

17. Kovalenko N.I., Suvorov D.R., Rohovska I.V. System Application EC ASUI in planning of track facilities of “RZHD” / N.I. Kovalenko, D.R. Suvorova, I.V. Unkovskaya // Science and technology of railways. 2020. Vol. 4. № 1 (13). Pp. 78–87.

18. Kadik L. Special approach. / L. Kadik // Control panel: electron. Zhurnal. 2019. No. 8. URL: <http://www.pult.gudok.ru/archive/contents.php?ID=1478534/>.

#### Информация об авторах

*Асалханова Татьяна Николаевна* – канд. экон. наук, доцент кафедры пути и путевого хозяйства, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [asalhanova\\_tn@irgups.ru](mailto:asalhanova_tn@irgups.ru)

*Осколков Андрей Александрович* – начальник сектора информатизации Восточно-Сибирской дирекции инфраструктуры, г. Иркутск, e-mail: [di\\_oskolkovaa@esrr.ru](mailto:di_oskolkovaa@esrr.ru)

#### Information about the authors

*Tatyana N. Asalkhanova* – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department Road and Track Management, Irkutsk State University of Railway Transport, Irkutsk, e-mail: [asalhanova\\_tn@irgups.ru](mailto:asalhanova_tn@irgups.ru)

*Andrey A. Oskolkov* – Head of the Informatization Sector of the East Siberian Infrastructure Directorate, Irkutsk, e-mail: [di\\_oskolkovaa@esrr.ru](mailto:di_oskolkovaa@esrr.ru)

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).148-155

УДК 625.1

## Влияние микро- и макрогеометрии пути на поперечную устойчивость железнодорожного пути

М. А. Мыльникова ✉

Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, Российская федерация

✉ [mylnikova.ma93@gmail.com](mailto:mylnikova.ma93@gmail.com)

#### Резюме

В статье рассматриваются факторы, влияющие на поперечную устойчивость бесстыкового железнодорожного пути, такие как износ рельсов, поездная нагрузка и режимы движения поездов, неровности пути, в частности отступления в плане, неравномерность распределения температурных полей по поверхности рельса и в его сечении. Наиболее подробно описано исследование воздействия поездной нагрузки на поперечную устойчивость пути. В работе приводится обоснование расчетной модели 3D поезда для проведения моделирований в программном комплексе «Универсальный механизм». Предложен способ определения рекомендуемого шага интегрирования с применением методов спектрального анализа. Представлены результаты проведенных исследований воздействия поездной нагрузки на поперечную устойчивость пути при движении поезда по участкам пути с нарушениями микрогеометрии пути и без них. Приведен способ расчета дополнительной поперечной силы, возникающей при движении поезда по отступлению в плане. Автором статьи предложен способ определения интенсивности изменения уклона отвода отступления в плане, позволяющий определить, какое из отступлений является опасным и требует дополнительного постоянного контроля. Обозначены дальнейшие направления исследований.

#### Ключевые слова

факторы нарушения поперечной устойчивости пути, поездная нагрузка, максимально поперечные силы, расчетная модель

#### Для цитирования

Мыльникова М. А. Влияние микро- и макрогеометрии пути на поперечную устойчивость железнодорожного пути / М. А. Мыльникова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 148–155. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).148-155

#### Информация о статье

поступила в редакцию: 09.11.2020, поступила после рецензирования: 20.11.2020, принята к публикации: 01.12.2020

## The influence of railway track micro- and macro-geometry on the railway track transverse stability

М. А. Myl'nikova ✉

Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, the Russian Federation

✉ [mylnikova.ma93@gmail.com](mailto:mylnikova.ma93@gmail.com)

#### Abstract

The article considers the factors that affect the transverse stability of a continuous welded railway track. These factors are rail wear, train load and modes of train movement, and track irregularities, in particular, deviations in the plan, uneven distribution of

temperature fields over the surface of the rail and in its cross-section. The research of the impact of train load on the transverse stability of the railway track is described in most detail. The article provides a rationale for the 3-D train design model for simulations in the “Universal mechanism” software package. A method of determining the recommended integration step by using spectral analysis techniques is proposed. The results of conducted studies of the impact of the train load on the transverse stability of the track are presented. In this case the train moves along the track sections with and without perturbations of the track micro-geometry. The paper provides a method of calculating the additional transverse force that occurs when the train moves along a deviation in the plan. The author of the article proposes a method of determining the intensity of changes in the offset slope of the deviation in the plan, which allows one to determine which of the deviations is dangerous and requires additional constant monitoring. Further directions of research are indicated.

### Keywords

factors of violation of the transverse stability of the track, train load, the maximum transverse forces, calculation model

### For citation

Myl'nikova M. A. Vliyaniye mikro- i makrogeometrii puti na poperechnuyu ustoichivost' zheleznodorozhnogo puti [The influence of railway track micro- and macro-geometry on the railway track transverse stability]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp.148–155.– DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).148-155

### Article info

Received: 09.11.2020, Revised: 20.11.2020, Accepted: 01.12.2020

### Введение

Наиболее актуальными и важными процессами при содержании и эксплуатации железнодорожного пути на сегодняшний день являются нарушения поперечной устойчивости бесстыкового железнодорожного пути.

Данный вопрос изучается учеными из разных стран [1–4]. Многие объединяются во мнении, что причинами возникновения неблагоприятных ситуаций является множество неконтролируемых факторов, провоцирующих нарушения поперечной устойчивости и в том числе возникновение температурного выброса пути. К таким факторам относятся: износ рельсов, поездная нагрузка и режимы движения поездов [5, 6], собственные воздействия рельса, вызванные способами изготовления, укладки, содержания, ремонта конструкции и составляющих ее деталей [7], отступления в плане и интенсивность их развития [8, 9], неравномерность распределения температурных полей по поверхности рельса и в его сечении [10].

### Воздействие поездной нагрузки на железнодорожный путь

Воздействие поездной нагрузки на железнодорожный путь исследуется на кафедре пути и железнодорожного строительства Уральского государственного университета путей сообщения в программном комплексе «Универсальный механизм» (далее – ПК УМ) [11–13].

Возможности проведения расчетов модели в ПК УМ верифицирована [14, 15].

В статье приведено влияние поперечных сил от прохода поезда на возникновение опасных сечений с точки зрения поперечной устойчивости, в которых требуется установка бализ [16–18].

Использование системы мониторинга за напряженным состоянием рельсовых плетей при помощи

бализы позволит прогнозировать возможные температурные выбросы бесстыкового пути, контролировать полносоставность поездов и равномерность распределения нагрузки как для каждого вагона, так и для всего состава.

Предлагаемая система работает автоматизировано [19]. Выполнена проверка и работоспособность заложенных в системе алгоритмов путем создания компьютерных расчетов. На данный момент планируется произвести цикл испытаний продолжительностью от одного капитального ремонта до другого, в процессе которых необходимо рассчитать рискованные ситуации при выбросах пути и представить возможный количественный диапазон этих параметров, проверить работоспособность алгоритмов в ситуации, близкой к нарушению стабильности и устойчивости пути. На основании этого дополнить алгоритмы блоками, характеризующими рискованные ситуации, и верифицировать алгоритмы с учетом дополнений.

Бесперебойная работа системы мониторинга за напряженным состоянием рельсовых плетей будет обеспечена после определения места установки каждой бализы и закрепления устройств.

Для этого необходимо учитывать ориентацию относительно солнца, ветра и расположения путей в выемках и насыпях.

Потеря устойчивости бесстыкового пути зависит в том числе от температуры закрепления рельсовых плетей. Поэтому при определении мест установки бализ важно учитывать температуру закрепления рельсовой плети, место и время ее измерения. Этот фактор важно учитывать по причине возможной погрешности и изменения температуры закрепления плети при эксплуатации пути, в том числе из-за неучтенного неравномерного распределения температурных полей по поверхности и сечению рельса.

Следующим этапом при определении мест закрепления бализы должен быть анализ интенсивности развития отступлений в плане.

Силы от движения поезда также рассматриваются в качестве фактора, который может служить одним из параметров нарушения устойчивости пути. Повышенные боковые силы, передаваемые колесами подвижного состава на рельсы, чаще всего возникают по причине недостаточно свободного разворота тележек, в том числе из-за неисправностей вагонов. При этом сход с рельсов скорее возможен из-за вкатывания гребня колеса на головку рельса, а не из-за сдвига путевой решетки. Поэтому для каждого конкретного участка должны быть проведены отдельные исследования в ПК УМ с учетом плана и профиля линии, режима движения поезда, грузонапряженности линии.

#### **Определение достаточного количества вагонов и шага интегрирования для проведения компьютерного моделирования в программном комплексе «Универсальный механизм»**

На начальном этапе для расчетов модели была выбрана тележка модели 18-100, которая подкатывается под все грузовые четырехосные магистральные вагоны (и в том числе цистерны) с осевыми нагрузками до 230 кН, в соответствии с приказом № 41 «О нормах допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1 520 (1 524) мм».

Далее была определена достаточная длина поезда. Для этого производились моделирования и анализ движения 3D поездов, состоящих из одного, двух, трех, четырех, пяти, шести, семи, восьми, девяти и десяти 3D вагонов.

Моделирование происходило поочередно по участку длиной 1 750 м. На участке располагались кривая радиусом 1 200 м, с обеих сторон от кривой находились прямые длиной не менее 200 м. Длина круговой кривой составляла 1 166,64 м, длины переходных кривых – 90 м. При расчетах модели была использована осевая нагрузка 23 т/ось. Скорость 80 км/ч.

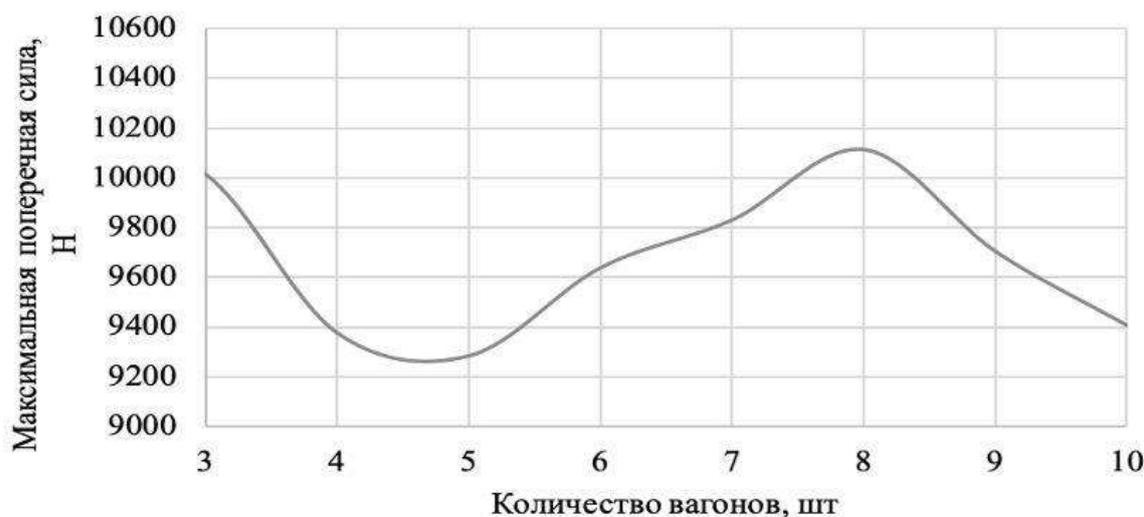
Сравнивались значения максимальных поперечных сил, возникающих на контакте «колесо – рельс».

Анализ результатов показал, что силовое воздействие от предыдущих и последующих колесных пар не учитывается при моделировании движения одного и двух 3D вагонов.

Результаты поочередного моделирования движения поездов, состоящих из трех, четырех, пяти, шести, семи, восьми, девяти и десяти 3D вагонов показали, что значения максимальных поперечных сил в среднем отличаются между собой на 245 Н. Это составляет около 2,5 % от средней поперечной силовой нагрузки на контакте «колесо – рельс» при движении подвижного состава для заданных условий. При этом зависимость между значениями максимальных поперечных сил и количеством вагонов носит волновой характер с длиной волны, равной 5 вагонам (рис. 1).

Таким образом, для дальнейших расчетов модели достаточно длины поезда в 5 вагонов. Это позволит учесть большее силовое воздействие от соседних колесных пар.

Первоначально для определения рекомендуемого шага интегрирования расчетной модели, учитывающего точность расчета и время интегрирования, был выбран шаг моделирования 25 см, чтобы произ-



**Рис. 1.** Зависимость величины максимальной поперечной силы от количества вагонов  
**Fig. 1.** Dependence of the magnitude of the maximum transverse force on the number of railcars

водить расчеты по оси каждой шпалы и в междушпальном ящике при эпюре шпал 2 000 шт/км. Идея заключалась в том, что в этих местах возникают удерживающие силы трения подошвы шпалы о балласт, силы трения боковой поверхности шпалы о балласт и силы торцевого сопротивления сдвигу рельсошпальной решетки в балласте, которые могут стать удерживающим фактором с точки зрения нарушения устойчивости пути.

Ожидание отследить зависимость между значениями максимальных поперечных сил, местом их возникновения и учитывать силы сопротивления при шаге интегрирования 25 см не подтвердилось.

Таким образом, было принято решение уменьшить шаг интегрирования до 1 см и поочередно произвести расчеты при шаге интегрирования 25 и 1 см. Далее построить зависимости поперечных сил от времени движения поезда. После выявить и сравнить цикличность колебаний по основной гармонике путем проведения спектрального анализа (рис. 2).

Исследования происходили со следующими допущениями:

1. Полученные зависимости поперечных сил от времени движения поезда описаны волновым процессом. Процесс носит гармонический характер.

2. Критерием определения основной гармоники является коэффициент корреляции. Гармоника с наибольшим коэффициентом корреляции – основная.

3. Рассматривать требуется прямолинейный участок. Это обусловлено тем, что для сравнения длин волн колебательных процессов, необходимо выявить постоянный параметр, относительно которого производится сравнение. При движении поезда по пе-

реходной кривой имеется много переменных параметров (радиус, возвышение наружного рельса, длина участка и т. д.). На прямолинейном участке и в пределах круговой кривой аналогичные параметры остаются постоянными. При различных скоростях движения в круговых кривых радиусы, длина кривой и возвышение наружного различные. Таким образом, при сравнении длин волн колебательного процесса на переходных и круговых кривых задача становится многокритериальной. Для первых исследований шага интегрирования достаточно определить параметры колебательного процесса на прямолинейном участке. На множество возникающих вопросов относительно выявления основной гармонике колебательного процесса в криволинейных участках ответ будет найден в рамках дальнейших исследований.

В рамках проведенных исследований с принятыми допущениями установлено, что для проведения моделирования рекомендуемый шаг интегрирования составляет 5 см.

#### Определение вида вагона и тележки колесной пары

Для определения выбора вида вагона было проведено моделирование движения:

– четырехосного полувагона 12-132 (длина полувагона 13,92 м, длина базы 8,65 м, нагрузка 23 т/ось);

– локомотива ЧС-1 (длина локомотива 15,54 м, длина базы 8,17 м, нагрузка 21,5 т/ось);

– четырехосной цистерны (длина цистерны 10,8 м, длина базы 7,8 м, нагрузка 21,375 т/ось).

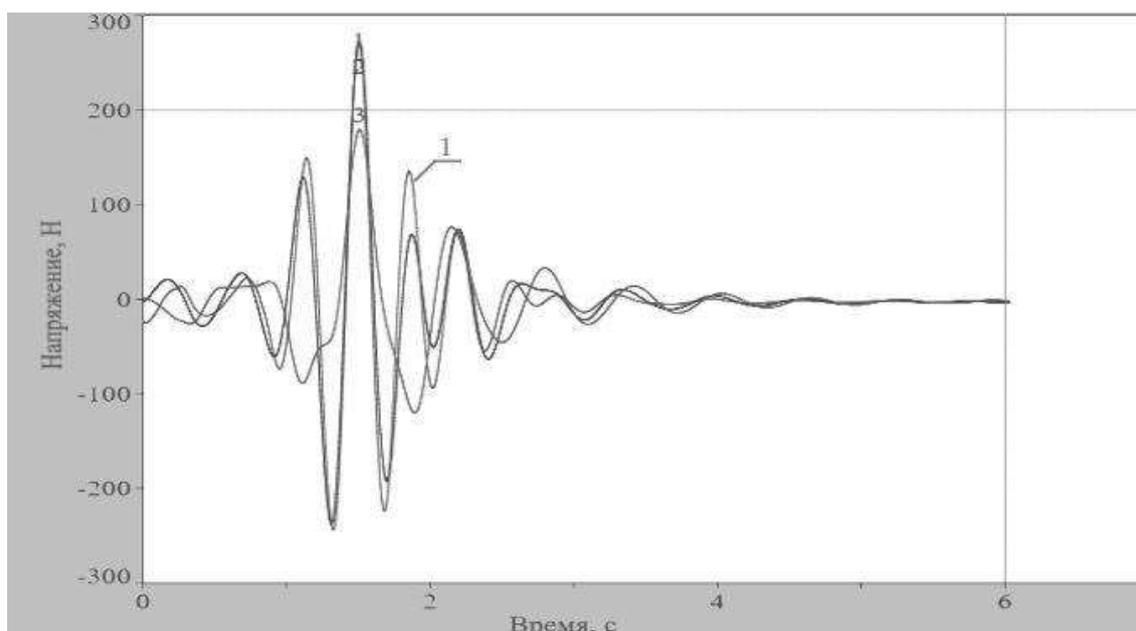


Рис. 2. Гармонические составляющие сложного периодического сигнала  
Fig. 2. Harmonic components of a complex periodic signal

В ходе моделирования рассматривались значения возникающих максимальных поперечных сил при движении 3D вагона со скоростью 90 км/ч по участку протяженностью 1 300 м. На участке располагались кривая радиусом 1 000 м и две прямые длиной 100 м с разных сторон от кривой. Ограничение скорости 90 км/ч было обусловлено выбором тележки модели 18-100, которая подкатывается под все грузовые четырехосные магистральные вагоны (и в том числе цистерны) с осевыми нагрузками до 230 кН.

Далее представлены результаты моделирования для второй оси первой колесной пары. Именно под этой осью возникали максимальные поперечные силы.

Результаты моделирования показали, что погрешность между максимальными значениями поперечных сил составляет 5 % (0,046 т/ось) при сравнении сил, возникающих при движении полувагона и локомотива, 3,8 % (0,034 т/ось) – цистерна и локомотив и 8,7 % (0,080 т/ось) – полувагон и цистерна, т. е. разница между приложенной нагрузкой во всех случаях составляет меньше 1 т.

Для дальнейших расчетов были выбраны четырехосные полувагоны 12-132. Длина полувагона 13,92 м, длина базы 8,65 м, нагрузка 23 т/ось.

#### **Влияние микрогеометрии пути на величину поперечных сил, возникающих при движении подвижного состава**

Для учета микрогеометрии пути было проведено поочередное моделирование движения поезда с постоянной скоростью 80, 100 и 120 км/ч по кривым, имеющим радиус 1 200, 1 500, 2 000, 2 500 и 3 000 м. Кривые были выбраны для отдельных участков Сургутской дистанции пути Свердловской железной дороги. Выбор скоростей обусловлен «Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года», а именно тем фактором, что одним из перспективных направлений является

движение высокоскоростного подвижного состава и введение тяжеловесного движения поездов.

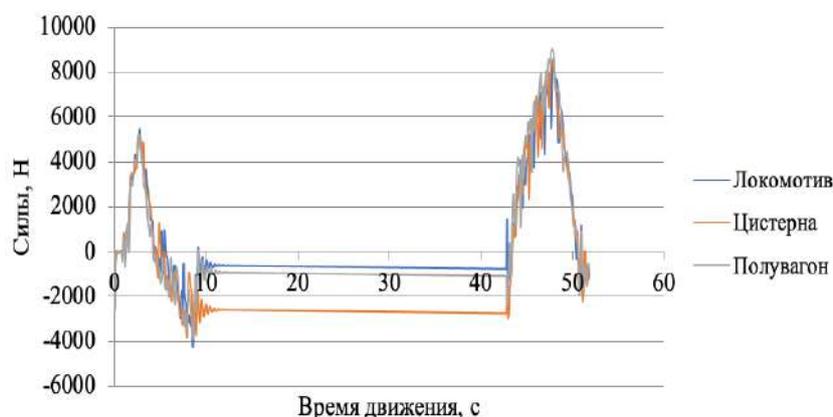
Были детально изучены максимальные поперечные силы на контакте «колесо – рельс» и места их возникновения. Анализ этих параметров показал, что наибольшие поперечные силы от прохода подвижного состава возникают в начале круговой кривой и в конце входной переходной кривой. Приведены результаты расчетов, по которым видно, что значения максимальных поперечных сил уменьшаются с увеличением радиуса круговой кривой и снижением скорости движения поездов (рис. 4).

В рамках дальнейших исследований планируется произвести расчеты модели для различных режимов движения поезда. Предварительные исследования показали, что силы, возникающие при тяге, холостом ходу и торможении, отличаются и различные режимы движения по-разному влияют на возникновение наибольших поперечных сил.

#### **Влияние нарушений макрогеометрии пути на возникновение дополнительных сил от движения подвижного состава**

Было выполнено моделирование движения 3D поезда с аналогичной осевой нагрузкой, скоростями движения и радиусами круговых кривых по участкам пути с отступлениями в плане, поочередно располагающимися в переходных кривых и круговой кривой (рис. 4).

В плане было принято отступление II степени. Такие отступления в плане являются наиболее распространенными и для них не требуется ограничение скоростей. Предварительно было произведено моделирование, результаты которого показали, что случаи совпадения направления отступления в плане и направления круговой кривой более опасно, чем случаи их разнонаправленности. Было принято решение проводить дальнейшее моделирование в



**Рис. 3.** Зависимость величины максимальной поперечной силы от времени движения подвижного состава для разных видов подвижной единицы (для второй оси первой колесной пары)

**Fig. 3.** Dependence of the magnitude of the maximum transverse force on the time of movement of the rolling stock for different types of rolling units (for the second axle of the first wheelset)

условиях совпадения их направлений.

Исследования показали, что наибольшие поперечные силы возникают на участке с отступлением или сразу за ним. При увеличении скоростей движения значения максимальных поперечных сил от прохода подвижного состава по отступлению в плане возрастают на 33 % в случае, если отступление находится в начале входной переходной кривой, и на 28 % – при расположении отступления в плане в конце выходной переходной кривой.

Сравнение результатов расчетов, выполненных на основе модели без нарушения геометрии пути и с ее нарушением, показало, что значения максимальных поперечных сил в среднем возрастают на 150 %. Это объясняется тем, что возникает дополнительная поперечная сила от отступления в плане  $H_p$  [12]. При этом если отступление в плане находится в круговой кривой, то значения максимальных поперечных сил в среднем возрастают в 10 раз. Предположительно это происходит из-за того, что в круговой кривой параметры макрогеометрии являются неизменными. При этом когда поезд заходит на измененный параметр микрогеометрии, то возникают большие резонансные силы. Эти силы в переходной кривой могут компенсироваться изменениями радиуса и возвышения, а в круговой кривой возможно их совместное взаимодействие с центробежной силой. За счет этого движение становится резко нестабильным. Для точного подтверждения или опровержения выдвинутой гипотезы необходимо проводить натурные исследования экспериментального полигона, где есть возможность исследовать реальные значе-

ния сил. При этом продолжительность исследований должна быть не менее чем от одного капитального ремонта до другого, чтобы проверить множество факторов и учесть их влияние.

Также исследования влияния макрогеометрии пути на возникновение дополнительных сил  $H_p$  от движения подвижного состава показало, что  $H_p$  составляет до 37 % от максимальных поперечных сил, возникающих при движении поезда по участкам без нарушений геометрии пути, для отступлений в плане, расположенных в прямой.

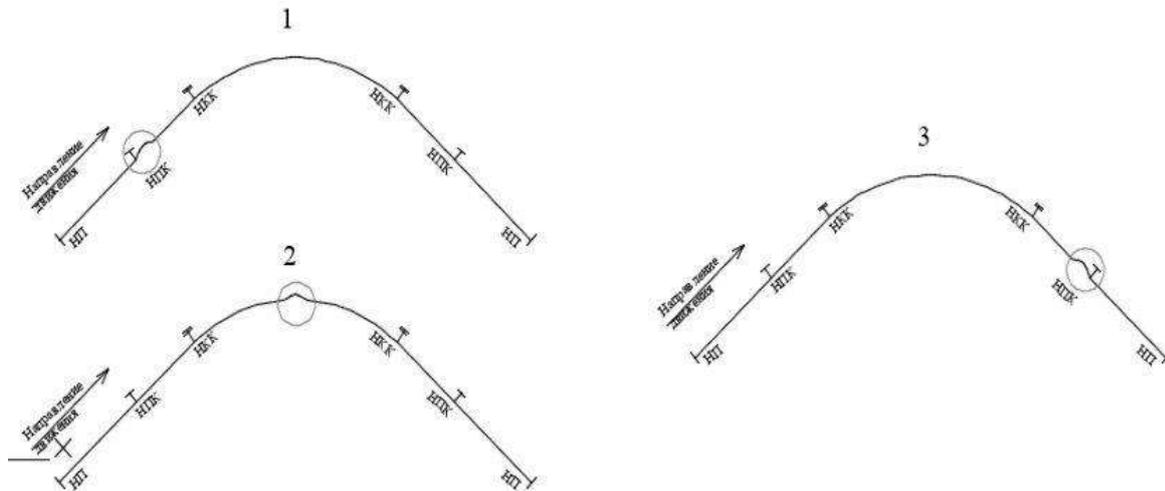
Важно отметить, что дополнительные силы  $H_p$  провоцируют дальнейшее развитие отступлений в плане при каждом проходе подвижного состава.

### Заключение

Таким образом, хочется отметить, что хоть и имеется большое количество факторов, влияющих на поперечную устойчивость пути, часть из них, к примеру, поездную нагрузку, возможно изучать и прогнозировать их поведение при расчетах в программных комплексах, проведении испытаний на полигоне и дальнейшем аналитическом анализе полученных данных.

Для проведения моделирования в ПК УМ рекомендуется рассчитывать 5 соединенных 3D вагонов, шаг интегрирования – 5 см, при учете движения поезда с постоянной скоростью не менее 80 км/ч. Также в расчетах учитывать макро- и микрогеометрию пути.

Автор в рамках дальнейших исследований планирует более подробно раскрыть влияние нагрузки



**Рис. 4.** Расположение отступления в плане:

1 – в начале входной переходной кривой;

2 – в середине круговой кривой

3 – в конце выходной переходной кривой

**Fig. 4.** Location of the deviation in the plan:

1 – at the beginning of the input transition curve; 2 – in the middle of the circular curve;

3 – at the end of the output transition curve

на поперечную устойчивость пути, что имеет большое значение для исследования инфраструктуры железных дорог.

### Список литературы

1. Коган А.Я. Поперечные горизонтальные силы, возникающие от действия продольных температурных сил в рельсовых плетях бесстыкового пути и передаваемые на подшпальное основание / А.Я. Коган // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 5. С. 10–13.
2. Суслев О.А. Функциональная безопасность эксплуатации бесстыкового пути: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.06 / Суслев Олег Александрович. М., 2017.
3. Мылников М.М. Оценка стабильности криволинейных участков пути в программном комплексе Pathcurve / М.М. Мылников, Ю.М. Кравченко // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2016. № 2(30). С. 19–28.
4. Лысюк В.С. Причины и механизм схода колеса с рельса. Проблемы износа колес и рельсов / В.С. Лысюк. М.: Транспорт, 1997. 188 с.
5. Стоянович Г.М., Пупатенко В.В. Проблемы и перспективы укладки и содержания бесстыковой конструкции пути на Восточном полигоне ОАО «РЖД» // Повышение эффективности транспортной системы региона: проблемы и перспективы: матер. Всерос. науч.-практ. конф. с международным участием : В 3 т. Под редакцией С.М. Гончарука. 2015. С. 14–29.
6. Шахуняц, Г.М. Железнодорожный путь / Г.М. Шахуняц. Учеб. для студентов и аспирантов вузов железнодорожного транспорта. Изд. 3-е, перераб. и доп. Москва: Транспорт, 1987. 479 с.
7. Новакович В.И. Об устойчивости бесстыкового пути / В.И. Новакович, Г.В. Карпачевский, Н.И. Залавский // Журнал «Путь и путевое хозяйство». 2013. № 11. С. 19.
8. Мылникова М.А. Определение наиболее опасных мест выброса бесстыкового пути с учетом влияния отступлений в плане на его устойчивость / М.А. Мылникова // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2017. № 5. С. 192–195.
9. Мылникова М.А. Бализа как способ контроля за напряженным состоянием бесстыкового пути и движением поездов / М.А. Мылникова, С.Ю. Кияткина // Инновационный транспорт. 2018. № 2 (28). С. 39–43.
10. Скутина М.А. Влияние изменения температуры пути по поверхности и сечению рельса на устойчивость бесстыкового пути // Транспорт Урала. 2017. № 1 (52). С. 81–85.
11. Скутин Д.А. Определение мест возникновения наибольших поперечных сил при движении подвижного состава по кривой // Вестник УрГУПС. 2017. № 2(34). С. 101–110.
12. Аккерман Г.Л., Скутин Д.А. Оценка поперечной устойчивости рельсошпальной решетки в балластной призме с применением геосинтетиков // Проектирование развития региональной сети железных дорог: сб. науч. тр. / под ред. В.С. Шварцфельда. 2015. № 3. С. 8–17.
13. Мылников М.М., Скутин А.И. Разработка модели возникновения поперечных сил в балластном слое под воздействием внешних нагрузок // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 4 (68). С. 220–230.
14. Исламов А.Р. Исследование сопряжения элементов продольного профиля железнодорожного пути посредством имитационного моделирования: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06 / Исламов Айдар Рафатович. Санкт-Петербург, 2014.
15. Мылникова М.А. Мониторинг напряженного состояния бесстыкового пути при помощи бализы: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.06 / Мылникова Мария Александровна. Санкт-Петербург, 2019.
16. Мылникова М.А. Способ определения выброса плетей бесстыкового железнодорожного пути / М.А. Мылникова, Г.Л. Аккерман // Патент Россия №2687852, 2019.
17. Skutina M.A. Control over transverse shifts of rail sleeper lattice which impact on deformation of ballast layer / G.L. Akkerman, M.A. Skutina // Procedia Engineering. 2017. С. 181–185.
18. Скутина М.А. Прогнозирование выброса и разрыва рельсовой плети с использованием бализ, экспериментальное определение скорости изменения температурно-напряженного состояния рельсовых плетей / М.А. Скутина // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2016. № 4. С. 360–365.
19. Мылникова М.А. Организация мониторинга за напряженным состоянием бесстыкового пути / М.А. Мылникова, Г.Л. Аккерман // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2018. № 2 (38). С. 50–56.

### References

1. Kogan A.Ya. Poperechnye gorizontaľnyye sily, vznikayushchie ot deistviya prodol'nykh temperaturnykh sil v rel'sovykh pletyakh besstykovogo puti i peredavaemye na podshpal'noe osnovanie [Transverse horizontal forces arising from the action of longitudinal temperature forces in the rail strings of a continuous welded track and transmitted to the sub-sleeper foundation]. *Vestnik VNIIZHT [Vestnik of the Railway Research Institute]*, 2011. No. 5. Pp. 10–13.
2. Suslov O.A. Funktsional'naya bezopasnost' ekspluatatsii besstykovogo puti: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.06 [Functional safety of operation of a continuous welded track: D. Sc. (Engineering) diss.: 05.22.06]. Moscow, 2017.
3. Myl'nikov M.M., Kravchenko Yu.M. Otsenka stabil'nosti krivolineinykh uchastkov puti v programmnom komplekse Pathcurve [Evaluation of the stability of curved sections of the track in the Pathcurve software package]. [*Herald of the Ural State University of Railway Transport*], 2016. No. 2 (30). Pp. 19–28.

4. Lysyuk V.S. Prichiny i mekhanizm skhoda koleśa s rel'sa. Problemy iznosa koleś i rel'sov [Reasons and mechanism of the wheel derailment. Problems of wear of wheels and rails]. Moscow: Transport Publ., 1997. 188 p.
5. Stoyanovich G.M., Pupatenko V.V. Problemy i perspektivy ukladki i sodержaniya besstykovoi konstruksii puti na Vos-tochnom poligone OAO «RZhD» [Problems and prospects of laying and maintenance of continuous welded track structure on the Eastern Polygon of «Russian Railways» OAO]. *Povyshenie effektivnosti transportnoi sistemy regiona: problemy i perspektivy: mater. Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiem : V 3 t. [In the collection: Improving the efficiency of the transport system in the region: problems and prospects materials of the all-Russian scientific and practical conference with international participation: In 3 volumes]*. In Goncharuk S.M. (ed.), 2015. Pp. 14–29.
6. Shakhnyants G.M. Zheleznodorozhnyi put'. Ucheb. dlya studentov i aspirantov vuzov zheleznodorozhnogo transporta. Izd. 3-e, pererab. i dop. [Railway track. A textbook for students and postgraduates of railway transport universities. 3<sup>rd</sup> ed., revised and enlarged]. Moscow: Transport Publ., 1987. 479 p.
7. Novakovich V.I., Karpachevskii G.V., Zalavskii N.A. Ob ustoychivosti besstykovogo puti [On the stability of the continuous welded track]. *Put' i putevoe khozyaistvo [Railway track and facilities]*, 2013. No. 11. Pp. 19.
8. Myl'nikova M.A. Opredelenie naibolee opasnykh mest vybrosa besstykovogo puti s uchedom vliyaniya otstuplenii v plane na ego ustoychivost' [Determination of the most dangerous places of the continuous welded track distortion with regard to the influence of deviations in the plan for its sustainability]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog [Designing the development of the regional railway network]*, 2017. No. 5. Pp. 192–195.
9. Myl'nikova M.A., Kiyatkina S.Yu. Baliza kak sposob kontrolya za napryazhennym sostoyaniem besstykovogo puti i dvizheniem poezdov [Balise as a means of controlling the stress state of the continuous welded track and train traffic]. *Innovatsionnyi transport [Innovative transport]*, 2018. No. 2 (28). Pp. 39–43.
10. Skutina M.A. Vliyanie izmeneniya temperatury po poverkhnosti i secheniyu rel'sa na ustoychivost' besstykovogo puti [Influence of temperature changes on the surface and cross-section of the rail on the stability of a continuous welded track]. *Transport Urala [Transport of the Urals]*, 2017. No. 1 (52). Pp. 81–85.
11. Skutin D.A. Opredelenie mest vozniknoveniya naibol'shikh poperechnykh sil pri dvizhenii podvizhnogo sostava po krivoi [Determining the places of occurrence of the greatest transverse forces when moving a rolling stock along a curve]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta [Herald of the Ural State University of Railway Transport]*, 2017. No. 2(34). Pp. 101–110.
12. Akkerman G.L., Skutin D.A. Otsenka poperechnoi ustoychivosti rel'soshpal'noi reshetki v ballastnoi prizme s primeneniem geosintetkov [Estimation of the transverse stability of the rail-sleeper grid in a ballast prism using geosynthetics]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog: sb. nauch. tr. [The development of a regional network of railways: a collection of research works]*. In Sarsfield V. S. (ed.), 2015. No. 3. Pp. 8–17.
13. Myl'nikov M. M., Skutin A.I. Razrabotka modeli vozniknoveniya poperechnykh sil v ballastnom sloe pod vozdeistviem vneshnikh nagruzok [Development of a model for the occurrence of transverse forces in a ballast layer under the influence of external loads]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling]*, 2020. No. 4 (68). Pp. 220–230.
14. Islamov A.R. Issledovanie sopryazheniya elementov prodol'nogo profilya zheleznodorozhnogo puti posredstvom imitatsionnogo modelirovaniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.22.06 [Research of conjugation of elements of a longitudinal profile of a railway track by means of simulation modeling: an author's abstract of the Ph.D. (Engineering) diss.: 05.22.06]. Saint Petersburg, 2014.
15. Myl'nikova M.A. Monitoring napryazhennogo sostoyaniya besstykovogo puti pri pomoshchi balizy: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.22.06 [Monitoring of the stress state of the continuous welded track with the help of a balise: abstract of the Ph.D. (Engineering) diss.: 05.22.06]. Saint Petersburg, 2019.
16. Myl'nikova M.A., Akkerman G.L. *Sposob opredeleniya vybrosa pletei besstykovogo zheleznodorozhnogo puti [A method for determining the discharge of lashings of a non-jointed railway track]*. Patent Russia No. 2687852, 2019.
17. Skutina M.A., Akkerman G.L. Control over transverse shifts of rail sleeper lattice which impact on deformation of ballast layer. *Procedia Engineering*, 2017. Pp. 181–185.
18. Skutina M.A. Prognozirovanie vybrosa i razryva rel'sovoi pletei s ispol'zovaniem baliz, eksperimental'noe opredelenie skorosti izmeneniya temperaturno-napryazhennogo sostoyaniya rel'sovykh pletei [Prediction of distortion and breakage of the rail string using balises, experimental determination of the rate of change of temperature and stress state rail strings]. *Proektirovanie razvitiya regional'noi seti zheleznykh dorog [Design for the development of regional railway networks]*, 2016. No. 4. Pp. 360–365.
19. Myl'nikova M.A., Akkerman G.L. Organizatsiya monitoringa za napryazhennym sostoyaniem besstykovogo puti [Organization of monitoring of the strained state of the continuous welded track]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Herald of the Ural State University of Railway Transport]*, 2018. No. 2 (38). Pp. 50–56.

#### Информация об авторах

**Мильникова Мария Александровна** – канд. техн. наук, ассистент кафедры пути и железнодорожного строительства, Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург, e-mail: mylnikova.ma93@gmail.com

#### Information about the authors

**Mariya A. Myl'nikova** – Ph. D. in Engineering Science, assistant of the Subdepartment of Railway Track and Railway Construction, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, e-mail: mylnikova.ma93@gmail.com