

## Сложная пространственная геометрия криволинейных участков трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей

С. В. Шкурников, О. С. Булакаева, В. А. Анисимов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Шкурников С. В., Булакаева О. С., Анисимов В. А. Сложная пространственная геометрия криволинейных участков трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 2. — С. 164–178. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-164-178

### Аннотация

**Цель:** В работе изложены некоторые перспективные направления современного развития науки проектирования плана и профиля трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей, главной задачей которых является критическое переосмысление положений существующей нормативной базы проектирования. Вопрос о недопустимости устройства участков сложной пространственной геометрии — участков совпадения вертикальной кривой в профиле и переходной кривой в плане — является одним из таких положений. **Методы:** В рамках проведенного исследования предложен теоретический подход к определению силовых воздействий на участке сложной пространственной геометрии. **Результаты:** Установлено, что на величину силовых воздействий оказывают влияние направление вертикальной кривой (выпуклая или вогнутая), а также расчетная величина непогашенного ускорения в рассматриваемой кривой. Исследования влияния участков сложной пространственной геометрии на динамику движения высокоскоростного подвижного состава показывают, что при определенном сочетании радиусов круговых и вертикальных кривых для различных скоростей движения можно минимизировать негативные динамические воздействия, вызванные наличием участка сложной пространственной геометрии. **Практическая значимость:** В результате работы установлено, что при скоростях 350 и более км/ч совмещение вертикальной кривой в профиле и переходной кривой в плане возможно без применения дополнительных требований к параметрам кривых. При скоростях движения менее 350 км/ч необходимо увеличивать радиус круговой кривой на 30–60 %.

**Ключевые слова:** План трассы, высокоскоростная железнодорожная магистраль, переходные кривые, вертикальные кривые, совмещение вертикальной и переходной кривой.

### Введение

Одно из современных направлений науки изысканий и проектирования железных дорог предопределено Транспортной стратегией Российской Федерации и связано с выбором оптимальных параметров плана и профиля трассы в условиях внедрения и развития высокоскоростного пассажирского движения. Классический подход к проектированию плана и профиля трассы железной дороги ограничен применением норм, которые не теряют своей актуальности на протяжении нескольких десятилетий. Внедрение современных инновационных или

принципиально новых типов подвижного состава и элементов верхнего строения пути отражается на процессах их взаимодействия и влияет на принятие проектных решений, что приводит к необходимости переосмысления некоторых устоявшихся норм и правил [1].

Нормативная величина непогашенного ускорения обеспечивает комфорт пассажиров при движении высокоскоростного поезда и косвенно определяет уровень допустимого бокового воздействия подвижного состава на путь. В России рекомендована норма непогашенного ускорения  $0,4 \text{ м/с}^2$  при максимальной скорости движения  $400 \text{ км/ч}$ . Данная величина в целом соизмерима с требованиями Европейских стандартов [2, 3]. Однако российскими исследованиями на основе поездных испытаний установлена предельная величина непогашенного ускорения для скоростного и высокоскоростного движения —  $1,0 \text{ м/с}^2$ , обусловленная эксплуатацией подвижного состава с улучшенными динамическими качествами. Увеличение нормативного значения непогашенного ускорения до  $0,75 \text{ м/с}^2$  также отмечается на высокоскоростных магистралях Китая [4, 5].

Другое направление совершенствования геометрии трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей (далее — ВСМ) связано с определением рациональной формы криволинейного участка. С целью повышения плавности движения поездов проводятся исследования возможности устройства кривой посредством сопряжения двух клотоид как в плане, так и в профиле трассы. Необходимость устройства прямой вставки между двумя смежными кривыми в плане, при условии «клотоидного» сопряжения, также неочевидна согласно [6]. В работах [7–10] рассматриваются вопросы пространственного описания переходных кривых, обусловленного характером изменения кривизны и возвышения наружного рельса в пределах их длины. Помимо традиционных для Российской Федерации переходных кривых с линейно изменяющейся кривизной, в мировом опыте применяются синусоидальные и полиномиальные переходные кривые. Основным преимуществом переходных кривых с нелинейной функцией кривизны и возвышения является непрерывность их первых производных в участках сопряжения переходных и круговых кривых, обеспечивающая снижение негативных динамических воздействий в этих сопряжениях.

При разработке специальных технических условий (СТУ) для проектирования ВСМ Москва — Санкт-Петербург в 2021 г. российским научным и экспертным сообществом принято решение допустить возможность совмещения вертикальной кривой в профиле и переходной кривой в плане при скоростях движения свыше  $200 \text{ км/ч}$ . Это допущение является новым, в отличие от установленных ранее (СТУ для проектирования ВСМ Москва — Санкт-Петербург 2009 г., СТУ для проектирования ВСМ Москва — Казань 2017 г.) нормативных требований для проектирования трассы ВСМ. Считается, что недопустимость совмещения

переходных и вертикальных кривых на одном участке трассы связана с трудностью содержания сложной пространственной кривой. Однако применение современных систем лазерного сканирования, GPS и ГЛОНАСС позволяет упростить решение этой задачи [6]. Длина вертикальной кривой пропорциональна радиусу, поэтому для размещения вертикальных кривых за пределами переходных кривых требуются более длинные элементы продольного профиля, что вызывает трудности трассирования и увеличивает стоимость сооружения магистрали. В работе [6] установлено, что выполнение требования о несовпадении вертикальных кривых в плане и переходных кривых в профиле приводит к увеличению строительной стоимости ВСМ на 33,8 %.

Анализ мировых подходов к проектированию участков сложной пространственной геометрии на ВСМ — участков совмещения вертикальной кривой в профиле и переходной кривой в плане показывает, что в большинстве случаев такое совпадение недопустимо или накладывает дополнительные ограничения для величин минимальных радиусов вертикальных или круговых кривых. В странах Европейского союза в стандарте EN13803—2017 прямой запрет на совпадение вертикальной и переходной кривой отсутствует. Однако в методических рекомендациях по проектированию плана и профиля трассы RBDG — MAN-013-0105, разработанных для проекта Rail Baltica, предусмотрены большие радиусы вертикальных кривых при необходимости подобного совмещения в исключительных случаях [11].

Согласно положениям технического меморандума Alignment Standards for Shared Use Corridors для проекта ВСМ в Калифорнии [12] допускаемое в трудных условиях значение недостатка возвышения должно быть уменьшено, если какая-либо часть круговой кривой расположена в пределах выпуклой вертикальной кривой, длина которой меньше значений, допускаемых в нормальных условиях. Совпадение вертикальной и переходной кривой возможно в том случае, если длины элементов принимают значения меньше допускаемых в трудных условиях.

При проектировании ВСМ в Китае не рекомендуется не только совмещение вертикальной кривой в профиле и переходной кривой в плане, но и совмещение вертикальной и круговой кривых. Это положение имеет существенное отличие от общепринятых требований к проектированию плана и профиля не только для высокоскоростных магистралей, но и для обычных железных дорог. В трудных условиях допускается совмещение вертикальных и круговых или переходных кривых при определенном сочетании их радиусов. В то же время в работе [13] отмечено, что существование данного запрета привело к увеличению стоимости строительства ВСМ Шанхай — Пекин на 55 %. Допущение совпадения вертикальных, круговых (переходных) кривых приведет к достижению экономического эффекта в том случае, если динамические показатели взаимодействия пути и высокоскоростного подвижного состава будут соответствовать требованиям безопасности и

комфорта. В результате исследований X. Fan, B. Li, Y. Zhang и др. [14] установлено, что негативное динамическое воздействие, вызванное наличием участка сложной пространственной геометрии, может быть полностью устранено при применении радиусов круговых кривых более 9000 м.

### Теоретический подход к определению силовых воздействий на участке сложной пространственной геометрии

Известно, что при движении подвижного состава в кривой возникают центробежные и центростремительные силы. Наличие вертикальной кривой на участке сложной пространственной геометрии создает дополнительное силовое воздействие, являющееся горизонтальной составляющей центробежной силы, действующей в вертикальной плоскости, которое в зависимости от направления вертикальной кривой (выпуклая или вогнутая) дополняет центробежную или центростремительную силы (рис. 1).

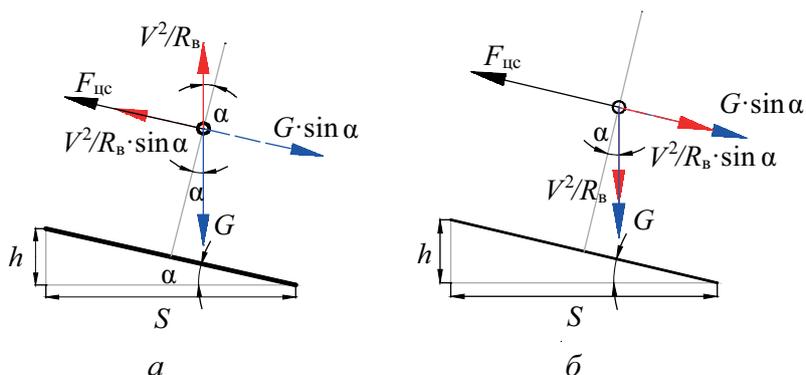


Рис. 1. Действие сил на подвижной состав на участке сложной пространственной геометрии:  
*a* — выпуклая вертикальная кривая; *б* — вогнутая вертикальная кривая

Равновесное возвышение наружного рельса на участке сложной пространственной геометрии  $h^*$  может быть вычислено по формулам для выпуклой или вогнутой вертикальных кривых соответственно:

$$h^* = \frac{h}{\left(1 - \frac{V^2}{3,6^2 \cdot g \cdot R_B}\right)} \text{ или } h^* = \frac{h}{\left(1 + \frac{V^2}{3,6^2 \cdot g \cdot R_B}\right)}, \quad (1)$$

где  $V$  — скорость движения подвижного состава, км/ч;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $R_B$  — радиус вертикальной кривой, м;  $h$  — возвышение наружного рельса в круговой кривой (без учета вертикальной кривой), мм, определяемое

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчетов непогашенного ускорения на участке сложной пространственной геометрии

$R$ , м	$V$ , км/ч	$a_{нп}$ , м/с <sup>2</sup>	$R_{в}$ , м	$h$	$h^*$	$a_{нп}$ фактическое в выпуклой кривой	$a_{нп}$ фактическое в вогнутой кривой	$\Delta a_{нп}$ (max), %
10 000	250	0,1	25 000	62	64	0,09	0,11	7
9000				71	72	0,09	0,11	8
8000				82	84	0,09	0,11	10
7000				96	98	0,09	0,11	11
6000				115	117	0,09	0,11	14
5000				141	144	0,08	0,12	17
4000				180	184	0,08	0,12	21
3000				245	251	0,07	0,13	29

из условия:

$$h = \frac{S}{g} \cdot \left( \frac{V^2}{3,6^2 R} - a_{нп} \right), \quad (2)$$

где  $S$  — расстояние между осями рельсов, мм;  $a_{нп}$  — установленное непогашенное ускорение для данной круговой кривой, м/с<sup>2</sup>.

Тогда фактическое непогашенное ускорение на участке сложной пространственной геометрии будет отличаться на величину, численно равную:

$$\Delta a_{нп} = (h - h^*) \frac{g}{S}. \quad (3)$$

Результаты теоретических расчетов показывают, что фактическое непогашенное ускорение в вогнутой вертикальной кривой (при положительном непогашенном ускорении) превышает расчетное до 29 %. Абсолютная разница  $\Delta a_{нп}$  невелика, однако это не является незначительным для динамического взаимодействия пути и подвижного состава на участках совмещения вертикальной и переходной кривой. Особенно в месте сопряжения переходной и круговой кривой, где максимальное поперечное ускорение может возрастать в несколько раз при высоких скоростях движения вследствие «разрывов» первой производной функций кривизны и возвышения в случае «клотоидной» переходной кривой.

### Исследования влияния участков сложной пространственной геометрии на динамику движения высокоскоростного подвижного состава

Исследование взаимодействия пути и подвижного состава на участках сложной пространственной геометрии со скоростями движения от 200 до 350 км/ч проводилось с использованием компьютерной имитационной модели взаимодействия

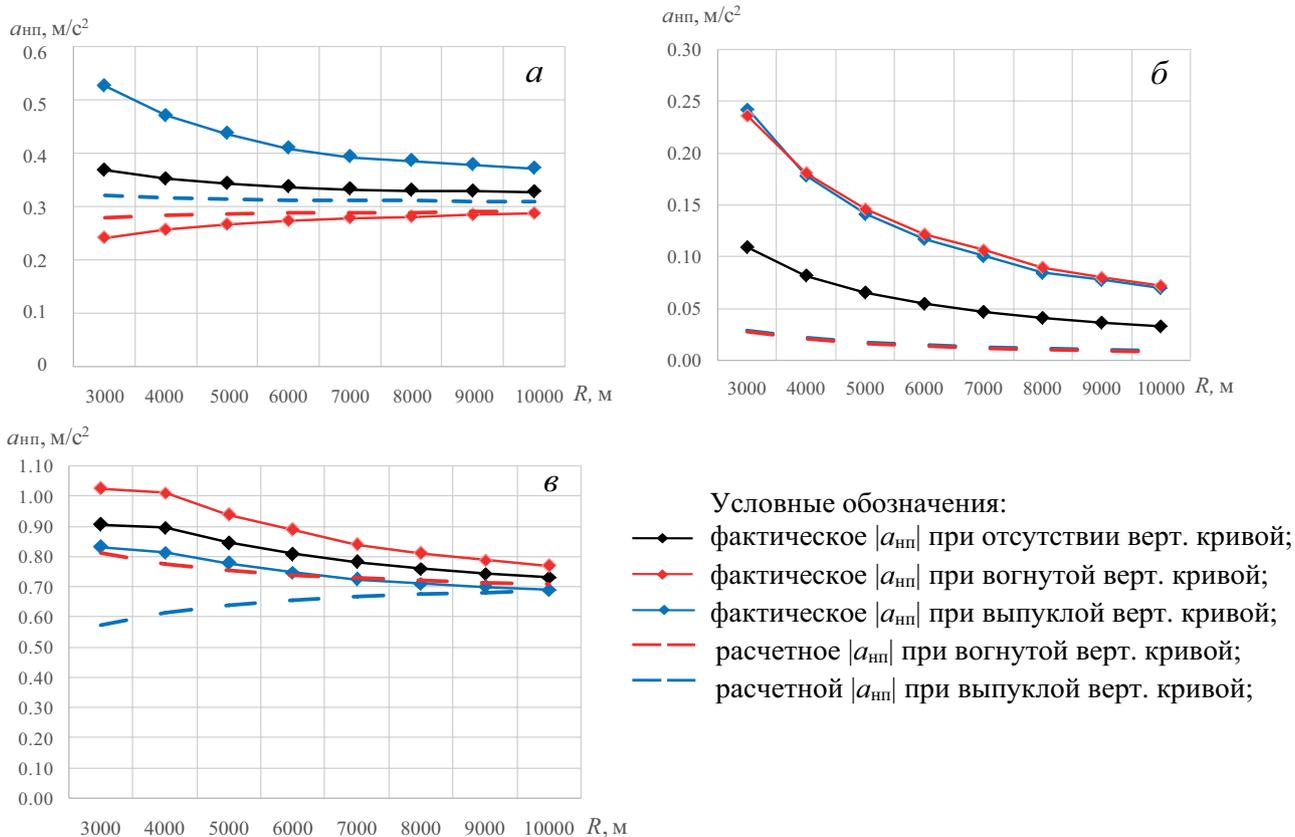
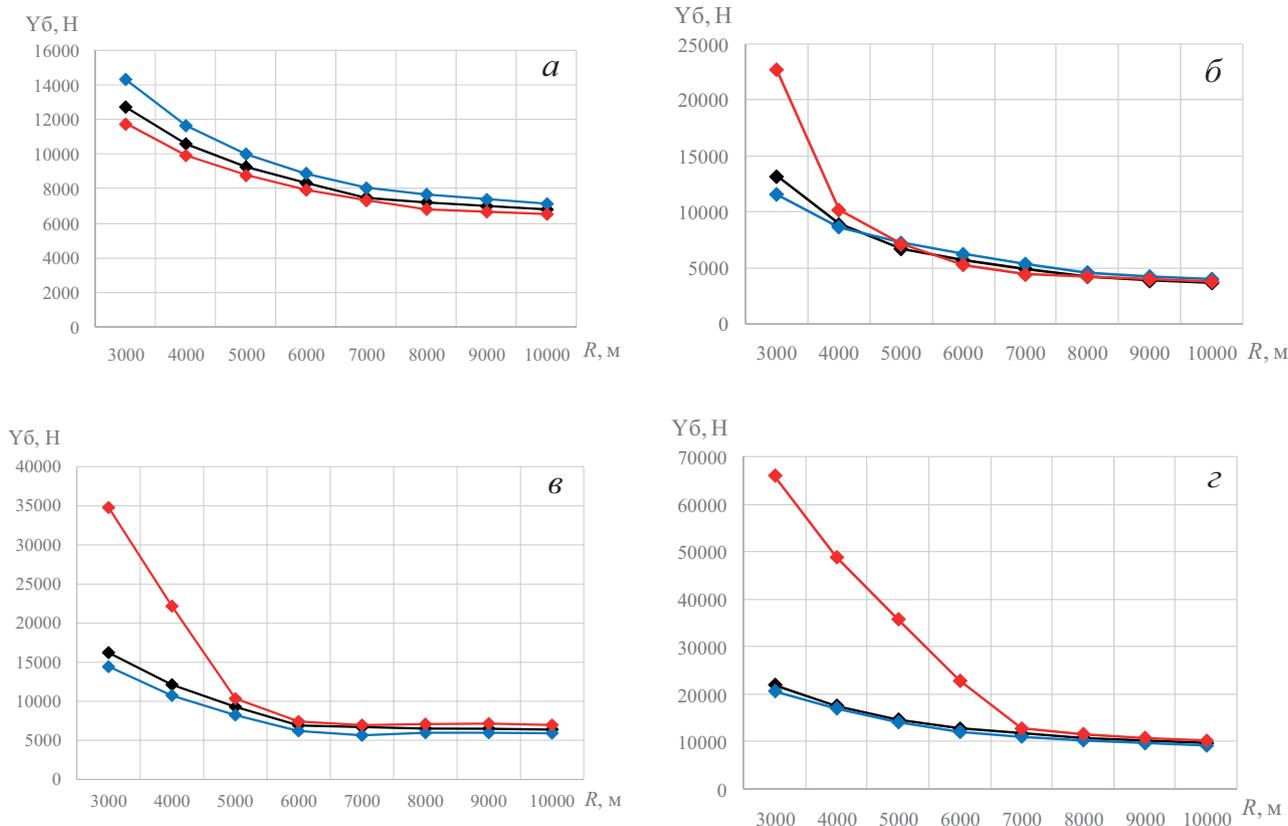


Рис. 2. Фактические поперечные ускорения на участке сложной пространственной геометрии:  
 $a$  —  $a_{\text{нп.расч}}$  — минус  $0,3 \text{ м/с}^2$ ;  $б$  —  $a_{\text{нп.расч}}$  —  $0 \text{ м/с}^2$ ;  $в$  —  $a_{\text{нп.расч}}$  —  $0,7 \text{ м/с}^2$

пути подвижного состава в криволинейных участках пути, адаптированной для решения задач выбора проектных параметров плана трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей [15, 16] при различных сочетаниях радиусов круговых и вертикальных кривых. Радиусы круговых кривых принимались от 3000 до 10 000 м. Возвышение наружного рельса назначалось из условия обеспечения расчетной величины непогашенного ускорения от минус  $0,3 \text{ м/с}^2$  до  $0,7 \text{ м/с}^2$  при заданной скорости движения и радиусе круговой кривой. Радиусы вертикальных кривых принимали значения 20 000 м, 30 000 м, 40 000 м. Продольный уклон составлял 24 ‰. Длина вертикальной кривой рассчитывалась из условия  $R_v/0,048$ . Длина переходной кривой принималась равной 600 м во всех расчетных случаях.

Результирующими величинами являлись фактическое вертикальное ускорение  $a_v$ , фактическое поперечное ускорение  $a_{\text{нп}}$ , боковая сила  $Y_6$ , вертикальная сила  $P$ . Некоторые результаты компьютерного моделирования приведены далее.

На рис. 2 представлены зависимости фактического поперечного ускорения, возникающего при движении экипажа на участке сложной пространственной геометрии, от радиуса круговой кривой при различном расчетном непогашенном



Условные обозначения:

- ◆— фактическое  $Y_6$  при отсутствии вертикальной кривой в пределах переходной;
- ◆— фактическое  $Y_6$  при вогнутой вертикальной кривой в пределах переходной;
- ◆— фактическое  $Y_6$  при выпуклой вертикальной кривой в пределах переходной;

Рис. 3. Максимальные боковые силы, возникающие в участке сложной пространственной геометрии:  
 $a$  —  $a_{\text{нп.расч}}$  — минус  $0,3 \text{ м/с}^2$ ;  $б$  —  $a_{\text{нп.расч}}$  —  $0 \text{ м/с}^2$ ;  $в$  —  $a_{\text{нп.расч}}$  —  $0,3 \text{ м/с}^2$ ;  
 $г$  —  $a_{\text{нп.расч}}$  —  $0,7 \text{ м/с}^2$

ускорении. Направление вертикальной кривой оказывает влияние на величины исследуемого силового взаимодействия. При отрицательном расчетном непогашенном ускорении наличие выпуклой вертикальной кривой увеличивает величины максимальных поперечных ускорений. Комбинация вертикальной вогнутой кривой в пределах переходной кривой несколько снижает значения поперечного ускорения. В участках сложной пространственной геометрии, содержащих круговые кривые с радиусом 3000–4000 м, максимальные поперечные ускорения превышают расчетные до 50 % при  $a_{\text{нп.расч}}$ , равном минус  $0,3 \text{ м/с}^2$ , до 20 % — при  $a_{\text{нп.расч}}$  равном  $0 \text{ м/с}^2$ , до 40 % — при  $a_{\text{нп.расч}}$ , равном  $0,7 \text{ м/с}^2$ .

На рис. 3 представлены зависимости максимальной боковой силы, возникающей при движении экипажа на участке сложной пространственной геометрии,

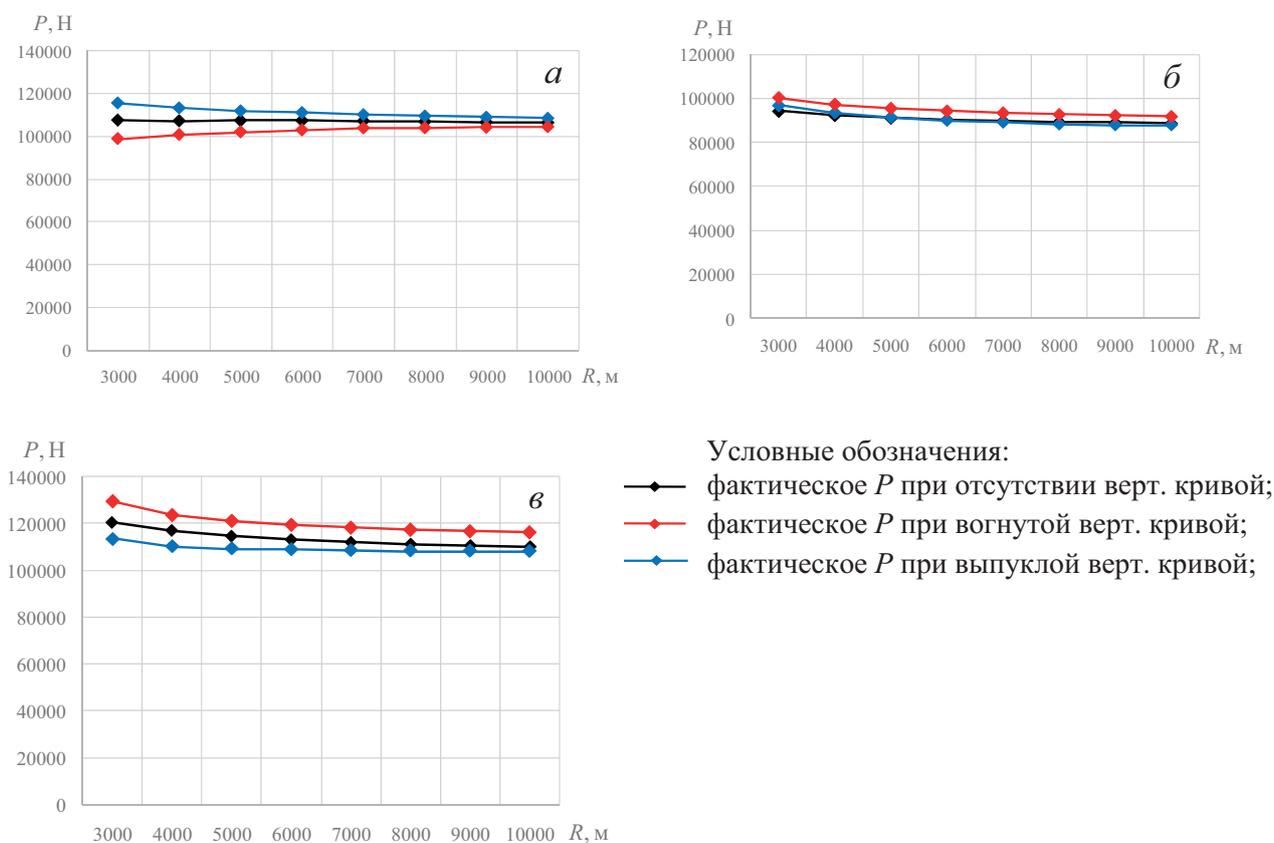


Рис. 4. Максимальные вертикальные силы, возникающие при движении экипажа на участке сложной пространственной геометрии:

$a$  —  $a_{\text{нп.расч}}$  — минус  $0,3 \text{ м/с}^2$ ;  $б$  —  $a_{\text{нп.расч}}$  —  $0 \text{ м/с}^2$ ;  $в$  —  $a_{\text{нп.расч}}$  —  $0,7 \text{ м/с}^2$

от радиуса круговой кривой при различном расчетном непогашенном ускорении. Максимальные боковые силы зависят от расчетной величины непогашенного ускорения и радиуса круговой кривой. При этом на участке сложной пространственной геометрии их превышение может достигать 70 % в сравнении с значением максимальных боковых сил, возникающих при движении по участку, содержащему только круговые и переходные кривые. Такое превышение характерно для участков с радиусом круговых кривых до 6000 м при движении экипажа со скоростью, обеспечивающей расчетное непогашенное ускорение плюс  $0,7 \text{ м/с}^2$  на данной кривой.

На рис. 4 показаны зависимости максимальной вертикальной силы, возникающей при движении экипажа на участке сложной пространственной геометрии, от радиуса круговой кривой при различном расчетном непогашенном ускорении.

Наличие сложной пространственной геометрии на криволинейном участке не оказывает существенного воздействия на вертикальные силы. Превышение максимальной вертикальной силы на участке сложной пространственной геометрии

составляет не более 10 % в сравнении со значением максимальных вертикальных сил, возникающих при движении по участку, содержащему только круговые и переходные кривые.

### **Определение проектных параметров, обеспечивающих возможность совмещения вертикальной кривой в профиле и переходной кривой в плане**

Определение возможности устройства участка совмещения вертикальной кривой в профиле и переходной кривой в плане осуществлялось с использованием результатов моделирования. Для каждого сочетания радиусов вертикальных кривых в профиле и круговых кривых в плане при заданном расчетном непогашенном ускорении проводилось сопоставление силовых воздействий, возникающих при движении в выпуклой вертикальной кривой в пределах переходной кривой, вогнутой вертикальной кривой в пределах переходной кривой и при отсутствии вертикальной кривой в пределах переходной кривой. Превышение силовых воздействий до 10 % на участке сложной пространственной геометрии в сравнении с криволинейным участком без вертикальной кривой принималось допустимым в рамках данного исследования и рассматривалось как обеспечение минимизации негативных динамических воздействий, вызванных преодолением участка сложной пространственной геометрии.

В качестве основного критерия, обеспечивающего комфортабельность движения, рассматривалось превышение максимальной величины поперечного ускорения на участке сложной пространственной геометрии. Поперечное ускорение и его производные по времени входят в состав основных индексов комфортабельности, применяемых в кривых участках пути, согласно EN 12299—2009. Основным критерием, обеспечивающим минимизацию силовых воздействий, являлось превышение максимальной боковой силы на участке совпадения вертикальной и переходной кривой.

На рис. 5 представлены зависимости потребных радиусов круговых и вертикальных кривых, обеспечивающие минимальные динамические воздействия на участке сложной пространственной геометрии в зависимости от расчетного непогашенного ускорения в кривой. Полученные зависимости с достаточной степенью значимости ( $R^2 \geq 0,7$ ) могут быть описаны уравнениями линейной регрессии, приведенными в табл. 2.

На рис. 6 представлены зависимости минимальных потребных радиусов круговых и вертикальных кривых, обеспечивающих допустимость совпадения вертикальной и переходной кривых от скорости движения, полученные из условия (2) при  $h = 150$  мм.

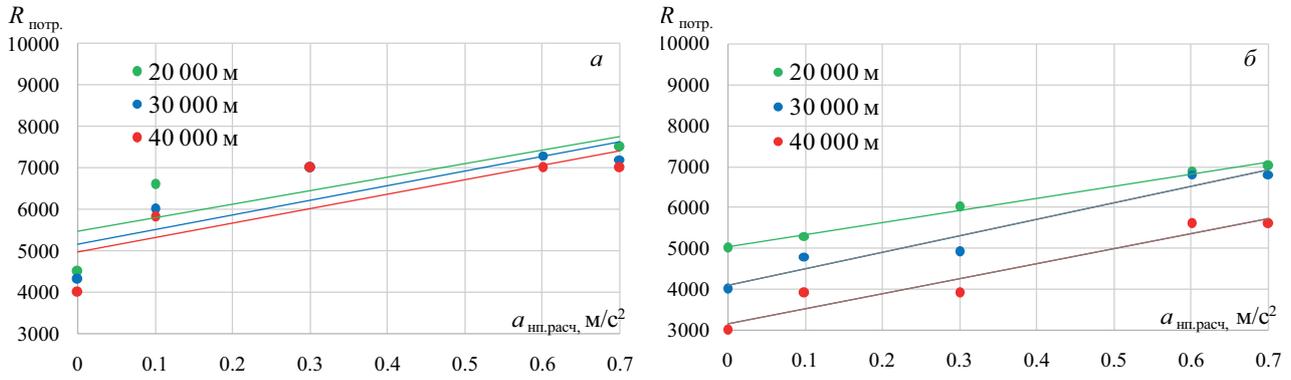


Рис. 5. Потребные радиусы кривых, обеспечивающие минимальные динамические воздействия на путь в участке сложной пространственной геометрии:  
*а* —  $R_{\text{потр}}$  по условиям комфортабельности;  
*б* —  $R_{\text{потр}}$  по условиям минимального силового воздействия

ТАБЛИЦА 2. Зависимости для определения проектных параметров вертикальных и круговых кривых на участке сложной пространственной геометрии, обеспечивающие минимальные воздействия на путь

Радиус вертикальной кривой, м	Зависимость потребного радиуса от расчетного непогашенного ускорения по условиям комфортабельности		Зависимость потребного радиуса от расчетного непогашенного ускорения по условиям минимального силового воздействия	
	$R_{\text{потр.}}$	$R^2$	$R_{\text{потр.}}$	$R^2$
20 000 м	$R_{\text{потр.}} = 3236a_{\text{нп}} + 5479$	$R^2 = 0,7$	$R_{\text{потр.}} = 2962a_{\text{нп}} + 5032$	$R^2 = 0,9$
30 000 м	$R_{\text{потр.}} = 3516a_{\text{нп}} + 5164$	$R^2 = 0,7$	$R_{\text{потр.}} = 4053a_{\text{нп}} + 4081$	$R^2 = 0,9$
40 000 м	$R_{\text{потр.}} = 3516a_{\text{нп}} + 4964$	$R^2 = 0,7$	$R_{\text{потр.}} = 3655a_{\text{нп}} + 3157$	$R^2 = 0,9$

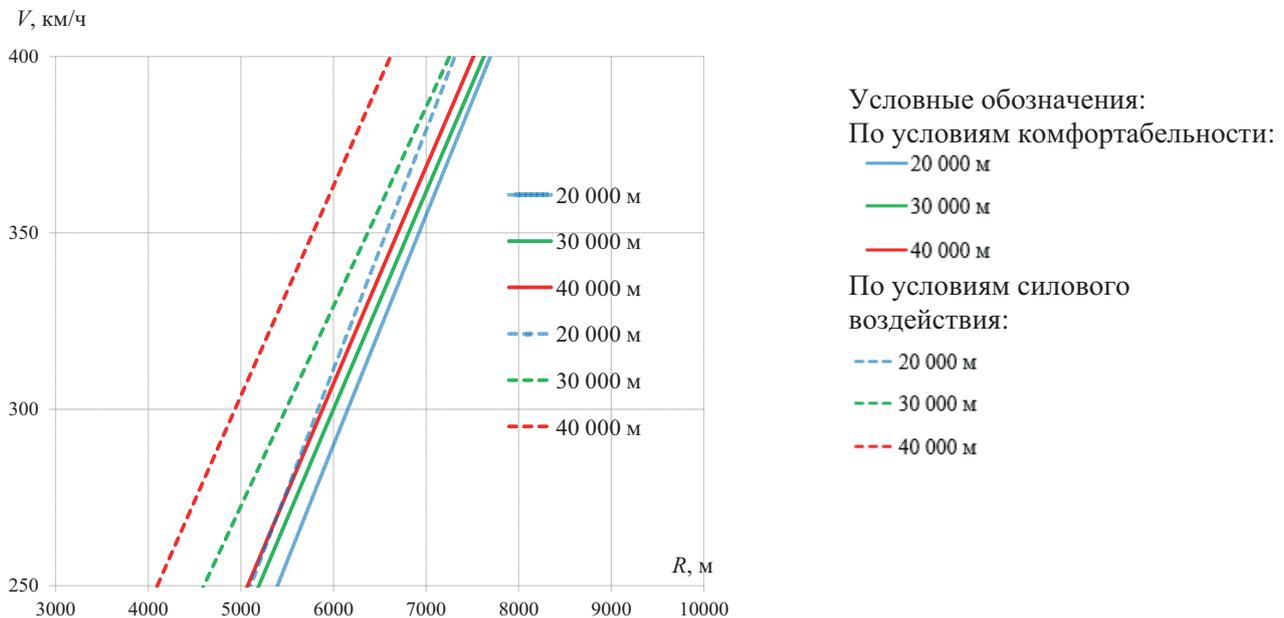


Рис. 6. Зависимости минимальных потребных радиусов круговых и вертикальных кривых на участке сложной пространственной геометрии от скорости движения

По условиям комфортабельности езды при скоростях движения 250 км/ч минимальные потребные радиусы круговых кривых на участках сложной пространственной геометрии составляют 5000–5400 м; при скоростях 300 км/ч — 5900–6200 м; при скоростях 350 км/ч — 6700–7000 м; при скоростях 400 км/ч — 7500–7700 м. По условию минимального силового воздействия при скоростях движения 250 км/ч минимальные потребные радиусы круговых кривых на участках сложной пространственной геометрии составляют 4200–5200 м; при скоростях 300 км/ч — 5000–5900 м; при скоростях 350 км/ч — 5800–6800 м; при скоростях 400 км/ч — 6500–7400 м. Увеличение радиуса вертикальной кривой способствует уменьшению значения потребного радиуса круговой кривой до 20 %

В России из условия непревышения расчетного непогашенного ускорения приняты следующие минимальные потребные радиусы круговых кривых на ВСМ — при скорости 250 км/ч минимальный радиус круговой кривой составляет 3000 м; при скорости 300 км/ч — 4500 м; при скорости 350 км/ч — 6700 м; при скорости 400 км/ч — 9400 м. Тогда для обеспечения возможности устройства участка сложной пространственной геометрии необходимо увеличить минимальный потребный радиус круговой кривой на 67 % при скорости 250 км/ч; на 31 % — при скорости 300 км/ч. При скоростях 350 и более км/ч совмещение вертикальной кривой в плане и переходной кривой в профиле возможно без применения дополнительных требований к параметрам кривых.

## **Заключение**

Результаты исследования позволяют обосновать возможность устройства участков сложной пространственной геометрии на высокоскоростной железнодорожной магистрали. На настоящем этапе исследования при проектировании криволинейных участков плана трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей для обеспечения возможности устройства участка сложной пространственной геометрии необходимо увеличить минимальный потребный радиус круговой кривой на 67 % при скорости 250 км/ч; на 31 % — при скорости 300 км/ч. При скоростях движения более 350 км/ч допускается совмещение вертикальной кривой в профиле и переходной кривой в плане без применения дополнительных требований к параметрам кривых. Установленные российскими нормативами более жесткие требования к расчетному непогашенному ускорению при скорости более 250 км/ч (или «запас на скорость», согласно [4]) способны компенсировать негативные динамические воздействия, вызванные отступлением пространственного положения трассы от идеальной геометрии, которым по своей сути и является участок совмещения переходной и вертикальной кривых.

Также необходимо отметить, что величины исследуемых силовых воздействий не превышают предельные значения ни в одном из рассмотренных расчетных случаев —  $[a_{\text{нп}}] \leq 1,0 \text{ м/с}^2$ ;  $[Y_6] \leq 100 \text{ кН}$ ;  $[P] \leq 160 \text{ кН}$ . Для объективной оценки допустимости динамического взаимодействия на участке сложной пространственной геометрии для других расчетных случаев (превышение более 10 %) необходимо устройство экспериментального участка сложной пространственной геометрии и проведение поездных испытаний с целью определения неучтенных принятой имитационной моделью внешних факторов, оказывающих дополнительное воздействие подвижного состава на путь, конструктивных особенностей верхнего строения пути и эксплуатируемого подвижного состава, а также мониторинга участка совмещения вертикальной и переходной кривой.

## Библиографический список

1. Морозова О. С. Параметры криволинейных участков трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей для условий совмещенного движения: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.06 / О. С. Морозова. — СПб., 2020. — 16 с.
2. Lindahl M. Track geometry for high-speed railways: A literature survey and simulation of dynamic vehicle response. Stockholm / M. Lindahl. — TRITA-FKT Report, Royal Institute of Technology, 2001. — 160 p.
3. EN 13803-1—2010: Railway applications — Track — Track alignment design parameters — Track gauges 1435 mm and wider — Part 1: Plain line [Required by Directive 2008/57/EC].
4. Sirong, Y. Dynamic analysis of high — speed railway alignment: theory and practice / Y. Sirong. — Academic Press. — 2018. — 324 p.
5. Wang K. Study on performance matching of wheel-rail dynamic interaction on curved track of speed-raised and high-speed railways / K. Wang, W. Zhai // China Railway Science. — 2014. — № 35(1). — Pp. 142–144. — DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2014.01.22/.
6. Аккерман Г. Л. Облик высокоскоростной железнодорожной магистрали / Г. Л. Аккерман, С. Г. Аккерман // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. — 2017. — № 2(34). — С. 46–56. — DOI: 10,20291/2079-0392-2017-2-46-56.
7. Velichko G. Quality analysis and evaluation technique of railway track + vehicle system performance at railway transition sections with various shape curves / G. Velichko // Transport Means 2020: Proceedings of the 24th International Scientific Conference Part II. — Pp. 573–578. — DOI:10.1088/1757-899X/1159/1/012022.
8. Hasslinger H. Measurement proof for the superiority of a new track alignment design element, the so-called Viennese Curve / H. Hasslinger. — Berlin: ZEVrail, 2005. — № 129. — Pp. 61–71.
9. Wojtczak R. General equation of cant ramp in form of polynomial of odd degree / R. Wojtczak. — URL: [https://www.researchgate.net/publication/324475023\\_General\\_equation\\_of\\_cant\\_ramp\\_in\\_](https://www.researchgate.net/publication/324475023_General_equation_of_cant_ramp_in_)

form\_of\_polynomial\_of\_odd\_degree (accessed 11 November 2020). — DOI: 10.13140/RG.2.2.28551.09123.

10. Морозова О. С. Способ улучшения плавности движения в криволинейных участках пути в плане на ВСМ / О. С. Морозова, С. В. Шкурников // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах (РИЛТТРАНС-2019): сборник трудов. — 2020. — С. 358–367.

11. RBDG — MAN-013-0105 Railway Alignment. Design guidelines. — 2021. — URL: [https://www.railbaltica.org/wp-content/uploads/2021/06/RBDG-MAN-013\\_0105\\_RailwayAlignment.pdf](https://www.railbaltica.org/wp-content/uploads/2021/06/RBDG-MAN-013_0105_RailwayAlignment.pdf) (accessed 27 November 2021).

12. Technical memorandum. Alignment Standards for Shared Use Corridors, Rev 0. California High-Speed Train Project. — 2007. — URL: <http://www.tillier.net/stuff/hsr/TM-1.1.6-Align-Stds-for-Shared-Use-Corridor-LA-to-Anaheim-R0-071217-pdf.pdf> (accessed 27 December 2022).

13. Long Xuyou. Study on Dynamic Effect of Alignment Parameter on Train Running Quality and Its Optimization for High-Speed Railway [D] / Xuyou Long. — Beijing Jiaotong University.

14. Fan X. Dynamic influence of the plane curve radius on vertical– circular overlapping lines of high-speed railway / X. Fan, B. Li, Y. Zhang, G. Du, H. Liu // E3S Web of Conferences 248, 03033. 2021. — DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124803033>.

15. Морозова О. С. Обоснование проектных параметров криволинейных участков плана трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей / О. С. Морозова, С. В. Шкурников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2020. — № 3(67). — С. 152–159. — DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).152-159.

16. Шкурников С. В. О разработке имитационной модели высокоскоростного поезда / С. В. Шкурников, О. С. Морозова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2017. — Т. 14. — № 3. — С. 481–489.

Дата поступления: 10.05.2022

Решение о публикации: 25.05.2022

#### **Контактная информация:**

ШКУРНИКОВ Сергей Васильевич — канд. техн. наук, доцент; 3123810@mail.ru

БУЛАКАЕВА Ольга Сергеевна — канд. техн. наук, ассистент; olya.morozova51@gmail.com

АНИСИМОВ Владимир Александрович — д-р. техн. наук, профессор; anisvl@mail.ru

# Complex Spatial Geometry of Curved Sections on High-Speed Railways

S. V. Shkurnikov, O. S. Bulakaeva, V. A. Anisimov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Shkurnikov S. V., Bulakaeva O. S., Anisimov V. A. Complex Spatial Geometry of Curved Sections on High-Speed Railways. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 2, pp. 164–178. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-164-178

## Summary

**Purpose:** The paper poses some promising trends of modern projection science development for high-speed railway plan and profile. The main objective of the trends is to critically rethink the provisions of the existing regulatory design base of the projection. The question on inadmissibility of the arrangement of complex spatial geometry sections — the sections of coincidence of a vertical curve in a profile and a passage curve in a plan — is one of such provisions. **Methods:** In the frames of the conducted research, a theoretical approach to the determination of force impacts at the section of complex spatial geometry is proposed. **Results:** It is established that force impact value is caused by vertical curve direction (convex or concave), as well as by calculated value of outstanding acceleration in being considered curve. Studies of the influence of sections with complex spatial geometry on the dynamics of high-speed rolling stock motion show that at certain combination of circular and vertical curve radii for motion various speeds, it is possible to minimize negative dynamic effects caused by the presence of complex spatial geometry section. **Practical importance:** As a result of the work, it was found that at speeds of 350 km/h or more, the superimposition of a vertical curve in the profile and a passage curve in the plan is acceptable without applying additional requirements to the curve parameters. The radius of the circular curve should be increased by 30-60% at speeds of less than 350 km/h.

**Keywords:** Railway plan, horizontal alignment, high-speed railway, passage curves, verticals curves, vertical and passage curve superimposition.

## References

1. Morozova O. S. *Parametry krivolineynykh uchastkov trassy vysokoskorostnykh zhelezodorozhnykh magistralei dlya usloviy sovmeshchennogo dvizheniya. Kand. Diss* [Parameters of curved sections of the route of high-speed railway lines for the conditions of combined traffic. Cand. Diss]. St. Petersburg, 2020. 16 p. (In Russian)
2. Lindahl M. Track geometry for high-speed railways: A literature survey and simulation of dynamic vehicle response. Stockholm. TRITA-FKT Report, Royal Institute of Technology, 2001, 160 p.
3. EN 13803-1:2010: Railway applications –Track –Track alignment design parameters — Track gauges 1435 mm and wider. Part 1: Plain line [Required by Directive 2008/57/EC]
4. Sirong Y. Dynamic analysis of high — speed railway alignment: theory and practice, Academic Press. 2018. 324 p.
5. Wang K., Zhai W. Study on performance matching of wheel-rail dynamic interaction on curved track of speed-raised and high-speed railways. *China Railway Science*, 2014, I. 35(1), pp. 142–144, DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2014.01.22/
6. Akkerman G. L. Oblik vysokoskorostnoy zhelezodorozhnoy magistrali [The appearance of a high-speed railway line]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*

[Bulletin of the Ural State University of Communications]. 2017, I. 2 (34), pp. 46–56. DOI: 10.20291/2079-0392-2017-2-46-56. (In Russian)

7. Velichko G. Quality analysis and evaluation technique of railway track + vehicle system performance at railway transition sections with various shape curves Transport Means 2020. Proceedings of the 24th International Scientific Conference. Part II, pp. 573-578, DOI:10.1088/1757-899X/1159/1/012022.

8. Hasslinger H. Measurement proof for the superiority of a new track alignment design element, the so-called Viennese Curve”Berlin, ZEVrail , 2005, I. 129, pp. 61–71.

9. Wojtczak, R. General equation of cant ramp in form of polynomial of odd degree. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/324475023\\_General\\_equation\\_of\\_cant\\_ramp\\_in\\_form\\_of\\_polynomial\\_of\\_odd\\_degree](https://www.researchgate.net/publication/324475023_General_equation_of_cant_ramp_in_form_of_polynomial_of_odd_degree) (accessed: November 11, 2020), DOI:10.13140/RG.2.2.28551.09123

10. Morozova O. S. Sposob uluchsheniya plavnosti dvizheniya v krivolinyeynykh uchastkakh puti v plane na VSM [A method for improving the smoothness of movement in curved sections of the track in terms of high speed lines]. *Razvitie infrastruktury i logisticheskikh tekhnologiy v transportnykh sistemakh (riltrans-2019)* [Development of infrastructure and logistics technologies in transport systems (riltrans-2019)]. 2020, pp. 358–367. (In Russian)

11. RBDG — MAN-013-0105 Railway Alignment. Design guidelines. 2021. Available at: [https://www.railbaltica.org/wp-content/uploads/2021/06/RBDG-MAN-013\\_0105\\_RailwayAlignment.pdf](https://www.railbaltica.org/wp-content/uploads/2021/06/RBDG-MAN-013_0105_RailwayAlignment.pdf) (accessed: November 27, 2021).

12. Technical memorandum. Alignment Standards for Shared Use Corridors, Rev 0. California High-Speed Train Project.2007. Available at: <http://www.tillier.net/stuff/hsr/TM-1.1.6-Align-Stds-for-Shared-Use-Corridor-LA-to-Anaheim-R0-071217-pdf.pdf> (accessed: December 27, 2022).

13. Long Xuyou. Study on Dynamic Effect of Alignment Parameter on Train Running Quality and Its Optimization for High-Speed Railway[D]. Beijing Jiaotong University.

14. Fan Kh., LiB., Zhang Y., Du G, Liu H. Dynamic influence of the plane curve radius on vertical- circular overlapping lines of high-speed railway. E3S Web of Conferences. 2021, I. 248, art. 03033, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124803033>

15. Morozova O. S., Shkurnikov S. V. Obosnovanie proektnykh parametrov krivolinyeynykh uchastkov plana trassy vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralei [Substantiation of design parameters of curved sections of the route plan of high-speed railway lines]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2020, I. 3 (67), pp. 152-159. DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).152–159. (In Russian)

16. Shkurnikov S. V. O razrabotke imitatsionnoy modeli vysokoskorostnogo poezda [On the development of a simulation model of a high-speed train]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the Petersburg University of Communications]. 2017, vol. 14, I. 3, pp. 481–489. (In Russian)

Received: May 10, 2022

Accepted: May 25, 2022

#### Author’s information:

Sergey V. SHKURNIKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; 3123810@mail.ru

Olga S. BULAKAEVA — PhD in Engineering, Assistant; olya.morozova51@gmail.com

Vladimir A. ANISIMOV — D. Sci. in Engineering, Professor; Anisvl@mail.ru