников

Взаимодействие подвижного состава и железнодорожного пути представляют в виде колебаний системы, состоящей из масс последовательно соединенных упругих элементов [1;2], определяющих жесткость пути. При этом жесткость на различных участках разная и зависит от этих элементов, их конструкции и материалов, из которых они изготовлены, а именно следующих: модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность материала. Таким образом, для формирования пути переменной жесткости требуется варьирование модуля упругости отдельных элементов изменением их конструкции или материала, из которого они изготовлены. Особенно это важно на переходных участках, на подходах к искусственным сооружениям, мостам, тоннелям. При движении железнодорожного подвижного состава на подходе к искусственным со-

оружениям появляются локальные участки с резким перепадом жесткости, вызывающие значительное увеличение параметров силового взаимодействия пути и подвижного состава. Однако без демонтажа отдельных элементов такое решение не позволяет решить задачу оперативного изменения жесткости участка пути [3].

При моделировании взаимодействия подвижного состава и пути для различных параметров жесткости пути свойства материалов элементов взяты из справочных материалов и сведены в табл. 1.

Проведено моделирование напряженно-деформированного состояния элементов верхнего строения пути типовой конструкции с рельсами Р65 на железобетонных шпалах с промежуточными рельсовыми скреплениями ЖБР-Ш и толщиной балластного слоя 30 см, геометрически полностью подобной эксплуа-

Сычева Анна Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Здания и сооружения на транспорте» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: инженерное обеспечение строительства, инженерная геология. Автор 60 научных работ.

Овчинников Дмитрий Владиславович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС). Область научных интересов: устойчивость бесстыкового пути, прочность элементов железнодорожного пути и конструкции целом, надежность и долговечность. Автор 70 научных работ.

Сычев Вячеслав Петрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Транспортное строительство» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: создание новых технологий и технических средств для повышения эффективности технического обслуживания железнодорожного пути. Автор 158 научных работ. Имеет 20 патентов на изобретения.

тируемой на сети дорог ОАО «РЖД» конструкции, представленной в виде трехмерной геометрической модели эксплуатируемого железнодорожного пути (рис. 1) [4].

На базе этих трехмерных моделей построим математические модели в среде конечно-элементного анализа [5–7]. Мощность конечно-элементных моделей составляет около 2,3 млн узлов в зависимости от конфигурации с использованием тетраэдров второго порядка с 10 узлами на элемент. Качественный параметр сетки имеет значение моды, близкое к 0,8–0,9 (Element Quality), что говорит о высоком качестве построения модели и, как следствие, незначительной разнице выходных данных в узлах, относящихся в одному элементу (Nodal Difference). Такие качественные параметры достигаются с помощью сгущения сетки элементов в местах концентрации деформаций и напряжений. Для уменьшения общего количества узлов и элементов использованы свойства симметрии модели.

Для описания нелинейных свойств слоистой структуры балластной призмы и земляного полотна применяется модель пластичности Мора-Кулона.

При моделировании использованы следующие физико-механические свойства материалов балластной призмы:

- щебень (фракция 25–60 мм) в уплотненном состоянии при эксплуатации в зимний период с плотностью 1,8 т/м³; модулем упругости 260 МПа; коэффициентом Пуассона 0,29;

- при эксплуатации в летний период с плотностью 1,6 т/м³; модулем упругости 200 МПа; коэффициентом Пуассона 0,26.

Грунт представляет собой сыпучий материал с плотностью 1,7 т/м³; модулем упругости 110 МПа; коэффициентом Пуассона 0,38.

Балластный слой, щебень фракции 25–60 мм имеет удельное сопротивление от 0,15 до 0,18 кг/см²; угол внутреннего трения от 40 до 43 градусов, угол дилатансии 15 градусов.

Нагружение в модели проводится в несколько этапов:

- затяжка крепежителей (изменение положения монорегулятора);
- деформации из-за собственного веса конструкции;

Таблица 1

Свойства материалов при моделировании

Материал	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
Сталь	7850	$2.1 \cdot 10^5$	0.3
Полимерные материалы	1100	7500	0.35
Резина	1000	75	0.4
Бетон	2500	32500	0.2
Пластик	1100	500	0.35

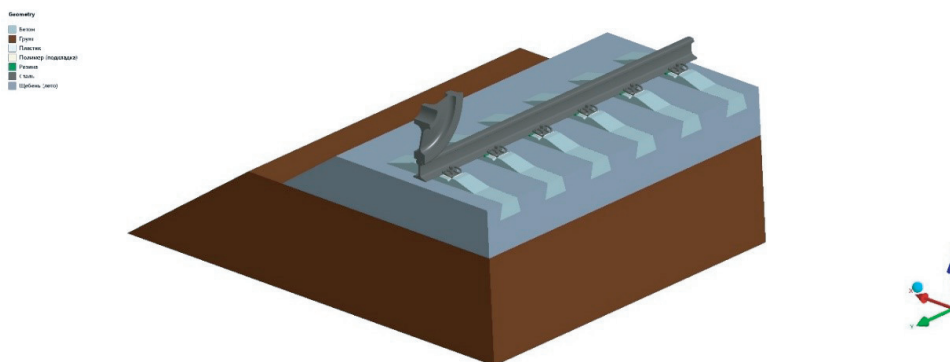


Рис. 1. Трехмерная геометрическая модель эксплуатируемого участка пути (ЖБР-Щ, 1840 шп./км)

- воздействие подвижного состава.

Усилия, передаваемые на рельсы от колес подвижного состава, составляют:

- вертикальные 29,42 кН, 115,23 кН, 122,58 кН, 132,39 кН и 147,1 кН;
- боковые 0 и 14,71 кН.

Данные параметры соответствуют нагруженности пути действующих железных дорог сети ОАО «РЖД».

Передача нагрузки от колеса на рельсы происходит непосредственно через зону взаимодействия системы «колесо-рельс», что повышает точность моделирования при кручении рельса в зоне бокового контакта с

последующим исследованием раскантовки при значительных боковых силах.

На рис. 2 и 3 приведены сетка элементов модели участка пути с промежуточными скреплениями ЖБР-ПШР и эпюрой шпал 1840 шп./км, а также качественная характеристика сетки.

Между элементами верхнего строения пути, а также балластным слоем и земляным полотном заданы контактные связи, в том числе нелинейные, позволяющие добавлять в область взаимодействия силы трения, отрыв элементов относительно друг друга. Параметры жесткости элементов системы упругих элементов верхнего строения пути определяли из справочных

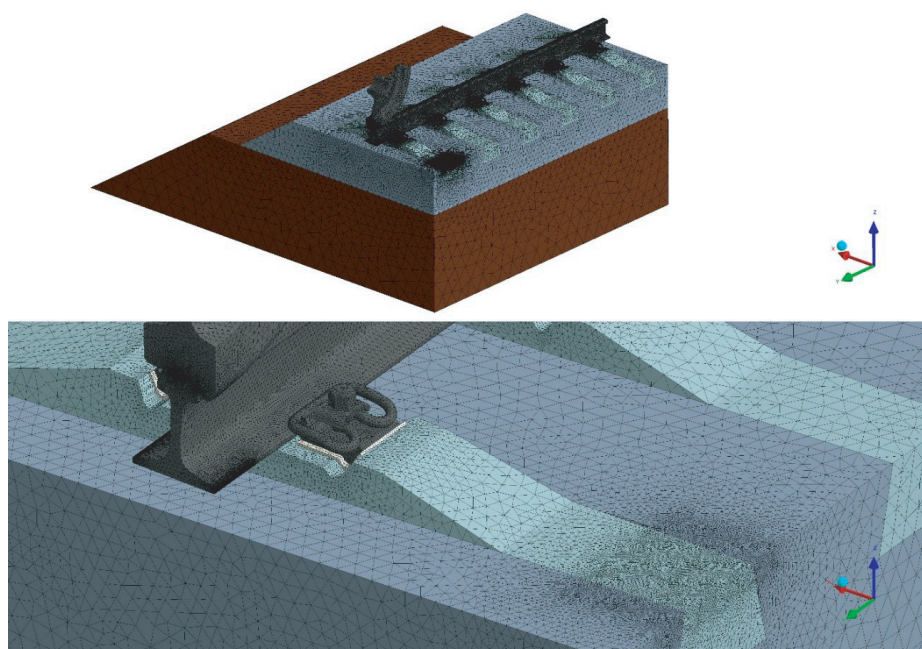


Рис. 2. Сетка элементов участка пути, а также сгущение в областях оценки НДС (ЖБР-Ш, 1840 шп./км)

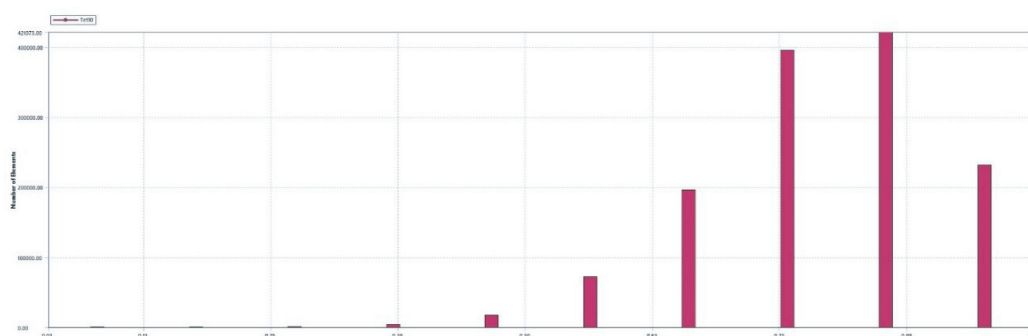


Рис. 3. Качественная характеристика сетки элементов исследуемого участка пути

данных для грузового полувагона с осевой нагрузкой 25 тс, рельса Р65, железобетонной шпалы и щебеночного балласта.

Таким образом, предложенная конфигурация конечно-элементной модели позволяет учитывать при моделировании следующие особенности:

- перемещение колеса по головке рельса при изменении угла наклона (раскантировке);
- затяжку крепежителей с учетом силы трения между клеммой и рельсом;
- отрыв прокладки от подкладки при значительной раскантировке рельса со смещением усилий, передаваемых через подошву рельса на нижележащие элементы;
- опирание рельса в реборду подкладки при боковом смещении.

Применение нелинейных контактных связей совместно со сгущением сетки элементов позволяет получать результаты, наиболее близкие к эксплуатационной работе реальных конструкций пути.

На основе разработанной модели выполнено моделирование воздействия колес подвижного состава на участок пути, получены величины напряжений в элементах верхнего строения пути, контуры которых при максимальной нагрузке изображены на рис. 4 и 5.

Сравнительный анализ нагружения в статическом режиме железнодорожного пути из элементов из различных материалов с разными жесткостными характеристиками показал возможность изменения жесткости пути в относительно широком диапазоне. Однако эти решения по изменению жесткости пути за счет повышения эластичности подкладок, шпал, других элементов пути изменением их конструкции и материалов, не решают проблему оперативного изменения жесткости, поскольку и упругие и эластичные деформации обратимы, а подобрать материал, позволяющий менять жесткость применительно к различным нагрузкам на ось и скоростям движения, сложно. При этом регулировать жесткость участка можно исключительно при замене элементов пути.

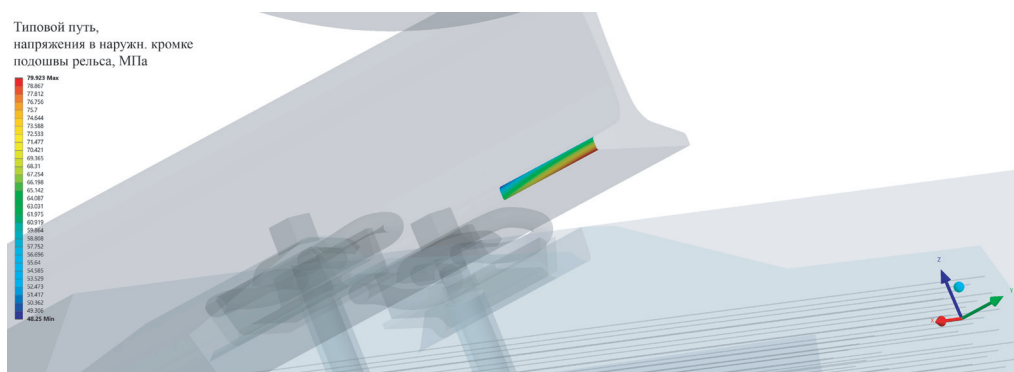


Рис. 4. Напряжения в наружной кромке подошвы рельса эксплуатируемого пути

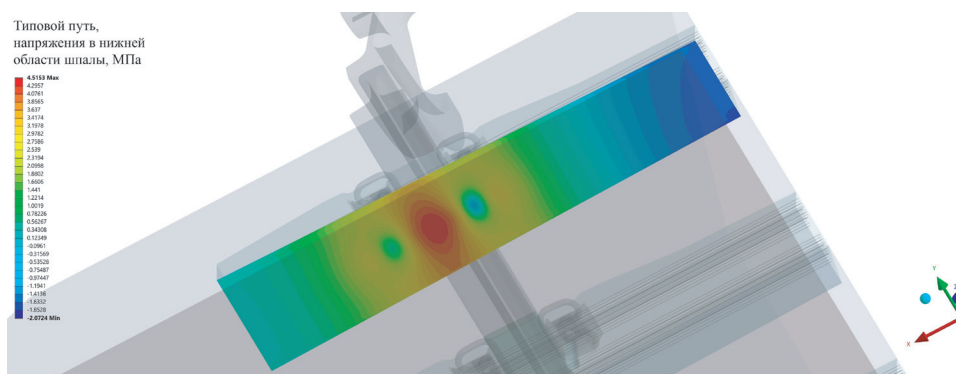


Рис. 5. Напряжения в нижней области шпалы эксплуатируемого пути

Для временного железнодорожного пути оперативного развертывания [8] было предложено в конструкцию пути, как «скелета» последовательно соединенных упругих элементов (рис. 6,а) добавить составляющую на основе жидкости Ньютона (рис. 6,б) [9;10].

Тогда в вязкоупругом «скелете» пути упругие элементы и вязкие элементы будут по-разному восстанавливаться после нагрузки от подвижного состава, упругие быстрее, а вязкие — медленнее. Это позволит за счет возникшей разности фаз циклической нагрузки рассеять возникающую от нагрузки механическую энергию и, тем самым, изменить жесткость пути, а также погасить ударные воздействия колеса о рельс.

В этом случае одной из промежуточных задач является подбор значений параметров упругости и вязкости элементов таким образом, чтобы их деформации примерно совпадали. В противном случае такой элемент будет вести себя либо как отдельный упругий элемент, либо как чисто вязкий элемент [11]. Имеются раз-

личные предложения по конструкции подрельсового устройства для временного железнодорожного пути оперативного развертывания, создания переходных участков, решения задач текущего содержания пути по выравниванию рельсовых нитей при появлении сверхнормативных просадок. Подрельсовое устройство содержит оболочку, наполняемую жидкостью Ньютона, например воздухом или сыпучим материалом с особыми свойствами [8;10;12].

Моделирование железнодорожного пути с подрельсовыми основаниями на основе подрельсовых устройств, содержащих оболочки разных конструкций, осуществлялось следующим образом. Оболочка, уложенная под шпалы, наполнялась воздухом таким образом, чтобы обеспечить разную ее толщину, а именно: 10 см, 20 см, 30 см, 40 см а также разные сочетания толщин: резкий перепад толщины с 10 до 40 см; резкий перепад толщины с 40 до 10 см; плавный переход от толщины 40 см к 10 см.

План эксперимента иллюстрируется рис. 7.



Рис. 6. Схема упругого и упруго-вязкого «скелетов» пути: а – схема железнодорожного пути как системы упругих элементов; б – схема железнодорожного пути как системы последовательного соединения вязких и упругих элементов (модель Максвелла)

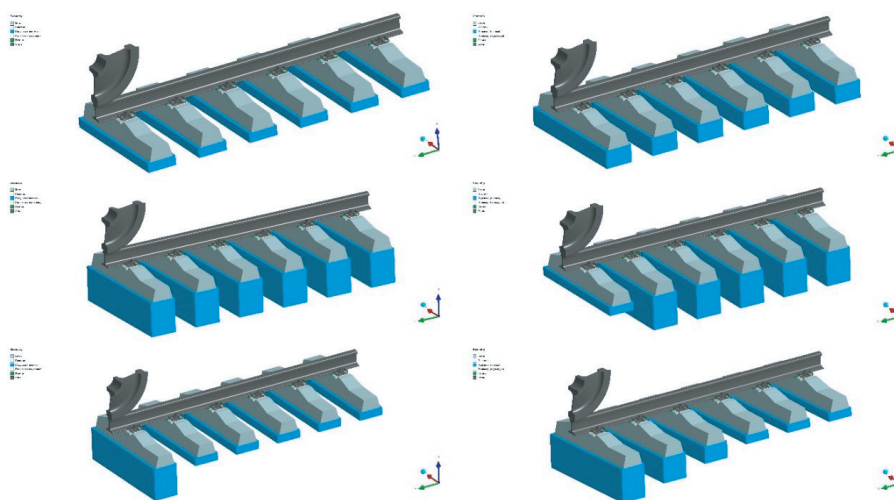


Рис. 7. Трехмерные геометрические модели пути с подрельсовыми устройствами с регулируемым модулем упругости и уровнем рельсовой нити с оболочкой, наполняемой воздухом (пневмоэлементом)

Свойства изотропных линейно упругих материалов элементов пути аналогичны типовой конструкции. Свойства с подрельсовыми устройствами с регулируемым модулем упругости и уровнем рельсовой нити с оболочкой, наполняемой воздухом (пневмоэлементами) на первом этапе подобраны сопоставимо с жесткостью балластного слоя без учета нелинейных выпучив свойств — жесткость составляет от 400 до 1500 МН/м в зависимости от толщины.

Сетка элементов, а также сгущение в местах концентрации напряжений для модели с плавным переходом толщины пневмоэлемента показана на рис. 8. На рис. 9 и 10 представлены полученные контуры механических напряжений для участка с плавным изменением толщины пневматического подшпального основания при максимальной нагрузке.

Следует отметить, что для подрельсовой части шпалы, а также балластного слоя использованы

осредненные значения напряжений (overage) для исключения «шума» в виде резких локальных скачков уровня напряжений.

Выводы

1. Напряжения на поверхности кромок рельсов пути переменной жесткости и типового пути сопоставимы с небольшими отклонениями в диапазоне исследованных усилий независимо от толщины пневматического оборудования.

2. Наблюдается увеличение сжимающих напряжений на шпале в подрельсовой зоне, что обусловлено увеличением жесткости подрельсового основания при малой толщине пневмобаллона. Данная особенность нивелируется при увеличении толщины пневмоэлемента.

Максимальный же рост (в среднем на 8,2%) наблюдается при резком перепаде толщин пневмоэлементов.

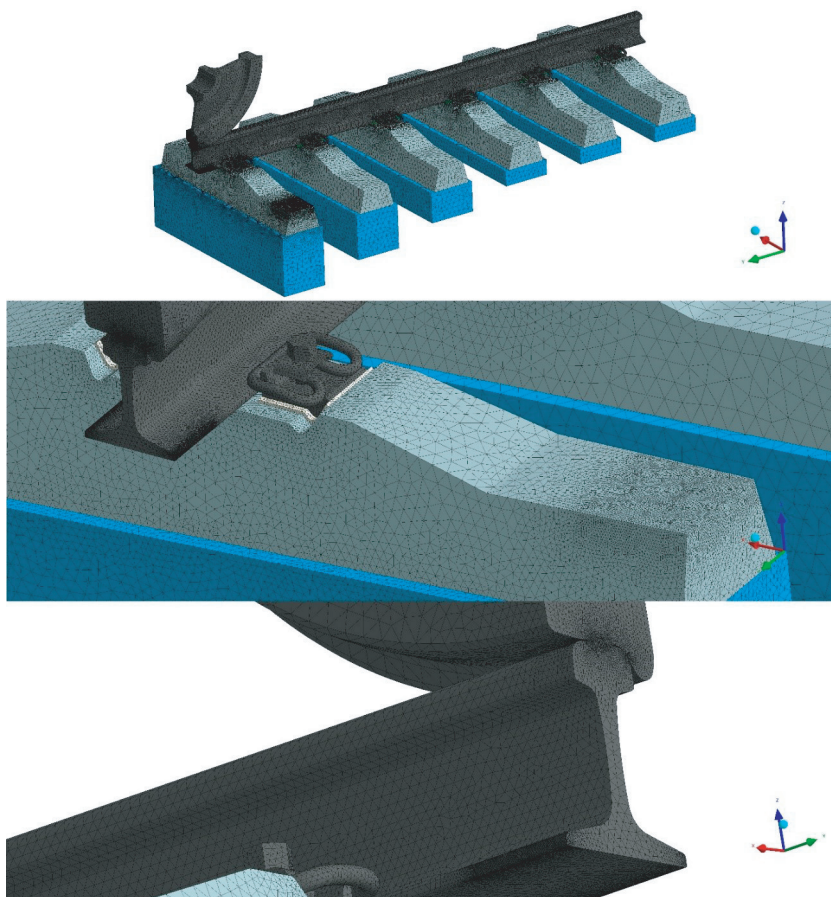


Рис. 8. Сетка элементов экспериментального участка пути с пневмоэлементами, а также сгущение в областях оценки напряженно-деформированного состояния

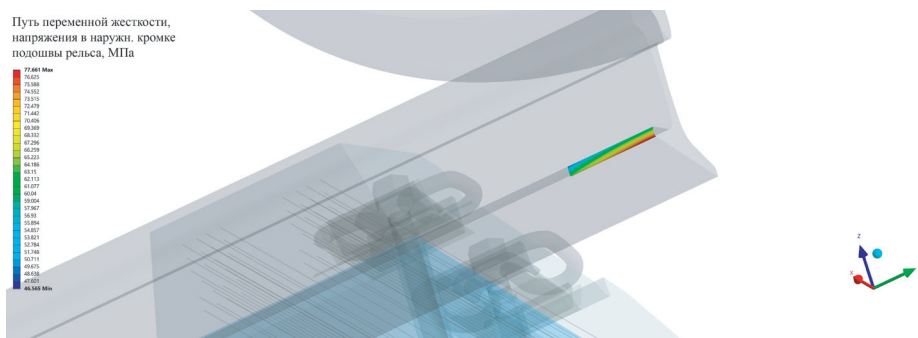


Рис. 9. Напряжения в наружной кромке подошвы рельса железнодорожного пути переменной жесткости

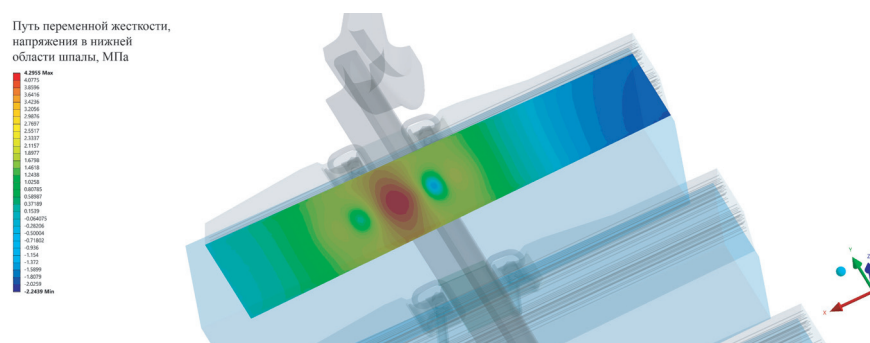


Рис. 10. Напряжения в нижней области шпалы железнодорожного пути переменной жесткости

3. Малая толщина пневмобаллона снижает прогиб шпалы за счет большей жесткости, вызывая уменьшение механических напряжений в средней верхней области шпалы на 34 %, в нижней части шпалы — на 15 %.

В то же время увеличение толщины пневмоэлемента до 40 см приводит к росту напряженно-деформированного состояния в верхней области шпалы на 21 %.

Следует отметить, что увеличение в процентном соотношении на 30 % и более незначительно в аспекте абсолютных значений предельных напряжений для железобетонной шпалы и составляет 1–2 МПа, что подтверждает большой запас, особенно при использовании подрельсовых устройств на участках пути с малыми скоростями.

4. Средние напряжения, возникающие в балластном слое, сопоставимы с таковыми на верхней части оболочки: максимальный рост сжимающих напряжений в данной области наблюдается при резком перепаде толщины пневмобаллона с 10 до 40 см.

5. Использование пневмоэлементов в виде подрельсового основания сопряжено с увеличением нагрузки на земляное полотно относительно типовой конструкции пути, в которой балластный слой выполняет функцию равномерного распределения нагрузки на основную площадку. Применение пневмобаллонов приводит к увеличению нагруженности грунта на величины порядка 350 кПа. Однако небольшой период воздействия, а также малое количество циклов нагрузка-разгрузка пути оперативного развертывания компенсирует эту особенность распределения усилий.

6. Оценка уровня напряжений пути оперативного развертывания в совокупности со сравнительным анализом относительно типовой конструкции пути не выявил ограничений на применение данной конструкции пути с точки зрения допустимого напряженного состояния. 

Литература

1. Расчеты и проектирование железнодорожного пути: учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта / В. В. Виноградов [и др.]; под ред. В. В. Виноградова, А. М. Никонова. - Москва : Маршрут, 2003. - 485 с. - Текст : непосредственный.
2. Вериго, М. Ф. Имитационное моделирование сил взаимодействия экипажа и пути / М. Ф. Вериго, Г. И. Петров, В. В. Хусидов. - Текст : непосредственный // Бюллетень ОСЖД. - Варшава. - 1995. - № 6. - С. 3-8.
3. 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.
4. Альбом элементов и конструкций верхнего строения железнодорожного пути ; утвержден Главным инженером Управления пути и сооружений Центральной дирекции инфраструктуры - филиала ОАО «РЖД» В. М. Ермаковым 19.12.2012. - 228 с. : Трудовой десант : [сайт]. - URL: www.tdesant.ru/info/item/131. - Текст : электронный.
5. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при различных условиях эксплуатации на основе моделирования методом конечных элементов / А. Ю. Абдурашитов, Д. В. Овчинников, В. П. Сычев, А. В. Сычева. - Текст : непосредственный // Известия Транссиба. - 2023. - № 1 (53). - С. 62-73.
6. Ralls life cycle evaluation depending on the operating conditions / V.P. Sychev; D.V. Ovchinnikov; A.Yu. Abdurashitov; V.A. Pokatsky; A.V. Sycheva // International Transport Scientific Innovation : ITSI-2021: AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2476, № 1. 020010. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0104545>.
7. Овчинников, Д. В. 3D-моделирование напряженно-деформированного состояния элементов пути / Д. В. Овчинников. - Текст : непосредственный // Железнодорожный транспорт. - 2023. - № 3. - С. 50-53. - EDN: YIKCZQ.
8. Патент № 2750544 Российская Федерация, МПК E01B 23/00 (2006.01) ; E01B 29/02 (2006.01). Способ оперативного развертывания железнодорожного пути и устройство подрельсового основания: № 2020132129 : заявлено 29.09.2020 : опубликовано 29.06.2021 / Сычева А. В. ; Общество с ограниченной ответственностью Вагонпутьмашпроект. - 12 с.: ил. - Текст : непосредственный.
9. Кристенсен, Ричард. Введение в теорию вязкоупругости / пер. с англ. М. И. Рейтмана ; под ред. Г. С. Шапиро. - Москва : Мир, 1974. - 338 с. - Текст : непосредственный.
10. Патент № 2746554 Российская Федерация, МПК E01B 3/00 (2006.01), E01B 3/20 (2006.01) , E01B 3/46 (2006.01). Подрельсовое устройство железнодорожного пути и способ укладки по меньшей мере одного подрельсового устройства железнодорожного пути : № 2020124286 : заявлено 22.07.2020 : опубликовано 15.04.2021 / Сычев В. П., Локтев А. А., Сычева А. В., Кузнецова Н. В., Сычев П. В. ; Общество с ограниченной ответственностью «Вагонпутьмашпроект». - 20 с.: ил. - Текст : непосредственный.
11. Локтев, А. А. Решение задачи равенства деформаций вязких и упругих элементов подрельсового основания железнодорожного пути / А. А. Локтев, А. В. Сычева, В. П. Сычев. - Текст : непосредственный // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. - 2022. - Т. 18. - С. 62-71.
12. Патент № 2785239 Российская Федерация МПК E01B 23/00 (2006.01), E01B 23/08 (2006.01). Железнодорожный путь оперативного развертывания и способ регулирования рельсовой нити по уровню и в плане : № 2022111528 : заявлено 27.04.2022 : опубликовано 05.12.2022 / Сычев В. П., Локтев А. А., Сычева А. В., Чистый Ю. А., Сычев П. В., Потапов А. В. ; Общество с ограниченной ответственностью «Вагонпутьмашпроект». - 12 с. : ил. - Текст : непосредственный.