

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 625.031.1

DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-1-9-17

EDN: <https://elibrary.ru/oraqoa>**ВЛИЯНИЕ ПОДУКЛОНКИ РЕЛЬСОВ НА КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ДАВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ «КОЛЕСО — РЕЛЬС»****Д. И. Галлямов✉, Д. В. Овчинников**Самарский государственный университет путей сообщения,
Самара, Российская Федерация**АННОТАЦИЯ**

Введение. Актуальной задачей сегодня является оптимизация взаимодействия подвижного состава и железнодорожного пути. Ее решение позволит увеличить скорость движения поездов, повысить безопасность и срок службы колес и рельсов. На срок службы колес и рельсов значительное влияние оказывают контактные напряжения и давления. Их величина зависит от геометрии колеи, в том числе и от подуклонки рельсов, пятна контакта и упругих свойств контактирующих элементов.

Материалы и методы. Проанализировано влияние подуклонки рельсов на контактные напряжения и давления в системе «колесо — рельс» при различном усилии воздействия колес подвижного состава, а также проведена оценка влияния упругости подрельсового основания на деформации и напряжения в пятне контакта без учета изменения силовых параметров взаимодействия пути и подвижного состава при изменении общей жесткости пути. То есть в этой работе величины усилий, передаваемых от колес подвижного состава на рельсы, являются исходными данными для определения напряженно-деформированного состояния системы «колесо — рельс». Для проведения анализа была разработана конечно-элементная модель для расчета напряженно-деформированного состояния системы «колесо — рельс» при различной степени уплотнения подрельсового основания. Исходя из анализа полученных расчетных данных сделаны выводы о влиянии упругости подрельсового основания и подуклонки на контактные напряжения и давления в системе «колесо — рельс». Также проведена оценка влияния подуклонки рельсов на напряженно-деформированное состояние системы «колесо — рельс» при отклонениях от нормативного положения в пределах допускаемых норм.

Результаты. Результаты расчета демонстрируют, что изменение упругости подрельсового основания слабо влияет на контактные давления и напряжения (без учета влияния на непосредственные силовые характеристики взаимодействия подвижного состава и пути). При этом изменения подуклонки в пределах допускаемых значений от 1/12 до 1/60 приводят к превышению контактными напряжениями предела текучести рельсовой стали, что является одной из причин снижения долговечности материала и, как следствие, уменьшения срока службы рельсов с одновременным возрастанием риска хрупкого излома в зоне экстремальных механических напряжений.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты расчета демонстрируют необходимость контроля такого параметра рельсовой колеи, как подуклонка, так как изменение напряженно-деформированного состояния рельсов вследствие изменения подуклонки влияет на срок их службы и безопасность движения в целом. Для контроля этого параметра предлагается использовать автоматизированные и ручные средства диагностики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: подуклонка рельсов, упругость рельсового основания, контактные давления, контактные напряжения, срок службы рельсов, метод конечных элементов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Галлямов Д. И., Овчинников Д. В. Влияние подуклонки рельсов на контактные напряжения и давления в системе «колесо — рельс» // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2023. Т. 82, № 1. С. 9–17. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-1-9-17>.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625.031.1

DOI: 10.21780/2223-9731-2023-82-1-9-17

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



EFFECTS OF RAIL CANTING ON THE CONTACT STRESS AND PRESSURE IN THE WHEEL – RAIL SYSTEM

Damir I. Gallyamov✉, Dmitriy V. Ovchinnikov

Samara State Transport University,
Samara, Russia

ABSTRACT

Introduction. An urgent task today is to optimise the interaction between rolling stock and the railway track. A solution to it will increase train speed, enhance the safety and service life of wheels and rails. The service life of wheels and rails is under significant influence of contact stress and pressures. Their magnitude depends on the track geometry, including rail canting, contact spot and elastic properties of the contacting elements.

Materials and methods. The authors analysed the effects of rail canting on contact stress and pressure in the wheel–rail system at various loads from the rolling stock wheels, and assessed the effects of the underrail base elasticity on deformation and stress in the contact spot ignoring the force interaction between the track and the rolling stock when the overall stiffness of the track changes. Thus, this work sets the magnitude of the forces transmitted from the wheels of the rolling stock to the rails as the input data for determining the stress-strain state of the wheel–rail system. For the analysis, the authors developed a finite element model for calculating the stress-strain state of the wheel–rail system at various compaction degrees of the underrail base. The analysis of the obtained calculated data led to conclusions about the influence of the underrail base elasticity and the canting on the contact stresses and pressures in the wheel–rail system. The authors also assessed the effects of rail canting on the stress-strain state of the wheel–rail system for deviations from the standard position within the allowed limits.

Results. The calculation results show that the change in the underrail base elasticity has a weak effect on contact pressures and stresses (excluding the effect on the immediate force interaction of the rolling stock and the track). At the same time changes in the canting within the allowable values from 1/12 to 1/60 causes the contact stresses to exceed the yield strength of the rail steel, which, among other reasons, reduces the durability of the material and, as a result, reduces the service life of the rails, and, at the same time, increases the risk of brittle fracture in the area of extreme mechanical stress.

Discussion and conclusion. The obtained results of the calculation show that such a parameter of the rail track as canting requires control, since a change in the stress-strain state of the rails due to a change in canting affects their service life and traffic safety in general. It is suggested to automated and manual diagnostic tools to monitor this parameter.

KEYWORDS: rail canting, underrail base elasticity, contact pressures, contact stress, rail service life, finite element method

FOR CITATION: Gallyamov D. I., Ovchinnikov D. V. Effects of rail canting on the contact stress and pressure in the wheel–rail system. *Russian Railway Science Journal*. 2023;82(1):9-17. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2023-82-1-9-17>.

Введение. Согласно Стратегии научно-технологического развития ОАО «РЖД» на период до 2030 г. одним из приоритетных направлений является разработка и внедрение технических средств и технологий организации высокоскоростного, скоростного и тяжеловесного движения при обеспечении оптимального взаимодействия подвижного состава и элементов инфраструктуры [1].

Под взаимодействием подвижного состава и инфраструктуры понимаются параметры взаимодействия системы «колесо — рельс», оказывающие влияние на вертикальную и поперечную динамику подвижного состава, предельно допустимые нагрузки на ось, а также срок службы колес и рельсов.

Контактирование колеса и рельса происходит по крайне малой, по сравнению с размером колес и рельсов, площадке, называемой пятном контакта. Материал под пятном и вокруг него находится в условиях объемно-напряженного состояния.

Впервые решение задачи о контактных напряжениях и деформациях было получено Г. Герцем в 1881–1882 гг. на основе методов теории упругости [2].

Исходя из решения нормальной задачи Герца максимальное напряжение $P_{\max}$ может быть рассчитано по формуле

$$P_{\max} = \sqrt[3]{\frac{3FE^2}{2\pi^3 r_e^2 (1-\varepsilon^2)^2}},$$

где F — нормальная сила нагружения колеса и рельса; E — модуль упругости; ε — коэффициент Пуассона; r_e — эквивалентный радиус, зависящий от характерных радиусов взаимодействия колеса и рельса в месте контакта.

Интенсивность напряжений в области контакта зависит от величины приложенной силы, а также от формы контактирующих поверхностей и свойств материалов [3].

Верхнее строение пути при прохождении подвижного состава работает как единая система, и каждый ее элемент обеспечивает упругую передачу нагрузки на нижележащие элементы. Упругие свойства подрельсового основания меняются вследствие изнашивания и смятия материала полимерных прокладок, ослабления сил прижатия рельса к подрельсовым опорам, а также изменения степени уплотнения балластного слоя, что в итоге оказывает влияние на распределение давления в пятне контакта.

В данной работе проводится анализ влияния параметров упругости подрельсового основания на контактные напряжения и давления в системе «колесо — рельс» в зависимости от типа промежуточного скрепления и подуклонки рельса с помощью метода конечных элементов.

Материалы и методы. Для решения этой задачи авторами была разработана объемная конечно-элементная модель с полным геометрическим подобием натурных конструкций (рис. 1) и проведен расчет напряженно-деформированного состояния при взаимодействии колеса и рельса с учетом упругости подрельсового основания для различных значений подуклонки, а также положения колеса относительно рельса.

Метод конечных элементов (МКЭ) — численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твердого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики [4–9]. На железнодорожном транспорте МКЭ применяется для решения задач путевого комплекса, подвижного состава [10–12], а также систем обеспечения движения поездов [13, 14].

Мощность модели составляет более 450 тыс. узлов. В зоне контакта сетка элементов заметно сгущается (размер элемента — 1 мм) для более точного отображения интенсивности напряжений. При расчетах использованы следующие параметры:

- диаметр вагонного колеса — 950 мм;
- нагрузка на ось — 10, 20 и 30 тс;
- положение оси колеса — вертикальное;
- наклон оси рельса — 1/20, 1/12 и 1/60;
- ширина колеи — 1520, 1514 и 1530 мм соответственно;
- типы промежуточных скреплений — КБ-65, ЖБР-Ш, APC-4 и Vossloh W-30.

Положение колеса на рельсе задано шириной колеи и подуклонкой рельса. Значения ширины колеи для подуклонки 1/12 и 1/60 получены путем наклона рельса относительно середины подошвы (рис. 2).

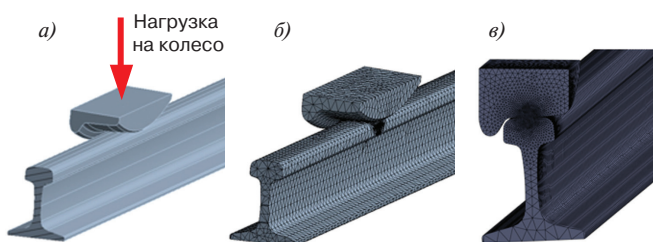


Рис. 1. Объемная конечно-элементная модель:
а — трехмерная модель колеса и рельса; б — конечно-элементная модель колеса и рельса; в — сгущение элементной сетки в зоне контакта колеса и рельса

Fig. 1. A volumetric finite element model:
а — a 3D wheel and rail model; б — a finite element model of wheel and rail; в — condensation of the elemental mesh in wheel and rail contact zone

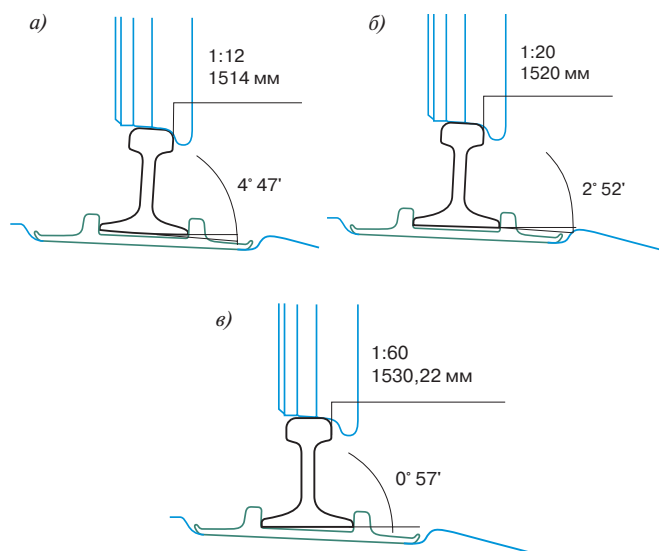


Рис. 2. Изменение ширины колеи и положения колеса при изменении подуклонки рельсов:
а — 1/12; б — 1/20; в — 1/60

Fig. 2. Rail gauge and wheel position change during the rail canting change:
а — 1/12; б — 1/20; в — 1/60

Для упрощения расчетного процесса решения данной задачи в модели была осуществлена замена элементов промежуточных креплений, балластного слоя и земляного полотна на упругие элементы с помощью инструмента «Втулочное соединение». Данный вид соединения позволяет задать параметры жесткости

на перемещение и кручение по осям в прямоугольной системе координат, что дает возможность уменьшить количество твердотельных элементов (в том числе нелинейных) без потери точности выходных данных. В качестве задаваемой характеристики данный инструмент использует жесткость, измеряемую в ньютонах на метр.

В результате рельс опирается подошвой на упругое основание, жесткость которого соответствует жесткости реального подрельсового основания, и контактирует с ним в тех же точках, что и со шпалами при эпюре 2000 шт./км (рис. 3).

Жесткость упругих элементов для каждого типа крепления определяется моделированием воздействия вертикальной силы на поверхность катания рельса. Полученные результаты прогиба рельса сравниваются с результатами расчета, представленного в [3, табл. 1]. Соответствие значения прогиба рельса при заданной нагрузке в табл. 1 и 2 свидетельствует о правильно определенной жесткости упругих элементов.

Результаты исследования. Полученные в результате расчета контактных напряжений и давлений данные представлены в табл. 3 и на рис. 4.

Влияние упругости подрельсового основания на изменение контактных напряжений и давлений представлено в табл. 4.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что изменение упругости подрельсового основания и тип промежуточного крепления не оказывают существенного влияния на контактные напряжения и давления, возникающие в системе «колесо — рельс»: снижение величин эквивалентных напряжений не

Таблица 1

Прогиб рельса и упругость подрельсового основания, полученные в среде конечно-элементного анализа

Table 1

Rail deflection and underrail base elasticity obtained in the finite element analysis environment

Тип крепления, показатель	Уплотненный грунт и балласт при нагрузке на ось, тс			Неуплотненный грунт и балласт при нагрузке на ось, тс		
	10	20	30	10	20	30
Тип крепления	КБ-65					
Прогиб рельса (y), мм	0,56	1,11	1,65	1,02	2,04	3,06
Модуль упругости (U), МПа	51,9	51,9	51,9	23,7	23,7	23,7
Тип крепления	ЖБР-Ш					
Прогиб рельса (y), мм	0,41	0,82	1,23	0,85	1,75	2,66
Модуль упругости (U), МПа	77,7	77,7	77,7	28,7	28,7	28,7
Тип крепления	АРС-4					
Прогиб рельса (y), мм	0,41	0,82	1,23	0,84	3,39	4,28
Модуль упругости (U), МПа	78,1	78,1	78,1	18,8	18,8	18,8
Тип крепления	Vossloh W-30					
Прогиб рельса (y), мм	0,37	0,74	1,11	0,83	1,74	2,66
Модуль упругости (U), МПа	88,9	88,9	88,9	29,1	29,1	29,1

Таблица 2

Жесткость упругих элементов при использовании втулочного соединения

Table 2

Stiffness of elastic elements when using a sleeve connection

Тип скрепления, показатель	Уплотненный грунт и балласт при нагрузке на ось, тс			Неуплотненный грунт и балласт при нагрузке на ось, тс		
	10	20	30	10	20	30
Тип скрепления	КБ-65					
Прогиб рельса (y), мм	0,56	1,11	1,65	1,02	2,04	3,06
Жесткость упругих элементов (k), кН/мм	13,4	13,4	13,4	5,18	5,35	5,23
Тип скрепления	ЖБР-Ш					
Прогиб рельса (y), мм	0,41	0,82	1,23	0,85	1,75	2,66
Жесткость упругих элементов (k), кН/мм	21,65	21,65	21,65	6,9	6,6	6,5
Тип скрепления	АРС-4					
Прогиб рельса (y), мм	0,41	0,82	1,23	0,84	3,39	4,28
Жесткость упругих элементов (k), кН/мм	21,65	21,65	21,65	7,0	2,5	3,2
Тип скрепления	Vossloh W-30					
Прогиб рельса (y), мм	0,37	0,74	1,11	0,83	1,74	2,66
Жесткость упругих элементов (k), кН/мм	25,65	25,65	25,65	7,15	6,65	6,5

Таблица 3

Контактные напряжения и давления в рельсе при подклонке 1/20

Table 3

Rail contact stresses and pressures at 1/20 canting

Тип промежуточного рельсового скрепления	Уплотненный грунт и балласт при нагрузке на ось, тс			Неуплотненный грунт и балласт при нагрузке на ось, тс		
	10	20	30	10	20	30
Контактные напряжения в головке рельса (σ), МПа						
КБ-65	396,18	507,35	586,00	392,66	500,96	576,63
ЖБР-Ш	397,7	510,29	589,96	393,74	502,4	578,74
АРС-4	397,7	510,29	589,96	393,79	494,92	571,01
Vossloh W-30	398,22	511,29	591,3	394,89	502,45	578,74
Контактные давления на поверхности катания (p), МПа						
КБ-65	660,84	862,8	1006,1	661,3	863,38	1006,1
ЖБР-Ш	660,65	862,56	1005,8	661,06	863,08	1005,8
АРС-4	660,65	862,56	1005,8	661,05	864,37	1005,9
Vossloh W-30	660,61	862,51	1005,7	662,39	863,07	1005,8

превышает в среднем 2%. Следует отметить, что жесткость пути в целом воздействует на динамические характеристики взаимодействия пути и подвижного состава, т. е. оказывает значительное влияние на итоговые усилия, передаваемые от колеса на рельс. Однако в рамках этой работы параметры силового воздействия являются исходными данными для определения напряженно-деформированного состояния системы «колесо — рельс», и вопрос влияния упругости рельсового основания ставился исключительно с точки

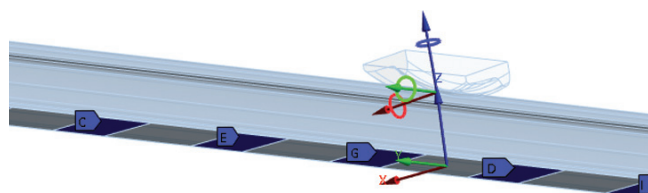


Рис. 3. Плоскости приложения упругих элементов к подошве рельса

Fig. 3. Planes of application of elastic elements to the rail foot

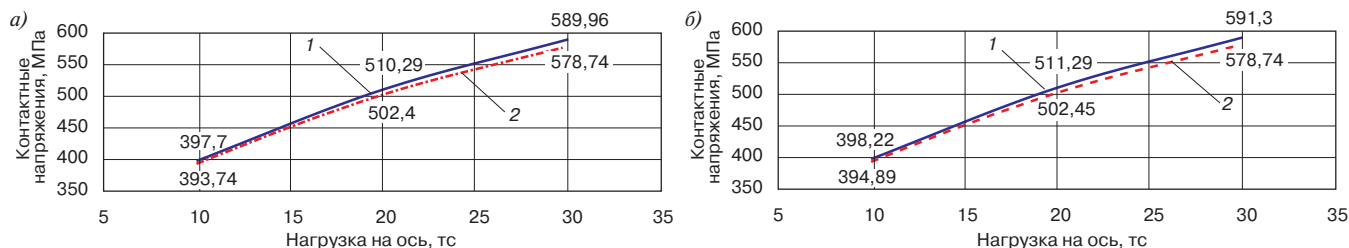


Рис. 4. Влияние упругости подрельсового основания на контактные напряжения:
а — скрепление ЖБР-Ш; б — скрепление Vossloh W-30: 1 — уплотненное основание; 2 — неуплотненное основание

Fig. 4. Effects of the underrail base elasticity on the contact stresses:
а — ZhBR-Sh fastening; б — Vossloh W-30 fastening: 1 — compacted base; 2 — uncompacted base

Таблица 4

Влияние упругости подрельсового основания на контактные напряжения и давления в рельсе

Table 4

Effects of the underrail base elasticity on the rail contact stresses and pressures

Тип промежуточного рельсового скрепления	Рост или снижение (–) контактных напряжений при нагрузке на ось, тс			Рост или снижение (–) контактных давлений при нагрузке на ось, тс		
	10	20	30	10	20	30
КБ-65	0,89 %	1,26 %	1,60 %	0,07 %	0,07 %	0 %
ЖБР-Ш	1 %	1,55 %	1,90 %	0,06 %	0,06 %	0 %
АРС-4	0,98 %	3,01 %	3,21 %	0,06 %	0,02 %	0,01 %
Vossloh W-30	0,84 %	1,73 %	2,12 %	0,27 %	0,06 %	0,01 %

зрения оценки контактных давлений и напряжений при единообразных силовых параметрах взаимодействия колеса и рельса.

В связи с тем, что изменение упругости подрельсового основания слабо влияет на контактные напряжения и давления, расчет для подуклонки 1/12 и 1/60 был проведен только для уплотненного основания. Результаты представлены в табл. 5 и на рис. 5, 6.

Рост контактных напряжений и давлений в головке рельса приводит к изменению его напряженно-деформированного состояния, что негативно сказывается на сроке службы [15] посредством увеличения износа [16], образования поперечных усталостных трещин в головке в виде светлого или темного пятна, приводящих к отказу рельса до пропуска гарантийного тоннажа [17–20].

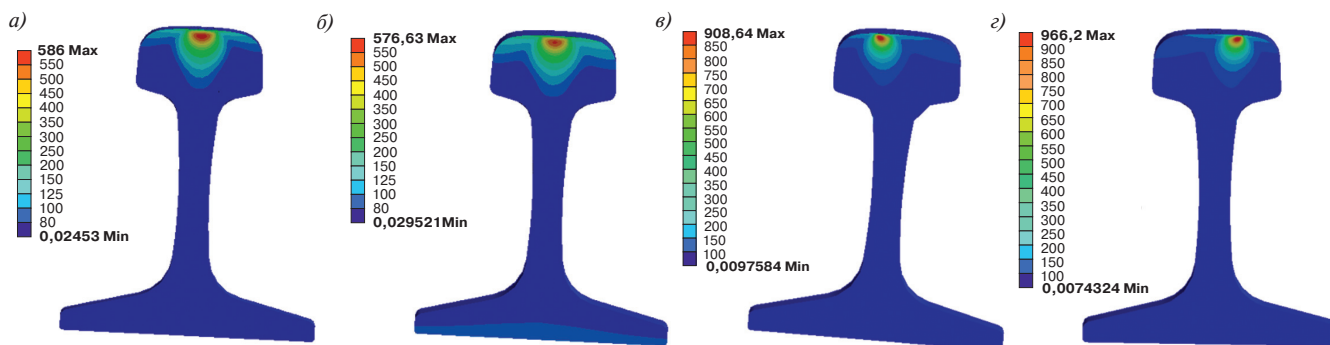


Рис. 5. Контактные напряжения в головке рельса при нагрузке на ось 30 тс:
а — подуклонка 1/20, уплотненное основание; б — подуклонка 1/20, неуплотненное основание; в — подуклонка 1/12, уплотненное основание; г — подуклонка 1/60, уплотненное основание

Fig. 5. Railhead contact stresses at 30 tf axial load:
а — 1/20 canting, compacted base; б — 1/20 canting, uncompacted base; в — 1/12 canting, compacted base; г — 1/60 canting, compacted base

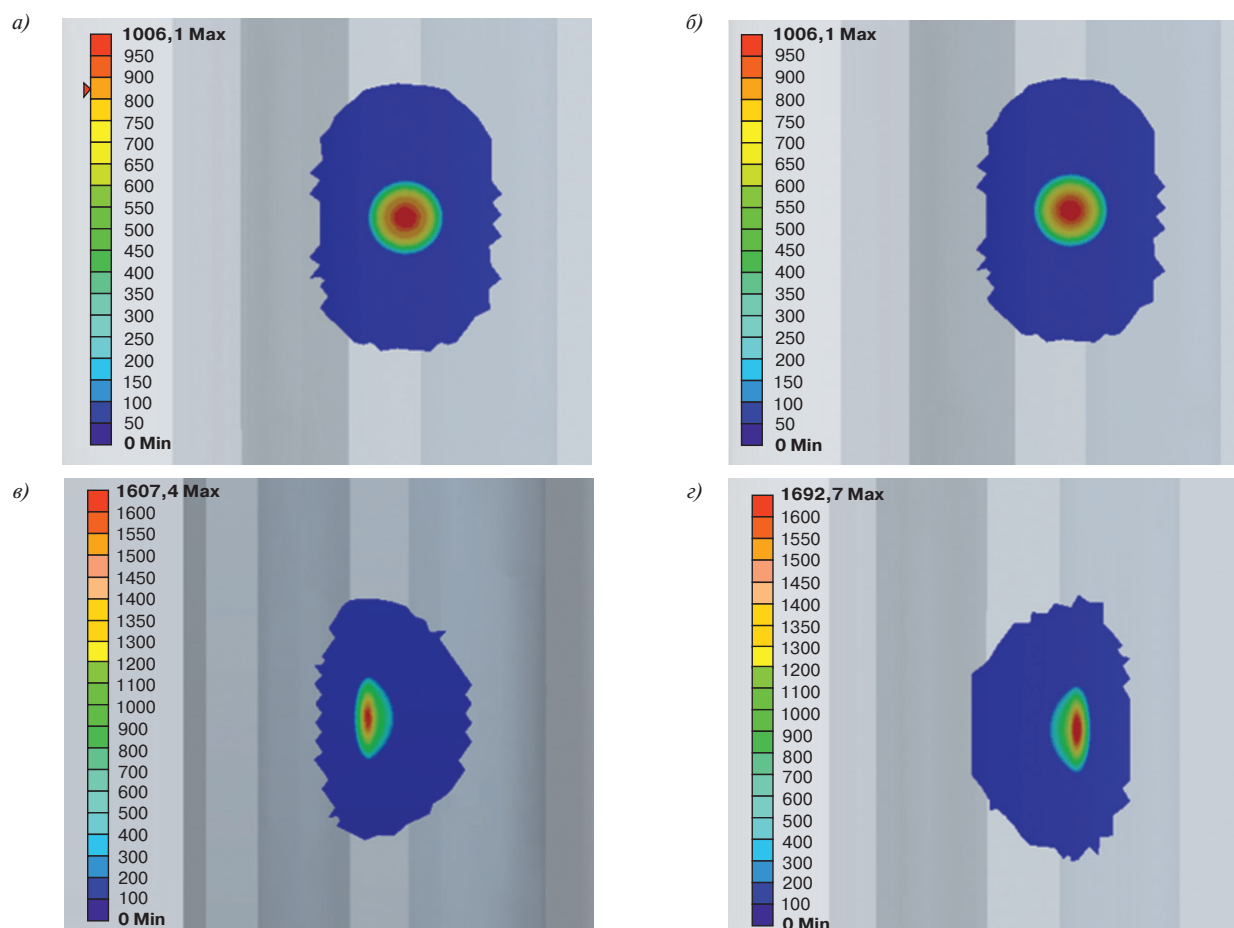


Рис. 6. Контактные давления в головке рельса при нагрузке на ось 30 тс:
 а — подуклонка 1/20, уплотненное основание; б — подуклонка 1/20, неуплотненное основание; в — подуклонка 1/12, уплотненное основание; з — подуклонка 1/60, уплотненное основание

Fig. 6. Railhead contact pressures at 30 tf axial load:
 а — 1/20 canting, compacted base; б — 1/20 canting, uncompacted base; в — 1/12 canting, compacted base; з — 1/60 canting, compacted base

Таблица 5

Контактные напряжения и давления в рельсе при подуклонке 1/12 и 1/60

Table 5

Rail contact stresses and pressures at 1/12 and 1/60 canting

Тип промежуточного рельсового крепления	Подуклонка 1/12, уплотненный грунт и балласт при нагрузке на ось, тс			Подуклонка 1/60, уплотненный грунт и балласт при нагрузке на ось, тс		
	10	20	30	10	20	30
Контактные напряжения в головке рельса (σ), МПа						
КБ-65	638,85	794,52	908,64	689,63	848,93	966,2
ЖБР-Ш	639,99	796,68	911,39	690,88	851,09	969,16
АРС-4	639,99	796,68	911,39	690,88	851,09	969,16
Vossloh W-30	640,37	797,4	912,29	691,01	851,82	970,07
Контактные давления на поверхности катания (p), МПа						
КБ-65	1075	1389,4	1607,4	1146,1	1468,3	1692,7
ЖБР-Ш	1075	1389,5	1607,6	1146	1468,7	1693,6
АРС-4	1075	1389,5	1607,6	1146	1468,7	1693,6
Vossloh W-30	1075	1389,5	1607,6	1145,6	863,07	1005,8

Заключение. 1. Разработана и апробирована конечно-элементная модель для расчета напряженно-деформированного состояния системы «колесо — рельс» при различной степени уплотнения подрельсового основания.

2. Проведены расчеты эквивалентных напряжений и контактных давлений, возникающих при взаимодействии колеса и рельса при различных исходных данных: жесткость основания, подуклонка, положение колеса.

3. Результаты показывают, что изменение упругости подрельсового основания слабо влияет на контактные напряжения и давления: максимальное снижение уровня напряжений не превышает 3,21%. Таким образом, установлено, что уплотненность подрельсового основания и тип промежуточных скреплений не оказывают существенного влияния на контактные напряжения и давления в контексте условия единообразности параметров силового взаимодействия колеса и рельса, т. е. без учета влияния упругости рельсового основания непосредственно на силовые динамические характеристики взаимодействия пути и подвижного состава.

4. Значимыми факторами, влияющими на уровень напряженно-деформированного состояния системы «колесо — рельс», являются подуклонка рельса и ширина колеи (положение колеса относительно рельса). При изменении подуклонки в пределах допускаемых значений от 1/12 до 1/60 контактные напряжения могут превышать предел текучести рельсовой стали, что является одной из причин снижения долговечности материала и, как следствие, уменьшения срока службы рельсов с одновременным возрастанием риска хрупкого излома в зоне экстремальных механических напряжений.

Полученные результаты расчета демонстрируют необходимость усиления контроля за геометрией рельсовой колеи, в том числе за подуклонкой, так как значительное увеличение эквивалентных контактных напряжений в рельсах вследствие отклонения подуклонки даже в рамках допускаемых значений оказывает существенное влияние на срок их службы и безопасность движения в целом.

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

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

Финансирование: исследование было выполнено в рамках научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Влияние подуклонки рельсов на условия взаимодействия колеса и рельса с разработкой прибора определения статического угла наклона рельса» (Росжелдор № 122022200418-2).

Funding: the study was carried out as part of the research and development work “Effects of rail canting on wheel and rail inter-

action and the development of a device for determining the static angle of the rail” (Roszheldor No. 122022200418-2).

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 ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [Электронный ресурс]: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/DkdcT7dHs4fGLrhkK5lk0egvr4rA2QZi.pdf> (дата обращения: 18.09.2022) [*Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda* [The Strategy of Rail Transport Development in the Russian Federation until 2030]. Approved by the Order of the Government of the Russian Federation dated June 17, 2008 No. 877-r. (In Russ.). URL: <http://static.government.ru/media/files/DkdcT7dHs4fGLrhkK5lk0egvr4rA2QZi.pdf> (accessed: 18.09.2022)].
2. Тимошенко С.П., Гудьер Дж.Н. Теория упругости / пер. с англ. М.И. Рейтмана. М.: Наука, 1975. 576 с. [Timoshenko S.P., Goodier J.N. *Theory of Elasticity*. Transl. from Eng. by M.I. Reytman. Moscow: Nauka; 1975. 576 p. (In Russ.)].
3. Овчинников Д.В., Покацкий В.А., Галлямов Д.И. Определение модуля упругости подрельсового основания железнодорожного пути методом конечных элементов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2019. Т. 1. С. 585–591 [Ovchinnikov D.V., Pokatskiy V.A., Gallyamov D.I. *Opredelenie modulya uprugosti podrel'sovogo osnovaniya zheleznodorozhnogo puti metodom konechnykh elementov* [Determining the elasticity module of the rail base using the finite element method]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona*. 2019;1:585-591. (In Russ.)].
4. Корнеев В.Г. Схемы метода конечных элементов высоких порядков точности. Л.: Изд-во Лен. ун-та, 1977. 206 с. [Korneev V.G. *Skhemy metoda konechnykh elementov vysokikh poradykov tochnosti* [High accuracy finite element method diagrams]. Leningrad: Leningrad University Publishing; 1977. 206 p. (In Russ.)].
5. Мышкова И.А. Теоретические основы расчета стержневых конструкций методом конечных элементов: метод. указания. Иркутск: ИрИИТ, 2002. 44 с. [Myshkova I.A. *Teoreticheskie osnovy rascheta stержnevyykh konstruktсий metodom konechnykh elementov: metod. ukazaniya* [Theoretical foundations for the calculation of bar structures using the finite element method: guidelines]. Irkutsk: IrIIT; 2002. 44 p. (In Russ.)].
6. Розин Л.А. Метод конечных элементов в применении к упругим системам. М.: Стройиздат, 1977. 128 с. [Rozin L.A. *Metod konechnykh elementov v primeneni k uprugim sistemam* [The finite element method applied to elastic systems]. Moscow: Stroyizdat; 1977. 128 p. (In Russ.)].
7. Сабоннадье Ж.-К. Метод конечных элементов и САПР / пер. с фр. В.А. Соколова, М.Б. Блеер. М.: Мир, 1989. 190 с. [Sabonnadiere J.-C. *Metod konechnykh elementov i SAPR* [The finite element method and CAD]. Transl. from French by V.A. Sokolov, M.B. Bleyer. Moscow: Mir; 1989. 190 p. (In Russ.)].
8. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / пер. с англ. А.А. Шестакова. М.: Мир, 1979. 392 с. [Segerlind L. *Primenenie metoda konechnykh elementov* [Application of the finite element method]. Transl. from Eng. by A.A. Shestakov. Moscow: Mir; 1979. 392 p. (In Russ.)].
9. Синицын А.П. Метод конечных элементов в динамике сооружений. М.: Стройиздат, 1978. 230 с. [Sinityn A.P. *Metod konechnykh elementov v dinamike sooruzheniy* [The finite element

method in structural dynamics]. Moscow: Stroyizdat; 1978. 230 p. (In Russ.).

10. Peng D., Jones R., Constable T. Tools and methods for addressing the durability of rolling stock. *Engineering Failure Analysis*. 2013;34:278-289. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.08.011>.

11. Расчет назначенного срока службы цельнокатаных колес железнодорожного подвижного состава по критерию надежности / А.А. Воробьев [и др.] // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. Т. 18, № 1. С. 121–131 [Vorob'ev A. A., Fedorov I. V., Chistyakov E. Yu., Abduganiev T. R., Glukhov A. E. Calculation of the design life of solid-rolled wheels of railway rolling stock according to the criterion of reliability. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2021;18(1):121-131. (In Russ.).] <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2021-1-121-131>.

12. Иванов П. Ю., Агафонов В. М., Дульский Е. Ю. Математическое моделирование процесса нагрева изоляции обмотки статора асинхронной вспомогательной машины электровоза // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 183–189 [Ivanov P. Yu., Agafonov V. M., Dul'skiy E. Yu. Mathematical modeling of the process of heating of stator winding insulation of electric locomotive's asynchronous auxiliary machine. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. 2016;1(49):183-189. (In Russ.).]

13. Кудряшов Е. В., Заренков С. В., Ходунова О. А. Метод расчета эластичности контактной подвески на основе простой конечно-элементной модели. Измерения эластичности // Известия Транссиба. 2011. № 4 (8). С. 16–26 [Kudryashov E. V., Zarenkov S. V., Khodunova O. A. Metod rascheta elastichnosti kontaktnoy podveski na osnove prostoyn konechno-elementnoy modeli. Izmereniya elastichnosti [A method for calculating the elasticity of a contact suspension based on a simple finite element model. Elasticity measurements]. *Izvestiya Transsiba*. 2011;4(8):16-26. (In Russ.).]

14. Залесова О. В., Якубович М. В. Расчет наведенного напряжения на отключенной ЛЭП с помощью программы FEMM // Труды Кольского научного центра РАН. 2011. № 1 (4). С. 37–42 [Zalesova O. V., Yakubovich M. V. Calculation of induced voltage in deenergized transmission line by FEMM program. *Transactions Kola Science Centre*. 2011;1(4):37-42. (In Russ.).]

15. Методика определения ресурса железнодорожного пути в зависимости от условий его эксплуатации / В.П. Сычев [и др.] // Наука и техника транспорта. 2021. № 3. С. 44–50 [Sychev V. P., Ovchinnikov D. V., Abdurashitov A. Yu., Sycheva A. V. Procedure for determining railway track life depending on its operating conditions. *Science and Technology in Transport*. 2021;3:44-50. (In Russ.).] https://doi.org/10.53883/20749325_2021_03_44.

16. Абдурашитов А. Ю., Покацкий В. А., Тарасов А. В. Влияние профилей контактирующих поверхностей системы колесо—рельс на интенсивность износа головки рельсов в кривых участках пути // Повышение эффективности и надежности работы рельсов: сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ» / под ред. А. Ю. Абдурашитова. М.: Интекст, 2011. С. 61–64 [Abdurashitov A. Yu., Pokatskiy V. A., Tarasov A. V. Vliyanie profiley kontaktiruyushchikh poverkhnostey sistemy koleso—rel's na intensivnost' iznosa golovki rel'sov v krivykh uchastkakh puti [Effects of the contact surface profiles of the wheel—rail system on the wear rate of the rail head in curved sections of the track]. In: Abdurashitov A. Yu. (ed.). *Povyshenie effektivnosti i nadezhnosti raboty rel'sov: sb. nauch. tr. OAO «VNIIZhT»* [Improving the efficiency and reliability of rail operation: Coll. of scientific works of VNIIZhT]. Moscow: Intext; 2011. P. 61–64. (In Russ.).]

17. Vo K. D., Tieu A. K., Zhu H. T., Kosasih P. B. A 3D dynamic model to investigate wheel—rail contact under high and low adhesion. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2014;85:63-75. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.05.007>.

18. Daves W., Kubin W., Scheriau S., Pletz M. A finite element model to simulate the physical mechanisms of wear and crack initiation in wheel/rail contact. *Wear*. 2016;366-367:78-83. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.027>.

19. Magheri S., Malvezzi M., Meli E., Rindi A. An innovative wheel—rail contact model for multibody applications. *Wear*. 2011;271(1-2):462-471. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.038>.

20. Wen J., Marteau J., Bouvier S., Risbet M., Cristofari F., Secordel P. Comparison of microstructure changes induced in two pearlitic rail steels subjected to a full-scale wheel/rail contact rig test. *Wear*. 2022;456-457:203-354. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203354>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дамир Ильдарович ГАЛЛЯМОВ, преподаватель, кафедра «Железнодорожный путь и строительство», Самарский государственный университет путей сообщения (443066, Самарская обл., г. Самара, 1-й Безымянный пер., д. 18), Author ID: 1030630, <https://orcid.org/0000-0001-6578-6946>

Дмитрий Владиславович ОВЧИННИКОВ, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Железнодорожный путь и строительство», Самарский государственный университет путей сообщения (443066, Самарская обл., г. Самара, 1-й Безымянный пер., д. 18), Author ID: 769975, <https://orcid.org/0000-0001-8099-1374>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Damir I. GALLYAMOV, Teacher, Department of Railway Track and Construction, Samara State Transport University (443066, Samara, 18, 1st Bezmyannyy Lane), Author ID: 1030630, <https://orcid.org/0000-0001-6578-6946>

Dmitriy V. OVCHINNIKOV, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Railway Track and Construction, Samara State Transport University (443066, Samara, 18, 1st Bezmyannyy Lane), Author ID: 769975, <https://orcid.org/0000-0001-8099-1374>

ВКЛАД АВТОРОВ

Дамир Ильдарович ГАЛЛЯМОВ. Разработка математической модели, проведение расчетов, оценка результатов, текст статьи (50%).

Дмитрий Владиславович ОВЧИННИКОВ. Постановка задачи, контроль проведения исследования, разработка математической модели, проведение расчетов, оценка результатов (50%).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Damir I. GALLYAMOV. Development of a mathematical model, calculations, assessment of results, text of the article (50%).

Dmitriy V. OVCHINNIKOV. Setting up the problem, monitoring the research, developing a mathematical model, calculations, assessing the results (50%).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 14.10.2022, рецензия от первого рецензента получена 23.12.2022, рецензия от второго рецензента получена 06.12.2022, рецензия от третьего рецензента получена 16.02.2023, принята к публикации 20.02.2023.

The article was submitted 14.10.2022, first review received 23.12.2022, second review received 06.12.2022, third review received 16.02.2023, accepted for publication 20.02.2023.