



К достоверности оценки состояния рельсовой колеи в плане



Валерий ШИЛЕР
Valery V. SHILER

Александр ШИЛЕР
Alexander V. SHILER



Шилер Валерий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры подвижного состава электрических железных дорог Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия.

Шилер Александр Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационной безопасности ОмГУПС, Омск, Россия.

On Reliability of Assessment of the Rail Gauge State in the Plan

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 219)

Представленные в статье данные свидетельствуют о назревшей потребности в модернизации методик исследования горизонтальных геометрических неровностей, обеспечивающих необходимую точность оценки состояния рельсовой колеи. Усовершенствован метод измерений траектории боковой поверхности головки рельса в горизонтальной плоскости. Модифицирован метод перевода стрел изгиба от базовой хорды в абсолютные значения координат траектории боковой поверхности головки рельса в плане. Дана оценка влиянию бокового износа рельсов на безопасность движения.

Ключевые слова: железная дорога, путеизмеритель, горизонтальная неровность, рельсовая колея, боковой износ рельсов, безопасность движения.

На отклонения от норм содержания геометрии рельсовых нитей в плане приходится 11 % от общего количества отклонений в геометрии рельсовой колеи и 6 % – на отступления от норм ширины колеи [1]. Количественные оценки величин горизонтальных неровностей пути приведены в работах многих авторов (С. П. Першин, Х. Балух, Е. М. Бромберг, О. П. Ершков и др.). Согласно анализу результатов измерений рельсовой колеи, полученных путеизмерительными вагонами [2], закономерным для удовлетворительного состояния пути является наличие периодических отступлений рельсовых нитей в плане. К наиболее неблагоприятным отступлениям в [3] отнесены короткие неровности пути длиной 10 м и менее с наибольшей амплитудой $h = 10$ мм, вызывающие рост боковых динамических сил до 50 кН.

Как показывают исследования, уменьшение зазора на 4–5 мм в прямых участках пути приводит к снижению величины боковых сил примерно на 20 % при движении со скоростями свыше 70 км/ч [3]. Это находит подтверждение в характере расстройств пути по ширине, так как имеется

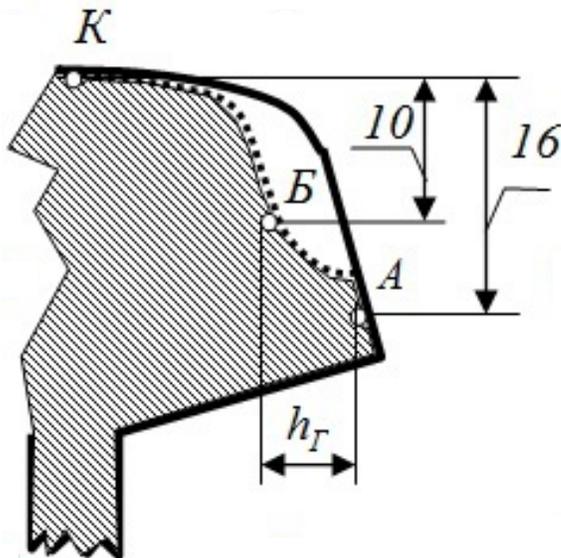


Рис. 1. Поперечный профиль головки рельса.

корреляционная связь между средней величиной ширины колеи и её среднеквадратическим отклонением в нагруженном состоянии [1]. Результаты расчётов [2] свидетельствуют, что определяющим фактором плавности движения экипажей являются горизонтальные неровности, а отклонения от номинальной ширины колеи отступают на второй план. Известны и аналитические зависимости для задания возмущений и определения сил взаимодействия между колёсными парами и рельсами [3].

В последнее время в области контроля пути преобладает роль статистического анализа [4]. Для оценки статистических характеристик принимается гипотеза эргодичности случайного процесса и близость его распределения к нормальному закону Гаусса. Полученные спектральные оценки имеют всплески на частотах 0,09–0,13 Гц, 0,16–0,20 Гц, 0,26–0,30 Гц, что соответствует неровностям с длиной волны 11,1–7,69; 6,25–5,0; 3,84–3,33 м. Большая часть энергии спектра возмущений содержится на низких и средних частотах в диапазоне длин волн 5–50 м. Установлено, что по мере износа пути характер колебаний ширины колеи становится более хаотичным и преобладание малых частот делается менее заметным.

Цель представленной работы – выявление недостатков в методах измерений бокового износа рельсов и оценках отступле-

ний в плане рельсовых нитей, включая их влияние на безопасность движения.

1.

В процессе эксплуатации внешний рельс в кривом участке пути воспринимает значительные направляющие усилия, под воздействием которых формируется боковой износ головки рельса (рис. 1, точка Б). Недостатком контроля отступлений рельсов в плане с использованием существующих путеизмерительных вагонов и переносных приборов является то, что базовые и мерительные элементы движутся по той части боковой поверхности головки рельса, которая не подвержена боковому подрезу (рис. 1, точка А). Такое положение базовых и мерительных роликов обусловлено тем, что технически невозможно обеспечить во время движения их устойчивое положение в точке Б из-за наличия кривизны боковой поверхности, которая образуется в процессе формирования бокового подреза. В эксплуатации оценка бокового подреза по всей длине рельса в кривом участке пути производится по результатам измерений в одном сечении (как правило, это сечение находится в начале кривого участка) и для всей её длины принимается в качестве постоянной величины.

Непрерывные измерения горизонтальных неровностей боковой поверхности головки рельса как на высоте точки Б, так и на высоте точки А реализованы с исполь-



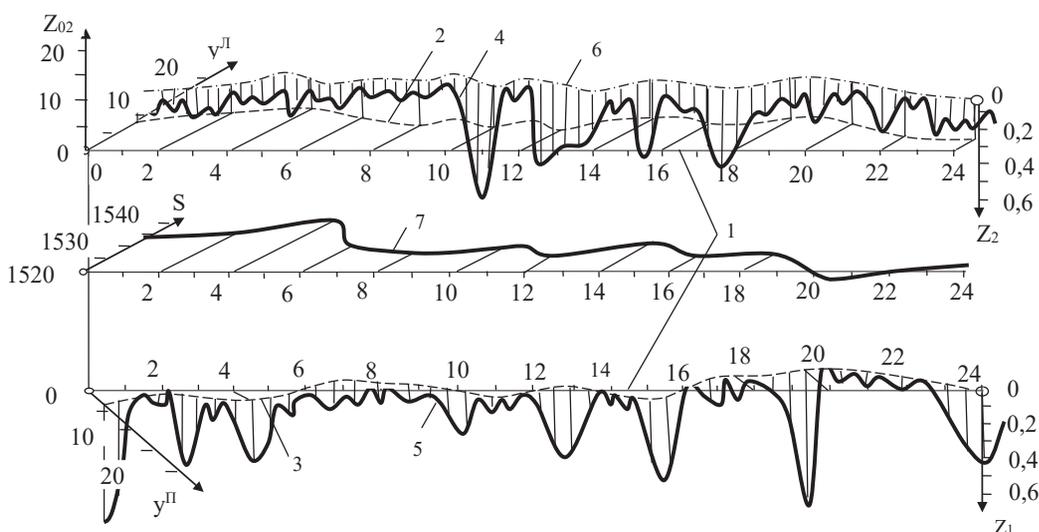


Рис. 2. Траектории рельсовых нитей и колеи в трёхмерном представлении.
 Линии: 1 – номинальная ширина колеи (1520 мм); 2 и 3 – горизонтальные неровности левого и правого рельсов соответственно; 4 и 5 – волнообразные неровности левого и правого рельсов соответственно; 6 – возвышение по уровню левого рельса; 7 – абсолютное значение рельсовой колеи.

зованием путеизмерительного комплекса «Изген-3» [5].

Результаты измерений, полученные с помощью путеизмерительного комплекса, представляют косвенные параметры неровностей рельсовой колеи – стрелы изгиба от базовой хорды. Преобразование стрел изгиба в абсолютные значения координат боковой поверхности головки рельсовых нитей выполняется по рекуррентному соотношению с использованием метода трёх точек:

$$y_m(x) = y_{m-2}(x) - 2 \cdot (y_{m-1}(x) + f_{m-1}) \quad (1)$$

где $y_m(x)$ – неизвестная координата в m -й точке рельсовой нити в плане, на которую опирается первая по ходу опорная точка базовой хорды;

$y_{m-1}(x)$ и $y_{m-2}(x)$ – установленные значения координат двух смежных предыдущих точек: точки опор мерительного элемента ($m - 1$) и второго конца базовой хорды ($m - 2$) соответственно;

f_{m-1} – значения стрел изгиба, измеряемых мерительным элементом в средней части базового элемента – в точке ($m - 1$);
 m – нумерация точек, расстояние между которыми равно половине длины горизонтальной базовой хорды путеизмерительного комплекса.

Практически значения координат в первой начальной базовой точке прини-

мают равными нулю, а во второй – равными половине значения амплитуды изменения ширины рельсовой колеи. Существенным недостатком этого метода является накопление «рекуррентной» погрешности на каждом последующем шаге вычислений. Для компенсации такой погрешности для обеих рельсовых нитей на каждом шаге вычислений вводится поправка, которая равна половине разности расчётной (s_m^p) и фактической ($s_m^ф$) ширины колеи в каждом расчётном сечении:

$$\varepsilon_{m-1} = (s_{m-1}^ф - s_{m-1}^p) / 2, \quad (2)$$

где $s_{m-1}^p = y_{m-1}^П + y_{m-1}^Л + 1520$ – расчётная ширина колеи, мм;

$y_{m-1}^П; y_{m-1}^Л$ – расчётные координаты точек правой и левой рельсовых нитей в плане в одном сечении;

1520 – нормальная ширина колеи, мм.

Значение фактической ширины колеи ($s_{m-1}^ф$) регистрировалось путеизмерительным комплексом в абсолютных значениях и в тех же сечениях, что и стрелы изгиба горизонтальных неровностей.

На рис. 2 в аксонометрической проекции в абсолютных значениях координат представлены результаты измерений всех видов геометрических неровностей

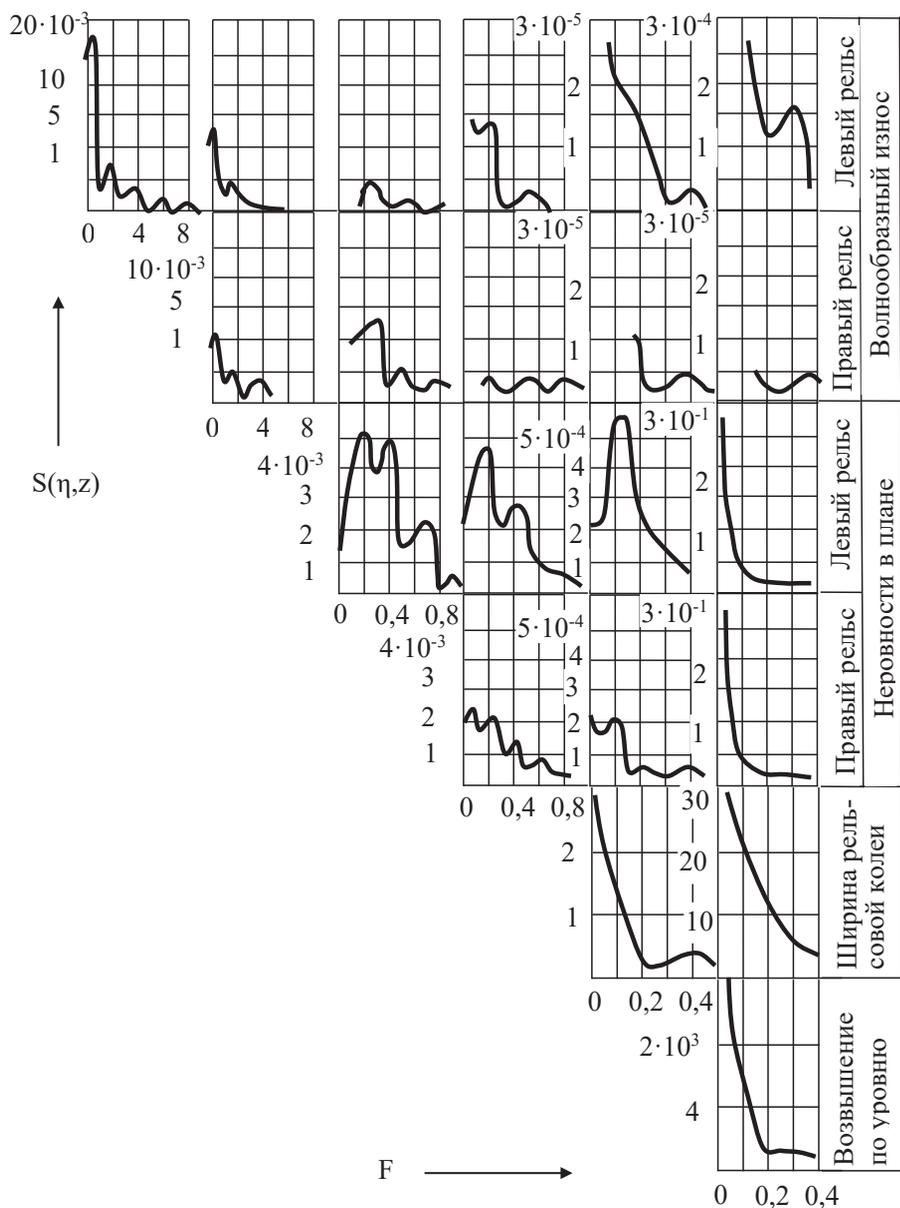


Рис. 3. Графическая матрица спектральных плотностей геометрических неровностей рельсовой колеи.

рельсовых нитей участка железнодорожного пути длиной 24 м. Порядок построения геометрических неровностей осуществляется в следующей последовательности: на первом шаге номинальные положения рельсовых нитей в плане по ширине (1520 мм) задавались двумя параллельными прямыми (линии 1) с учётом масштабного коэффициента. На втором шаге откладывались значения амплитуд горизонтальных неровностей (линии 2 и 3), абсолютные значения которых на высоте точки А получены путём

преобразования стрел изгиба по формулам (1) и (2). На третьем шаге от линии горизонтальных неровностей строилась траектория возвышения левого рельса (линия 6). На четвёртом шаге от линии горизонтальных неровностей правого рельса откладывались абсолютные значения координат волнообразного износа (линия 5), а от линии траектории возвышения левого рельса – абсолютные значения координат его волнообразного износа (линия 4) с соответствующими масштабными коэффициентами.



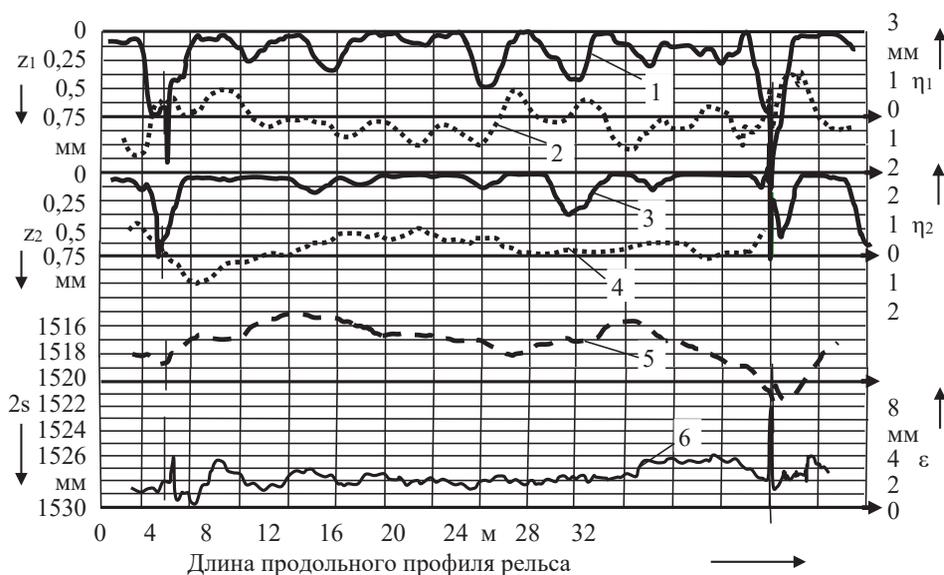


Рис. 4. Участок рельсовой колеи. Линии: 1, 3 – волнообразный износ правой и левой рельсовых нитей; 2, 4 – стрелы изгиба в плане правой и левой рельсовых нитей; 5 – ширина рельсовой колеи; 6 – боковой износ правой рельсовой нити.

Для полученных результатов измерений геометрических неровностей рельсовой колеи (рис. 2) вычислены спектральные плотности. С целью наглядности интерпретации спектральных плотностей и оценки их статистической взаимной связи они размещены в виде графической матрицы (рис. 3). По диагонали графической матрицы располо-

жены графики автоспектров для всех контролируемых видов неровностей. Недиагональные графики таблицы представляют их взаимные спектры. Поскольку в предлагаемой работе оценивается влияние горизонтальных неровностей на безопасность движения, то выполнен только анализ спектров горизонтальных неровностей рельсовых

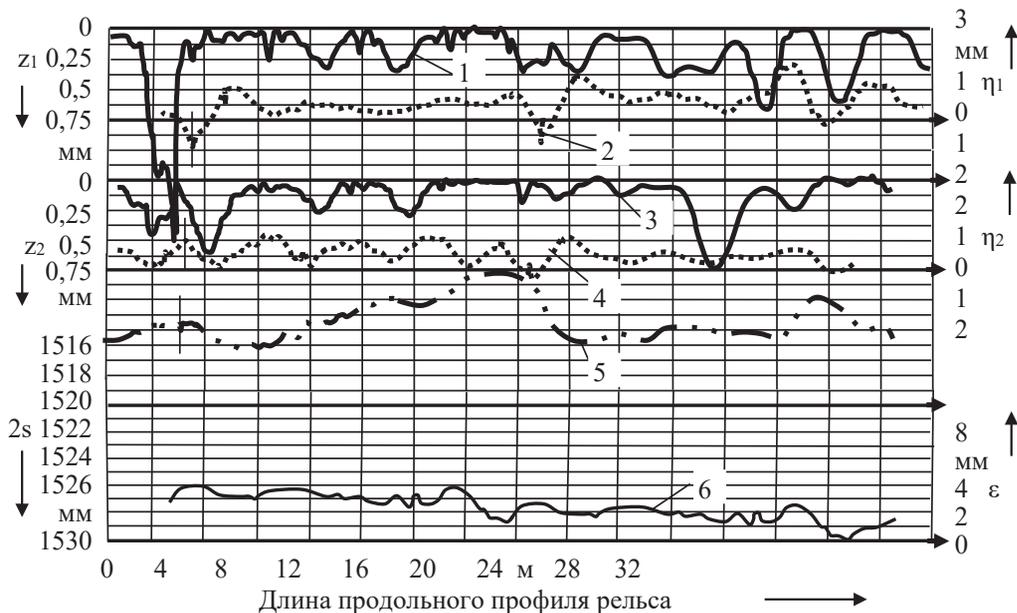


Рис. 5. Участок рельсовой колеи. Линии: 1, 3 – волнообразный износ правой и левой рельсовых нитей; 2, 4 – стрелы изгиба в плане правой и левой рельсовых нитей; 5 – ширина рельсовой колеи; 6 – боковой износ правой рельсовой нити.

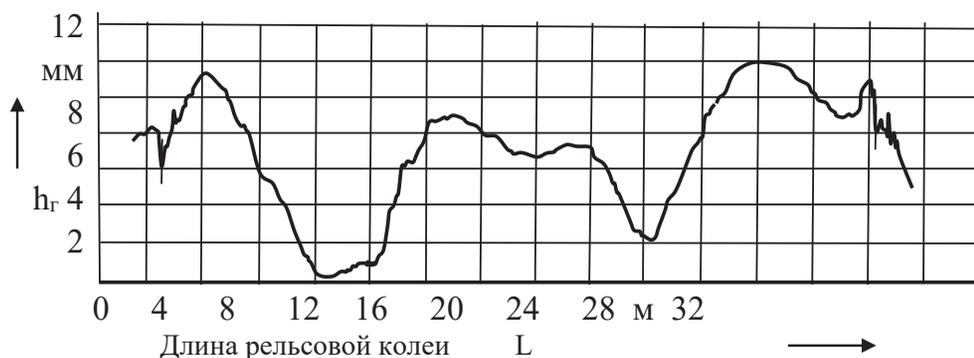


Рис. 6. Траектория бокового подреза упорной рельсовой нити в абсолютных значениях разности между горизонтальными координатами точек А и Б.

нитей (рис. 5, диагональные графики 3, 4) и ширины колеи (рис. 3, диагональный график 5). Так, спектры горизонтальных неровностей имеют одинаковое количество пиков, но отличаются по амплитуде и распределению их по частотной оси. Всплески амплитуд спектральной плотности для правого рельса (упорная нить) находятся на частотах, соответствующих длинам волн 6,66 м, 3,5 м, 1,53 м, для левого рельса — 20 м, 4 м, 2,5 м. Это обусловлено тем, что правая рельсовая нить находится по уровню ниже левой и воспринимает более значительные по величине вертикальные и направляющие силы от подвижного состава.

Спектр амплитуд уширения колеи имеет два всплеска амплитуд в диапазоне частот, соответствующих длинам волн 2,5 м и в интервале 10–40 м. Горизонтальные неровности находятся на правой и левой рельсовых нитях, поэтому значения уширения колеи формируются за счёт противофазного расположения этих неровностей. Неровности с иными значениями длин волн вдоль рельсовых нитей расположены синхронно и потому не влияют на значения ширины рельсовой колеи. Сложнее интерпретировать взаимные спектры между различными видами неровностей, поскольку статистические связи формируются через многочисленные физические процессы и не всегда отражаются в частотной области, но это уже другая тема.

Серьёзным недостатком спектрального анализа неровностей рельсовой колеи является отсутствие возможности идентифицировать вид и протяжённость групповых неровностей с различными длинами волн, установить форму траектории одиночной

неровности, выполнить привязку к конкретному отрезку пути.

2.

От кривизны в плане траектории боковой поверхности головки рельса зависит уровень безопасности движения колёсной пары в рельсовой колее. Поэтому в дальнейших исследованиях горизонтальных неровностей рельсовой колеи наряду со спектральным анализом применялся анализ одиночных неровностей по интенсивности изменений значений их длины волны и амплитуды.

Согласно правилам эксплуатации [6], отвод траектории рельса в горизонтальной плоскости не должен превышать отклонения от прямолинейности, равного одному миллиметру на один метр продольного пути, что соответствует одной промилле (1‰). Это значение авторами предложено как коэффициент фактора безопасности движения ($\chi_{г.н.}$) колёсной пары от наезда гребня колеса на рельс в пределах траектории исследуемой одиночной горизонтальной геометрической неровности.

Коэффициент интерпретируется следующим образом: если геометрическая неровность в плане имеет показатель $\chi_{г.н.} < 1‰$, то движение колёсной пары по ней отвечает требованиям безопасности, если $\chi_{г.н.} > 1‰$, то не соответствует этим требованиям.

Предложенный коэффициент фактора безопасности движения позволяет получить экспресс-оценку безопасности движения от наезда гребня колеса на рельс на каждом метре траектории любой горизонтальной неровности. На рис. 4 представлены в абсо-



лютных координатах траектории поверхностей катания новых рельсовых нитей с нулевым сроком эксплуатации, замеренных в прямом участке рельсовой колеи длиной 25 м. Второй участок пути, показанный на рис. 5, имеет один год эксплуатации. Оба участка располагают рельсошпальной решёткой с железобетонными шпалами.

На первом участке выявлены начальные горизонтальные неровности с амплитудой 1,5 мм и длиной волны 2 м (рис. 4, линии 2 и 4).

Величина отвода рельсов в плане для этих параметров неровностей соответствует предельно допустимому значению по безопасности движения $\chi_{гн} = 1\%$. Начальные горизонтальные и волнообразные неровности имеют одинаковую длину волны и располагаются синхронно. Эти неровности формируются в процессе изготовления рельсов на заводах.

На втором участке пути, на отрезке с отметками 13–17 м, выявлено сужение рельсовой колеи, равное 1512 мм (рис. 5, линия 5). На месте сужения рельсовой колеи отмечено образование бокового подреза с амплитудой 2 мм (рис. 5, линия 6).

В кривом участке пути, в котором сформировался боковой износ, были произведены измерения горизонтальных геометрических неровностей на высотах точек А и Б (рис. 1). На графике (рис. 6) показаны абсолютные значения разности (h_r) между горизонтальными координатами траекторий боковой поверхности на уровне точек Б и А. Согласно графику, на длине неровности, равной 4 м, максимальное значение приращения разности координат (h_r) составляет 9 мм.

При сложении горизонтальных координат в точках А и Б приращение обобщённой амплитуды горизонтальной неровности составило 12 мм на длине 4 м. В этом случае коэффициент фактора безопасности движения равен $\chi_{гн} = 3\%$, что соответствует снижению уровня безопасности движения в 3 раза по сравнению с данными, полученными по существующей методике.

Как показывают результаты расчётов, процесс вкатывания гребня колеса на рельс

на скорости 30 м/с происходит на длине траектории неровности, равной 0,82 м [7]. Поэтому в пределах волны рассмотренной горизонтальной неровности на каждом метре её длины высока вероятность схода колёсной пары с рельсовой колеи.

ВЫВОДЫ

1. Представленные в статье результаты (как и многочисленные исследования в этой области других авторов) свидетельствуют об актуальности модернизации методик исследования горизонтальных геометрических неровностей, обеспечивающих требуемую точность оценки состояния рельсовой колеи.

2. Наряду со спектральными методами оценки горизонтальных неровностей необходимо применять показатель фактора безопасности движения одиночных неровностей.

3. Боковой подрез головки рельса в продольном направлении имеет неравномерный волнообразный характер и результаты его измерений следует использовать при оценке безопасности движения, особенно в кривых участках пути.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грачёва Л. О. Экспериментальные исследования грузовых вагонов с максимальными износами ходовых частей при наличии отступлений от норм в содержании пути // Труды ВНИИЖТ. – 1974. – Вып. 519. – С. 175–188.
2. Балух Х. Диагностика верхнего строения пути. – М.: Транспорт, 1981. – 414 с.
3. Зак М. Г., Ершков О. П., Ткалов Е. Д. Теоретический анализ влияния расстройств рельсовой колеи на динамическое воздействие подвижного состава и пути и оценка неравножесткости рельсовых нитей // Труды ВНИИЖТ. – 1980. – Вып. 628. – С. 67–101.
4. Крейнис З. Л. Спектральные характеристики очертаний рельсовых нитей в плане // Труды Днепропетровского института инженеров транспорта. – 1980. – Вып. 209/22. – С. 35–39.
5. Шилер В. В. Определение отступлений рельсовых нитей в плане координатным методом // Взаимодействие подвижного состава и пути и динамика локомотивов дорог Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера: Сб. статей. – Омск: Изд-во ОмИИТ, 1983. – С. 70–74.
6. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути с изменениями и дополнениями. Утв. приказом МПС РФ № С-950 от 30.05.2000 г.
7. Вершинский С. В., Данилов В. Н., Челноков И. И. Динамика вагона: Учебник. – 2-е изд. – М.: Транспорт, 1978. – 352 с. ●

Координаты авторов: Шилер В. В. – shiler_val@inbox.ru, Шилер А. В. – shiler_alex@inbox.ru.

Статья поступила в редакцию 06.06.2018, принята к публикации 23.08.2018.