

# Анализ взаимосвязи подуклонки рельсов и ширины колеи на основании данных вагонов-путеизмерителей



Дамир ГАЛЛЯМОВ



Дмитрий ОВЧИННИКОВ

Дамир Ильдарович Галлямов<sup>1</sup>,  
Дмитрий Владиславович Овчинников<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия.

✉ <sup>1</sup> [d.gallyamov@samgups.ru](mailto:d.gallyamov@samgups.ru).

## АННОТАЦИЯ

Увеличение срока службы верхнего строения пути всегда было и остаётся актуальной задачей, так как это позволяет снизить издержки на ремонт и текущее содержание пути.

Целью данной работы является определение взаимного влияния подуклонки рельсов и ширины колеи на основании результатов измерений, проведённых вагоном-путеизмерителем, а также их влияния на напряжённо-деформированное состояние рельса. Для анализа использовались статистические методы и метод конечных элементов. Используя статистические методы, было определено, что величины подуклонки и ширина колеи не имеют нормального распределения и характеризуются слабой обратной связью. Сделаны выводы о причинах данных результатов.

Для определения методом конечных элементов контактных напряжений в головке рельса на участках пути, имеющих в выборке, с различной комбинацией подуклонки

и ширины колеи, была разработана модель с полным геометрическим подобием.

Результаты, полученные в ходе расчётов, демонстрируют, что отклонение подуклонки в интервале от 1/15 до 1/30 приводит к росту напряжений более чем на 20 %, при этом изменение ширины колеи имеет слабое влияние на напряжённо-деформированное состояние головки рельса. Максимальный рост контактных напряжений на анализируемом участке составил 97 % при подуклонке 1/990 и ширине колеи 1526 мм.

Рост контактных напряжений приводит к образованию усталостных трещин и, как следствие, к образованию дефектов и замене рельса. Для увеличения срока службы рельсов рекомендуется следить за состоянием скреплений и соблюдением технологии выполнения работ по текущему содержанию, а также пересмотреть допуск отклонения подуклонки рельсов как в большую, так и в меньшую стороны.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, ширина колеи, подуклонка рельсов, контакт колеса и рельса, контактные напряжения, метод конечных элементов, срок службы рельса.

---

**Финансовая поддержка:** данная статья была написана 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» (№ 122022200418-2).

---

**Для цитирования:** Галлямов Д. И., Овчинников Д. В. Анализ взаимосвязи подуклонки рельсов и ширины колеи на основании данных вагонов-путеизмерителей // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 6 (103). С. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-6-4>.

---

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.  
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

## ВВЕДЕНИЕ

Снижение издержек в путевом хозяйстве в первую очередь связано с повышением срока службы элементов верхнего строения пути, что позволяет существенно снизить затраты, связанные с текущим содержанием пути и его ремонтами.

Наиболее дорогостоящим элементом в верхнем строении пути является рельс, таким образом, увеличение его ресурса является приоритетным направлением. 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 уровня напряжённо-деформированного состояния, вызванного, в том числе, пропущенным тоннажем [1].

Напряжённо-деформированное состояние головки рельса зависит от положения колеса относительно рельса, а также от вертикальных

и боковых сил, действующих на рельс от подвижного состава. Передача нагрузки от колёс на рельсы происходит по очень небольшой, сравнительно с размерами колёс и рельсов, площадке. Материал около этой площадки испытывает объёмное напряжённое состояние. Распределение этих напряжений, называемых контактными, весьма сложно и поддается исследованию лишь методами теории упругости [2].

Положение колеса относительно рельса в первую очередь зависит от ширины колеи и подуклонки рельса (рис. 1).

Целью данной работы является определение взаимного влияния ширины колеи и подуклонки рельсов, степень их распределения и корреляции, а также их влияние на напряжённо-деформированное состояние головки рельса.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения взаимосвязи ширины колеи и подуклонки рельсов использовались методы статистического анализа, а именно частотные гистограммы и расчёт коэффициента корреляции. Расчёт напряжённо-деформированного состояния рельса проводился с помощью метода конечных элементов, для чего была построена трёхмерная модель взаимодействия колеса и рельса с полным соответствием геометрических параметров и физико-механических свойств материала.

При анализе рассмотрен участок пути длиной 50 км. Данные о геометрии рельсовой колеи получены с помощью диагностического комплекса ЭРА, с интервалом измерений 20 см. Из выборки устранены участки пути, где из-за особенностей измерительного оборудования невозможно зафиксировать подуклонку рельсов, только ширину колеи.

Фиксация подуклонки проводилась по обеим нитям пути, в результате чего получена более детальная геометрия контакта колеса и рельса.

Выборка составляет 255307 значений, общий вид полученных данных представлен в табл. 1. Для более точного расчёта значения подуклонки переведены в угол наклона подошвы рельса, относительно плоскости подошвы шпалы.

Первичный анализ полученных данных показал, что помимо нормальной геометрии рельсовой колеи (нормальная ширина колеи (1520 мм), нормативная подуклонка рельсов (1/20)) имеют место следующие ситуации:

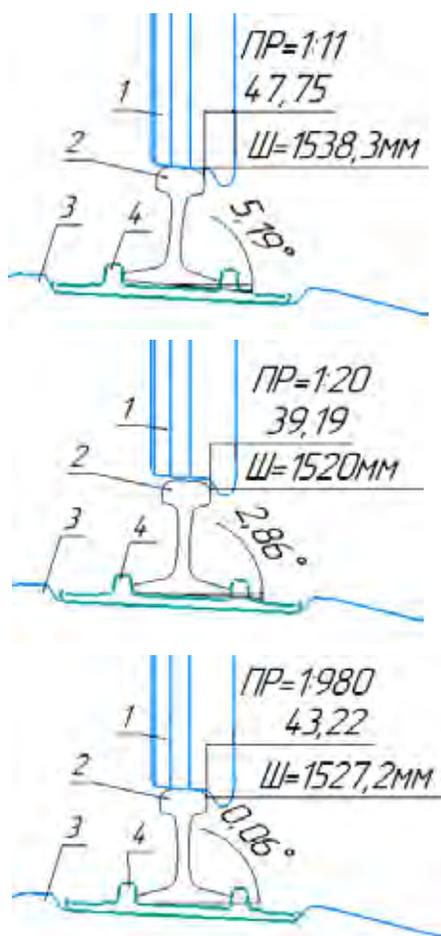


Рис. 1. Влияние ширины колеи и подуклонки на положение колеса на рельсе. 1 – колесо; 2 – рельс Р65; 3 – ЖБ шпала; 4 – подкладка [выполнено авторами].

Таблица 1

## Общий вид данных используемых для анализа [выполнено авторами]

Км	М	Подуклонка левая нить		Подуклонка правая нить		Ширина колеи, мм
		Уклон	Градусы	Уклон	Градусы	
1	0	1/28	2,045	1/20	2,862	1522,9
1	0	1/28	2,045	1/20	2,862	1522,8
1	1	1/28	2,045	1/19	3,013	1522,7
1	1	1/28	2,045	1/19	3,013	1522,6
1	1	1/28	2,045	1/19	3,013	1522,6
1	1	1/28	2,045	1/19	3,013	1522,5
1	1	1/28	2,045	1/19	3,013	1522,5
1	2	1/28	2,045	1/19	3,013	1522,4
1	2	1/28	2,045	1/19	3,013	1522,4
1	2	1/28	2,045	1/19	3,013	1522,3

Таблица 2

## Расчёт средних значений, медианы, СКО, минимального и максимального значений [выполнено авторами]

Параметр	Подуклонка левой нити		Подуклонка правой нити		Ширина колеи, мм
	Уклон	Градусы	Уклон	Градусы	
Среднее арифметическое	1/22	2,644	1/21	2,721	1522,53
Медиана	1/21	2,727	1/21	2,727	1522
СКО		0,421		0,427	2,73
Минимальное значение	1/990	0,058	1/990	0,058	1516,3
Максимальное значение	1/12	5,194	1/11	5,194	1541,8

• сужение или уширение колеи при нормативной подуклонке рельсов (1/20);

• нормативная ширина колеи (1520 мм), отклонение подуклонки рельсов в большую (до 1/11) или в меньшую сторону (до 1/990);

• уширение колеи (>1520 мм), отклонение подуклонки в меньшую сторону (до 1/990).

Согласно технологическим картам, регулировка ширины колеи осуществляется регулировкой положения рельса в горизонтальной плоскости по подрельсовой площадке шпалы, без изменения подуклонки рельсов. Однако, при наличии существенного бокового износа рельсов подобная регулировка не позволяет достичь нормативной ширины колеи, в таком случае исполнители, в нарушение технологической карты, регулируют ширину колею путём изменения подуклонки рельсов. Третий вид деформации колеи является следствием износа элементов промежуточных скреплений, ослабления момента затяжки крепежителей [3].

Для проверки гипотезы о нормальном распределении подуклонки и ширины колеи были определены среднее-арифметическое, медиана, среднееквадратическое отклонение (далее СКО), минимальное и максимальное значения (табл. 2).

Для проверки гипотезы о нормальности распределения случайной величины используются косвенные, графические и расчётные методы.

К графическим методам относят: частотные гистограммы, нормально-вероятностный график и ящичную диаграмму. К расчётным методам относят: критерий Колмогорова–Смирнова, критерий Шапиро–Уилка, критерий Пирсона–Хи-квадрат и другие [4]. В данной работе, для проверки гипотезы о нормальном распределении подуклонки рельсов использовался графический метод, а именно частотные гистограммы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

## Сравнение эмпирических и теоретических данных

Для проверки гипотезы графическим методом были использованы частотные гистограммы.

Построение гистограммы осуществлялось на основании эмпирических и теоретических частот значений выборки. Определение частот осуществляется по равным интервалам диапазона выборки. Для подуклонки рельсов данный интервал составляет 0,235 градуса, для ширины колеи 1 мм. Теоретические частоты определяются по функции плотности нормального закона:





Таблица 3

**Частоты подуклонки рельсов по обеим нитям в заданных интервалах  
[выполнено авторами]**

Интервалы		Левая нить		Правая нить	
		Эмпирические частоты	Теоретические частоты	Эмпирические частоты	Теоретические частоты
1/195	1/990	764	0,01	593	0,00
1/108	1/195	714	0,18	621	0,07
1/75	1/108	652	3,10	467	1,07
1/57	1/75	622	37,64	452	12,46
1/46	1/57	864	317,88	705	105,84
1/39	1/46	1950	1868,74	1011	657,77
1/34	1/39	4112	7647,46	1860	2989,95
1/30	1/34	8365	21785,42	3472	9940,73
1/26	1/30	25234	43201,23	8191	24173,48
1/24	1/26	75992	59635,86	29127	42995,84
1/22	1/24	82380	57306,03	51430	55934,58
1/20	1/22	29982	38333,14	80699	53223,19
1/18	1/20	21196	17849,66	39755	37041,45
1/17	1/18	1670	5785,84	25040	18855,66
1/16	1/17	455	1305,52	11146	7020,40
1/15	1/16	193	205,06	508	1911,83
1/14	1/15	117	24,13	168	436,28
1/13	1/14	26	0,09	37	5,91
1/12	1/13	19	0,00	25	0,46

Таблица 4

**Частоты ширины колеи в заданных интервалах [выполнено авторами]**

Интервалы	Эмпирические частоты	Теоретические частоты
≤1517	48	8550,19
(1517; 1518)	1046	9678,56
(1518; 1519)	6415	16458,60
(1519; 1520)	20693	24508,99
(1520; 1521)	44701	31960,38
(1521; 1522)	56595	36496,79
(1522; 1523)	45953	36496,79
(1523; 1524)	30108	31960,38
(1524; 1525)	18383	24508,99
(1525; 1526)	12269	16458,60
(1526; 1527)	7073	9678,56
(1527; 1528)	3358	4983,96
(1528; 1529)	1894	2247,39
(1529; 1530)	1648	887,39
(1530; 1531)	1044	306,82
(1531; 1532)	654	92,89
(1532; 1533)	300	24,62
(1533; 1534)	104	5,72
(1534; 1535)	338	1,16
(1535; 1536)	561	0,21
(1536; 1537)	622	0,03
(1537; 1538)	690	0,00
(1538; 1539)	373	0,00
(1539; 1540)	329	0,00
(1540; 1541)	85	0,00
(1541; 1542)	23	0,00

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение;  
 $\mu$  – математическое ожидание (медиана).

Результаты определения частот представлены в табл. 3 и 4.

На основании полученных данных построены частотные гистограммы (рис. 2, 3, 4).

Полученные гистограммы для подуклонки рельсов и ширины колеи ассиметричны, не совпадают с теоретическими нормальными кривыми, следовательно, гипотеза о нормальности распределения данных величин отклоняется.

С целью определения взаимосвязи величин был произведён расчёт коэффициента корреляции методом Пирсона между подуклонкой левой нити и шириной колеи, а также между подуклонкой правой нити и шириной колеи:

- коэффициент корреляции между подуклонкой левой нити и шириной колеи равен  $-0,20$  что свидетельствует о слабой обратной связи;

- коэффициент корреляции между подуклонкой правой нити и шириной колеи равен  $-0,41$ , что свидетельствует об умеренной обратной связи.

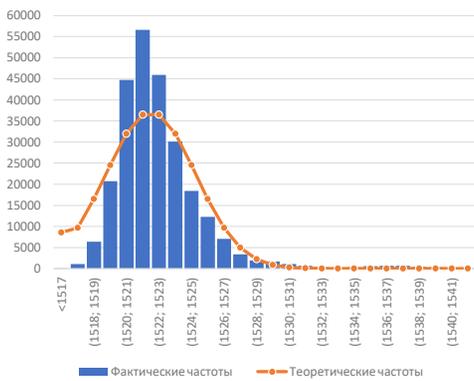


Рис. 2. Частотная гистограмма ширины колеи [выполнено авторами].

### Распределение подуклонки

При нормальной ширине колеи 1520 мм и подуклонке обеих нитей 1/20 контактные напряжения не превышают 650 Мпа, однако при отклонении в пределах допускаемой подуклонки от 1/12 до 1/60 они возрастают более чем на 170 % и превышают предел прочности рельсовой стали [5].

Также следует учитывать, что подуклонка рельсов на путях с железобетонными шпалами в первую очередь формируется уклоном подрельсовых площадок шпал, имеющих допуски от 1/18 до 1/22 для первого сорта и от 1/16 до 1/24 для второго сорта<sup>1</sup>.

Расчёт контактных напряжений на анализируемом участке был произведён на сегментах пути со следующими параметрами: с одинаковой подуклонкой обеих нитей; с подуклонкой обеих нитей  $>1/20$ ,  $<1/20$ ; с отличающимися в разные стороны подуклонками правой и левой нитей. Указанные выше подуклонки рельсов были рассмотрены при нормативном значении, при уширении и при сужении рельсовой колеи. Все типы геометрии взяты из выборки.

Расчёт контактных напряжений выполнен методом конечных элементов.

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

<sup>1</sup> ГОСТ 33320-2015. Шпалы железобетонные для железных дорог. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2019. – 39 с. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200124225>. Доступ 28.10.2022.

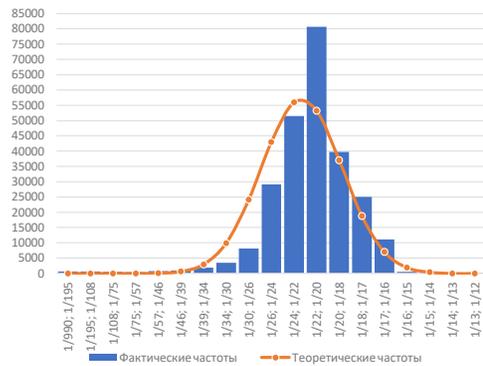


Рис. 3. Частотная гистограмма подуклонки рельсов для правой нити [выполнено авторами].

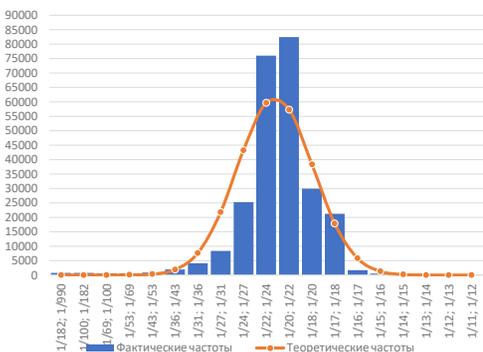


Рис. 4. Частотная гистограмма подуклонки рельсов для левой нити [выполнено авторами].

задач механики деформируемого твёрдого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики. На железнодорожном транспорте метод конечных элементов применяется для решения задач не только путевого комплекса, но и подвижного состава [6–8], систем обеспечения движения поездов [9; 10] и при проектировании искусственных сооружений [11].

Мощность созданной модели составляет порядка 300 тысяч узлов и 200 тысяч элементов (рис. 5). Модель состоит из колеса и рельса.



Рис. 5. Объёмная конечно-элементная модель контакта колеса и рельса [выполнено авторами].



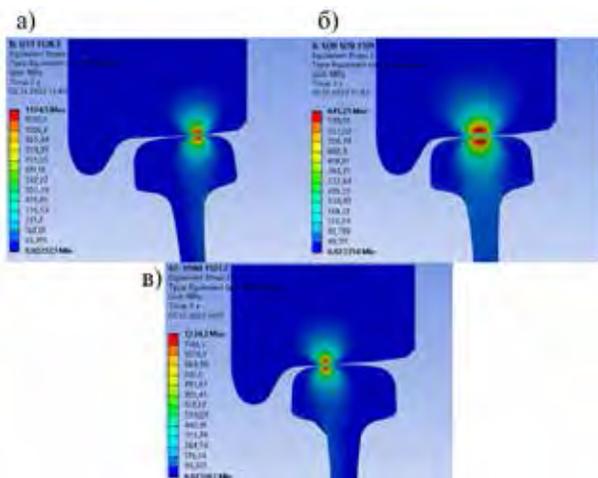


Рис. 6. Контактные напряжения в головке рельса при подуклонке и ширине колеи: а) 1/11, 1538,3 мм; б) 1/20, 1520 мм; в) 1/980, 1527,2 мм.

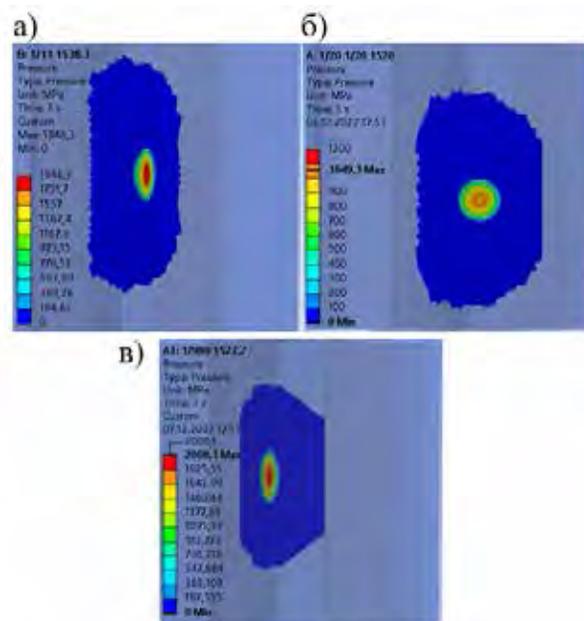


Рис. 7. Пятна контакта и контактные давления в головке рельса при подуклонке и ширине колеи: а) 1/11, 1538,3 мм; б) 1/20, 1520 мм; в) 1/980, 1527,2 мм.

Рельс жёстко зафиксирован по подошве, к колесу приложены вертикальные нагрузки, соответствующие осевой нагрузке в 23, 25 и 30 тс/ось.

Результаты расчёта контактных напряжений при изменении ширины колеи и подуклонки представлены на рис. 6, 7 и в табл. 5.

## ВЫВОДЫ

Величина подуклонки рельса не является нормально распределяемой величиной, так как любое отклонение подуклонки от 1/20, кроме обозначенного допущения наклона подрельсовой площадки для железобетонных

шпал, является следствием износа элементов промежуточных скреплений, ослабления момента затяжки крепежителей [3] или результатом нарушения установленного порядка регулировки ширины колеи.

Нарушения при регулировке ширины колеи характеризуются изменением угла наклона рельса за счёт укладки посторонних объектов под подошву рельса. Наличие подобных нарушений явно демонстрируется на участках пути с шириной колеи, соответствующей нормативной, с отклонениями в пределах допуска отступления 1-й степени (-4 мм;

Таблица 5

**Геометрические параметры рельсовой колеи для расчёта контактных напряжений  
[выполнено авторами]**

№	Ширина колеи, мм	Подуклонка		Контактные напряжения в головке рельса, МПа / Интенсивность изменения КН, в %					
		Левый рельс	Правый рельс	23 т/ось		25 т/ось		30 т/ось	
				Левый рельс	Правый рельс	Левый рельс	Правый рельс	Левый рельс	Правый рельс
1.	1520	1/20	1/20	586,24 0 %	586,24 0 %	603,46 0 %	603,46 0 %	645,25 0 %	645,25 0 %
2.	1516.3	1/19	1/14	602,87 3 %	843,68 44 %	619,73 3 %	863,6 43 %	657,28 2 %	906,83 41 %
3.	1516.9	1/18	1/17	593,97 1 %	604,06 3 %	613,67 2 %	621,07 3 %	657,62 2 %	659,39 2 %
4.	1517.1	1/22	1/15	599,25 2 %	713,36 22 %	615,55 2 %	731,26 21 %	654,35 1 %	769,81 19 %
5.	1518	1/33	1/18	804,66 37 %	599,62 2 %	824,79 37 %	617,57 2 %	871,42 35 %	657,45 2 %
6.	1518.9	1/16	1/249	614,15 5 %	1132,6 93 %	635,47 5 %	1157,3 92 %	685,06 6 %	1212,9 88 %
7.	1519	1/38	1/17	954,73 63 %	600,39 2 %	975,7 62 %	617,64 2 %	1018,9 58 %	656,09 2 %
8.	1519.9	1/64	1/64	1047 79 %	1047 79 %	1072,3 78 %	1072,3 78 %	1128,7 75 %	1128,7 75 %
9.	1521.2	1/13	1/238	921,64 57 %	1115,7 90 %	941,54 56 %	1142,1 89 %	997,53 55 %	1209,6 87 %
10.	1521.5	1/13	1/339	931,45 59 %	1153,8 97 %	952,31 58 %	1179,4 95 %	995,28 54 %	1234,8 91 %
11.	1521.9	1/364	1/980	1127,8 92 %	1140,1 94 %	1153,5 91 %	1174,5 95 %	1209,6 87 %	1251 94 %
12.	1523.7	1/14	1/410	824,35 41 %	1126,7 92 %	841,67 39 %	1161,9 93 %	880,63 36 %	1237,8 92 %
13.	1523.8	1/113	1/12	1077,3 84 %	1035,6 77 %	1107,6 84 %	1059,8 76 %	1174,7 82 %	1113,6 73 %
14.	1523.9	1/83	1/12	1049,9 79 %	1025,6 75 %	1077,4 79 %	1046,4 73 %	1142,7 77 %	1091,7 69 %
15.	1526	1/855	1/990	1125,7 92 %	1134,4 94 %	1157,7 92 %	1169,7 94 %	1234,1 91 %	1247,3 93 %
16.	1527.1	1/535	1/16	1118,6 91 %	615,16 5 %	1150,3 91 %	634,25 5 %	1228,9 90 %	680,16 5 %
17.	1527.2	1/980	1/16	1126,7 92 %	615,66 5 %	1156,1 92 %	637,48 6 %	1234,5 91 %	686,44 6 %
18.	1533.9	1/16	1/46	615,38 5 %	916,23 56 %	634,59 5 %	940,25 56 %	677,09 5 %	997,57 55 %
19.	1534.9	1/27	1/27	622,85 6 %	622,85 6 %	642,14 6 %	642,12 6 %	685,48 6 %	685,48 6 %
20.	1536.3	1/20	1/62	598,2 2 %	1025,8 75 %	614,8 2 %	1044,1 73 %	652,48 1 %	1092,9 69 %
21.	1538.3	1/11	1/28	1078,2 84 %	633,4 8 %	1108,3 84 %	652,84 8 %	1174,5 82 %	696,89 8 %
22.	1540	1/20	1/101	598,2 2 %	1081,8 85 %	614,78 2 %	1102 83 %	654,09 1 %	1162 80 %
23.	1540.3	1/19	1/106	602,24 3 %	1096,7 87 %	618,87 3 %	1124,2 86 %	656,36 2 %	1185 84 %
24.	1540.7	1/15	1/35	740,1 26 %	859,48 47 %	761,66 26 %	879,51 46 %	812,35 26 %	925,94 44 %
25.	1541.7	1/15	1/43	723,37 23 %	954,82 63 %	744,47 23 %	972,94 61 %	791,9 23 %	1012,5 57 %

+8 мм), и с различной подуклонкой обеих нитей. В табл. 5 они представлены в строках 2–17.

Изменение ширины колеи слабо влияет на изменение контактных напряжений, что продемонстрировано на примере подуклонки

1/20, при ширине колеи 1516, 1520, 1536 и 1540 мм (табл. 5, строки 1, 2, 20 и 22 соответственно). Рост контактных напряжений в данных случаях составляет 2–3 %.

Рост напряжений в головке рельса является негативным фактором, снижающим кон-



тактно-усталостные свойства рельсовой стали, и в итоге может привести к образованию поперечных усталостных трещин в головке рельса в виде светлого или тёмного пятна, вызывающих отказ рельса до пропуска гарантийного тоннажа [12–15].

Рост контактных напряжений на 20 % и более начинается при выходе подуклонки из интервала от 1/15 до 1/30.

Наибольший рост контактных напряжений наблюдается при приближении к горизонтальному положению подошвы рельса. При подуклонке меньше 1/100 рост напряжений составляет 80–97 %.

При изменении подуклонки в сторону увеличения угла наклона подошвы рельсов от 1/14 до 1/11 рост контактных напряжений составляет 41–84 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Параметр подуклонки рельсов в целом оказывает значительное влияние на напряжённо-деформированное состояние важнейшего элемента верхнего строения пути – рельса, что в конечном итоге сказывается на долговечности (жизненном цикле). Для увеличения ресурса рельса необходимо не допускать, в числе прочего, отклонений подуклонки рельсов вследствие износа отдельных элементов промежуточных рельсовых скреплений и нарушений технологического процесса регулировки ширины колеи. В качестве дополнительных мер по увеличению срока службы рельса, возможно, стоит пересмотреть допуски по отклонению подуклонки от 1/20.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сычев В. П., Овчинников Д. В., Абдурашитов А. Ю., Сычева А. В. Методика определения ресурса железнодорожного пути в зависимости от условий его эксплуатации // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 3. – С. 44–50. DOI 10.53883/20749325\_2021\_03\_44.
2. Чернышёв М. А. Практические методы расчёта пути. – М.: Транспорт, 1967. – 236 с.
3. Ovchinnikov, D., Pokatsky, V., Gallyamov, D. Factors Affecting the Dynamic Rail Canting of the Railway Track. Transportation Research Procedia, 2020 International Scientific Siberian Transport Forum, Transsiberia 2020, Novosibirsk, 2021, pp. 544–551. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.106.

4. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с. ISBN 5-9221-0707-0.

5. Покацкий В. А., Овчинников Д. В., Галлямов Д. И. Контактные напряжения при различном расположении колеса и рельса // Путь и путевое хозяйство. – 2020. – № 3. – С. 7–10. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42608180> [ограниченный доступ].

6. Peng, D., Jones, R., Constable, T. Tools and methods for addressing the durability of rolling stock. Engineering Failure Analysis, 2013, Vol. 34, pp. 278–289. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.08.011 [ограниченный доступ].

7. Воробьёв А. А., Фёдоров И. В., Чистяков Э. Ю. [и др.]. Расчёт назначенного срока службы цельнокатаных колес железнодорожного подвижного состава по критерию надёжности // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2021. – Т. 18. – № 1. – С. 121–131. – DOI: 10.20295/1815-588X-2021-1-121-131.

8. 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. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25815924> [ограниченный доступ].

9. Song, Yang; Zhang, Mingjie; Oiseth, O.; Rønquist, A. Wind deflection analysis of railway catenary under crosswind based on nonlinear finite element model and wind tunnel test. Mechanism and Machine Theory, 2022, Vol. 168, 104608. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104608>.

10. Залесова О. В., Якубович М. В. Расчёт наведённого напряжения на отключенной ЛЭП с помощью программы FEMM // Труды Колесного научного центра РАН. – 2011. – № 1 (4). – С. 37–42.

11. Zhi-Ping, Zeng; Fu-Shan, Liu; Wei-Dong, Wang. Three-dimensional train-track-bridge coupled dynamics model based on the explicit finite element method. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, Vol. 153, 107066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.107066>.

12. 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. Materials Science, Engineering, Wear, 2016, pp. 78–83. DOI: 10.1016/j.wear.2016.05.027.

13. Magheri, S., Malvezzi, M., Meli, E., Rindi, A. An innovative wheel-rail contact model for multibody applications. Materials Science, Engineering, Wear, 2011, Vol. 271, Iss. 1–2, pp. 462–471. DOI: 10.1016/j.wear.2010.10.038.

14. 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. Materials Science, Engineering, Wear, 2020, 203354, pp. 456–457. DOI: 10.1016/j.wear.2020.203354.

15. Khoa, D. Vo; Tieu, A. Kiet; Hongtao, Zhu T.; Kosasih, Buyung P. A 3D dynamic model to investigate wheel-rail contact under high and low adhesion. International Journal of Mechanical Sciences, 2014, Vol. 85, pp. 63–75. DOI: 10.1016/j.ijmesci.2014.05.007. ●

### Информация об авторах:

**Галлямов Дамир Ильдарович** – преподаватель кафедры пути и путевого хозяйства Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия, [d.gallyamov@samgups.ru](mailto:d.gallyamov@samgups.ru).

**Овчинников Дмитрий Владиславович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой пути и путевого хозяйства Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС), Самара, Россия, [ovchinnikov@samgups.ru](mailto:ovchinnikov@samgups.ru).

Статья поступила в редакцию 11.12.2022, одобрена после рецензирования 27.12.2022, принята к публикации 29.12.2022.