

narodnoi-nauchno-prakticheskoi konferentsii [Transport of Russia: problems and prospects - 2018: Materials of the international scientific-practical conference], 2018. Pp. 206–209.

17. Antonov D.V., Lebedeva O.A. Osnovnye printsipy razvitiya transportnykh sistem gorodov [Basic principles of the development of urban transport systems]. *Vestnik Angarskoi gosudarstvennoi tekhnicheskoi akademii* [Proceedings of Irkutsk State Technical Academy], 2014. No. 8. Pp. 149–155.

18. Mikhailov A.Yu. Integral'nyi kriterii otsenki kachestva funktsionirovaniya ulichno-dorozhnykh setei [An integral criterion for assessing the quality of the functioning of street and road networks]. *Izvestiya Irkutskoi gosudarstvennoi ekonomicheskoi akademii* [Bulletin of Irkutsk State Economic Academy], 2004. No. 2. Pp. 50–53.

19. Gozbenko V.E., Kripak M.N., Ivankov A.N. Sovershenstvovanie transportno-ekspeditsionnogo obsluzhivaniya gruzovladel'tsev [Improvement of freight forwarding services for cargo owners]. Irkutsk, 2011.

20. Bakhirev I.A., Mikhailov A.Yu. Otsenka uslovii dvizheniya na gorodskikh ulitsakh [Assessment of traffic conditions on city streets]. *Gradostroitel'stvo* [City and town planning], 2015. No. 4 (38). Pp. 63–68.

21. Lebedeva O.A., Kripak M.N., Gozbenko V.E. Increasing effectiveness of the transportation network by using the automation of a Voronoi diagram. *Transportation Research Procedia*, 2018. Pp. 427–433.

22. Simko D.J. Increasing road infrastructure capacity through the use of autonomous vehicles. Master's thesis. *Naval Postgraduate School Monterey*, CA 93943-5000, 2016. 65 p.

### Информация об авторах

**Полтавская Юлия Олеговна** – канд. техн. наук, доцент кафедры управления на автомобильном транспорте, Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, e-mail: juliapoltavskaya@mail.ru

**Каргапольцев Сергей Константинович** – д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

### Information about the authors

**Julia O. Poltavskaya** – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof., Department of Management of automobile transport, Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: juliapoltavskaya@mail.ru

**Sergei K. Kargapol'tsev** – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, e-mail: kck@irgups.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).152-159

УДК 625.1+004.9

## Обоснование проектных параметров криволинейных участков плана трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей

**О. С. Морозова, С. В. Шкурников** ✉

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ 3123810@mail.ru

### Резюме

В статье представлена методика выбора проектных параметров круговых кривых высокоскоростной железнодорожной магистрали при движении на ней нескольких категорий поездов – высокоскоростных пассажирских, скоростных пассажирских и специальных грузовых. Методика основана на решении многокритериальной задачи и позволяет определять оптимальные параметры круговых кривых в условиях совмещенного движения с учетом технико-экономических факторов и особенностей движения поездов различной массы с различными скоростями в криволинейных элементах плана трассы. Разработанная методика обладает устойчивостью к неравномерности размеров движения во времени, с ее помощью можно определять оптимальную скорость специального грузового поезда. Особенностью данной методики является применение имитационного компьютерного моделирования взаимодействия пути и подвижного состава на этапе проектирования плана трассы высокоскоростной железнодорожной магистрали. Результаты имитационного моделирования используются для построения математической модели, характеризующей влияние радиуса и непогашенного ускорения на величину боковой силы. Известные значения боковой силы позволяют исключить варианты круговых кривых, в которых движение специальных грузовых поездов оказывает негативное воздействие на путь. В работе также рассмотрены условия, при которых возможно снижение скорости высокоскоростного поезда. Обоснование понижения скорости высокоскоростного поезда строится на основе теории игр. Увеличение объемов грузовых перевозок с течением времени приводит к необходимости снижения скорости высокоскоростного поезда во избежание неоправданного увеличения радиуса круговой кривой.

### Ключевые слова

высокоскоростная железнодорожная магистраль, совмещенное движение, специальное грузовое движение, параметры круговых кривых, взаимодействие пути и экипажа, многокритериальная оптимизация.

### Для цитирования

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

**Информация о статье**

поступила в редакцию: 18.06.2020, поступила после рецензирования: 20.07.2020, принята к публикации: 03.08.2020

## The substantiation of design parameters of circular curves on high-speed railways

O. S. Morozova, S. V. Shkurnikov✉

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, the Russian Federation

✉ 3123810@mail.ru

**Abstract**

This paper is about the methodology of rational design parameters of circular curves on high-speed railways for mixed traffic. The mixed traffic include high-speed and speeding passenger trains, and special freight trains. The methodology is based on multi-criteria optimization and allows determining optimal design parameters of circular curves on high-speed railways for mixed traffic. Technical and economic factors, features of train movement with different speeds and masses on different circular curves are taking into account here. The methodology is resistant to possible traffic changes. Another feature of this methodology is the use of computer simulation of the interaction between the railway and rolling stock at the design railway stage. The results of simulation are used to create the mathematical interaction model of the circular curve parameters (radius and non-compensated acceleration) and lateral force. The values of lateral force allow excluding the circular curve parameters, in which special freight trains have negative effects on the railway track. This paper also discusses the possibility of a speed reduction of high-speed trains. The substantiation for lowering the speed of high-speed trains is based on the theory of games. The increase in freight traffic results in the necessity to reduce the speed of a high-speed train in order to avoid an unjustified increase in the radius of a circular curve.

**Keywords**

high-speed railway line, mixed traffic on high-speed railway, special freight traffic on railway, design parameters of circular curves, interaction between railway and rolling stock, multi-criteria optimization.

**For citation**

Morozova O.S. Obosnovanie proektnykh parametrov krivolineynykh uchastkov plana trassy vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralей [The substantiation of design parameters of circular curves on high-speed railways]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, No. 3(67), pp. 152–159. 10.26731/1813-9108.2020.3(67).152-159

**Article Info**

Received: 18.06.2020, Revised: 20.07.2020, Accepted: 03.08.2020

**Введение**

При организации на высокоскоростных железнодорожных магистралях (ВСМ) специального грузового движения, характеризующегося большими массами и меньшими скоростями движения, проектирование криволинейных участков трассы требует поиска взаимосвязанного решения, обеспечивающего максимальные скорости для высокоскоростных пассажирских поездов при выполнении условий комфортабельности езды, а также минимизации негативного воздействия грузовых поездов на путь.

Негативное воздействие на путь может быть компенсировано применением специального грузового электропоезда. Принципиальные конструктивные характеристики специального грузового электропоезда идентичны высокоскоростному, однако количество электропоездов в составе может быть вариативно [1], что приводит к увеличению его общей массы.

С другой стороны, совмещенное движение различных категорий поездов на ВСМ характеризуется неоднородной структурой поездопотока. По данной

линии помимо высокоскоростных и специальных грузовых поездов возможно движение региональных скоростных пассажирских поездов с более частыми остановками, другими массами и скоростями, что требует обеспечения равенства силового воздействия на обе рельсовые нити.

Существующие подходы к выбору основных параметров кривых в условиях совмещенного движения ориентированы на скорости пассажирского движения менее 250 км/ч и эксплуатацию пассажирских и грузовых составов, имеющих различия в массе, конструкции и скорости движения. Появившаяся в настоящий момент потребность организации на одном рельсовом пути высокоскоростного пассажирского (до 400 км/ч) и специального грузового движения приводит к необходимости разработки методики, посвященной выбору основных параметров криволинейных участков плана трассы ВСМ, позволяющей:

– определять оптимальные параметры криволинейных участков плана трассы ВСМ, обеспечиваю-

щие минимальные негативные воздействия специальных грузовых поездов на путь;

- учитывать характеристики высокоскоростного и специального грузового подвижного состава;
- создавать устойчивость к возможной неоднородности поездопотока во времени;
- устанавливать диапазон скоростей специального грузового поезда в оптимальных параметрах;
- учитывать экономическую составляющую.

### Методика определения проектных параметров криволинейных участков плана трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей

В основе методики лежит решение многокритериальной задачи с учетом оценки частных критериев [2]. Методика включает в себя три этапа.

1. Формирование информационного пространства для принятия решений  $P$  – совокупность возможных параметров круговых кривых (радиуса круговой кривой  $R$  и возвышения наружного рельса  $h$ ) исходит из условий обеспечения заданного уровня комфортабельности езды пассажиров и равномерного воздействия на обе рельсовые нити при движении нескольких категорий поездов [3, 4]:

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_i \dots p_b).$$

В качестве исходных данных для формирования информационного пространства принимаются:

- структура поездопотока на расчетный год эксплуатации – количество высокоскоростных  $n_{вск}$ , скоростных  $n_{ск}$ , специальных грузовых  $n_{сп}$  поездов;
- масса высокоскоростных  $Q_{вск}$ , скоростных  $Q_{ск}$  и специальных грузовых поездов  $Q_{сп}$ ;
- максимальные скорости движения высокоскоростных  $V_{вск}$  и скоростных  $V_{ск}$  поездов;
- диапазон рассматриваемых скоростей специального грузового поезда  $V_{гр}$ .

Задаваясь численными значениями исходных данных, определяют параметры круговой кривой в соответствии с методикой определения возвышения

наружного рельса в кривых с учетом смешанного движения поезда (при проектировании ВСМ «Москва – Казань») [5–7]. Начальный диапазон скоростей специального грузового поезда определяет количество элементов множества  $P$ , по принципу

$$b = \frac{V_{сп}^{\max} - V_{сп}^{\min}}{10} + 1,$$

где  $b$  – количество элементов множества  $P$ ,  $V_{сп}^{\max}$ ,  $V_{сп}^{\min}$  – максимальная и минимальная скорости специального грузового поезда в начальном диапазоне.

Далее представлены элементы множества  $P$  для трех расчетных случаев, отличающихся структурой поездопотока, а именно процентным соотношением специальных грузовых и высокоскоростных поездов:  $P_1$  – 10/90 %;  $P_2$  – 30/70 %;  $P_3$  – 50/50 % (рис. 1).

Также прослеживается зависимость уменьшения радиуса кривой при увеличении скорости специального грузового поезда (см. рис. 1).

Однако рассчитанные параметры кривых (элементы множеств  $P$ ) являются единственными возможными при строгом соответствии скоростей движения в кривой и заданных размеров движения. Увеличение размеров высокоскоростного движения  $P_3 \rightarrow P_1$  с течением времени потребует увеличения радиуса круговой кривой. Во избежание переустройства кривой возможен вариант варьирования скоростей. Снижение скорости специального грузового поезда способствует сохранению установленного значения радиуса, но приводит к снижению норм поперечного отрицательного ускорения, применение которых требует обоснования.

Для устранения данных недостатков и учета технико-экономической эффективности тех или иных проектных решений в разрабатываемую методику вводятся критерии оптимальности.

#### 2. Назначение критериев оптимальности.

Критерии оптимальности подразделяются на абсолютные и относительные. Первые не зависят от результатов имитационного моделирования и приведены на один условный элемент, состоящий из

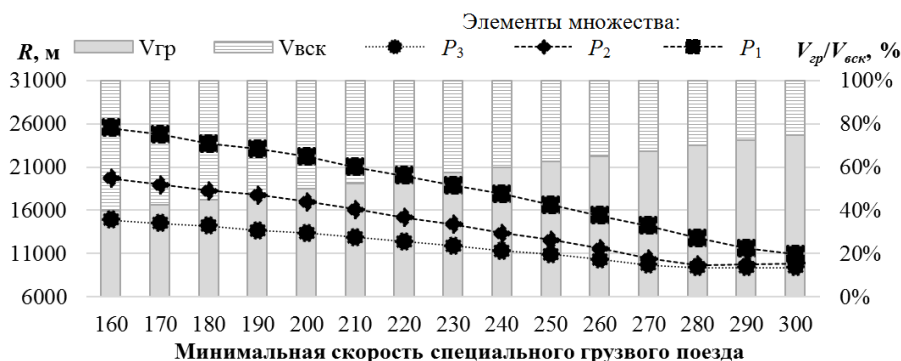


Рис. 1. Результаты многовариантных расчетов по определению параметров круговых кривых при совмещенном движении на высокоскоростных железнодорожных магистралах

Fig. 1. The results of multivariate calculations to determine the parameters of circular curves with mixed traffic on high-speed railways

круговой кривой и прямых участков пути, км. При этом  $R_{p1} = 1$  км.

Критерий изменения длины условного элемента при вариативных радиусах кривых  $-f_1(p_i) \rightarrow \min$  (км):

$$f_1(p_i) = 2 \operatorname{tg} \left( \frac{1}{2R_{p1}} \right) \cdot (R_{p1} - R_{pi}) + \frac{R_{pi}}{R_{p1}}.$$

Данный критерий характеризует удлинение трассы при применении кривых меньшего радиуса.

Критерий, характеризующий удельные эксплуатационные расходы, зависящие от размеров движения ( $b, c$  – количество высокоскоростных и специальных грузовых условных вагонов по элементу в сутки)  $-f_2(p_i) \rightarrow \min$  (руб.):

$$f_2(p_i) = b \cdot \left( E_K \cdot \frac{R_{pi}}{R_{p1}} + E_{np} \cdot (f_1(p_i) - 1) \right) + c \cdot \left( E_K \cdot \frac{R_{pi}}{R_{p1}} + E_{np} \cdot (f_1(p_i) - 1) \right),$$

где  $E_K$  и  $E_{np}$  – единичная норма эксплуатационных расходов для круговой кривой и прямой, зависящих от размеров движения, руб. / вагоно-км [8]. Различия в норме эксплуатационных расходов для круговой кривой и прямой отображены в затратах на электроэнергию и определены по результатам тяговых расчетов [9].

Под условным вагоном принимаются экипажи абсолютной массой 68 т (170 кН) [5]. Масса высокоскоростного и специального грузового условного вагона принята одинаковой из начального условия задачи и может различаться в зависимости от исследуемых осевых нагрузок для грузового движения.

Заданные размеры движения  $n$  и массы поездов  $Q$  переводятся в количество условных вагонов, движущихся по условному элементу, по принципу

$$b = \frac{n_{вск} \cdot Q_{вск}}{68}; c = \frac{n_{сп} \cdot Q_{сп}}{68}.$$

Радиус круговой кривой  $-f_3(p_i) \rightarrow \min$  (км).

Относительные критерии оптимальности получены с учетом результатов имитационного компьютерного моделирования взаимодействия пути и подвижного состава для конкретных экипажей (условных вагонов). Критерии могут корректироваться с учетом особенностей реальных подвижных составов, которые будут созданы для эксплуатации на ВСМ.

Диапазон возможных скоростей специального грузового поезда, реализуемый на данной кривой  $-f_4(p_i) \rightarrow \max$  (усл. ед.). Определяется как

$$f_4(p_i) = \frac{\max V_{сп}(p_i) - \min V_{сп}(p_i)}{10} + 1,$$

где  $\max V_{сп}(p_i)$  и  $\min V_{сп}(p_i)$  – максимальная и минимальная скорости специального грузового экипа-

жа, которая может быть реализована на элементе  $p_i$  при условии

$$\begin{cases} Y_{\sigma}(\min V_{сп}(p_i)) < [Y_{\sigma}]_{вск}, \\ Y_{\sigma}(\max V_{сп}(p_i)) < [Y_{\sigma}]_{вск}, \end{cases}$$

где  $[Y_{\sigma}]_{вск}$  – боковая сила, возникающая при движении высокоскоростного поезда в данной кривой.

При этом обязательно выполнение условия равномерного воздействия на обе рельсовые нити ( $\pm 10\%$ ) для каждой скорости рассматриваемого диапазона.

Диапазон возможных скоростей специального грузового поезда является основным критерием, характеризующим устойчивость принятых проектных решений к условиям неравномерности объемов перевозок во времени и возможной вариации скоростей специального грузового поезда. Также применение данного критерия обеспечивает минимальные (не превышающие воздействия высокоскоростных поездов) негативные воздействия специальных грузовых поездов на путь. Негативные воздействия вертикальных сил при движении специальных грузовых поездов скорректированы условием обеспечения равномерного воздействия на обе рельсовые нити.

Боковая сила  $Y_{\sigma}$  определялась с использованием компьютерной имитационной модели взаимодействия пути подвижного состава в криволинейных участках пути, адаптированной для решения задач выбора проектных параметров плана трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей [10]. На основе результатов многовариантного моделирования движения условного экипажа массой 68 т с различными скоростями по круговым кривым методами математической статистики [11] получена зависимость боковой силы от радиуса кривой  $R$  и величины непогашенного ускорения  $a_{un}$

$$Y_{\sigma} = \frac{53348,25}{R} + 12,21 |a_{un}| - 1,4; r^2 = 0,965.$$

График полученной зависимости представлен ниже (рис. 2).

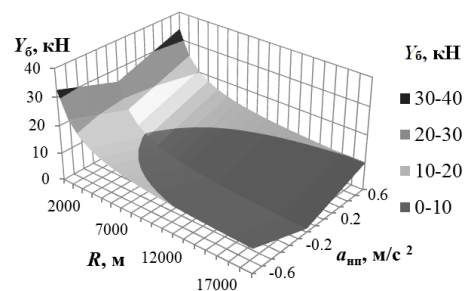


Рис. 2. Зависимость боковой силы от радиуса круговой кривой и непогашенного ускорения, для экипажа массой 68 т

Fig. 2. Dependence of the lateral force on the radius of the circular curve and undamped acceleration, for a vehicle with a mass of 68 tons

3. Поиск оптимального решения.

Определение предпочтительного решения осуществляется из условия минимизации взвешенной суммы частных критериев [12]:

$$\min_{1 \leq i \leq b} \left( \sum_{d=1}^4 w_d \cdot f_d^*(p_i) \right)$$

где  $f_d^*(p_i)$  – нормализованная величина частного критерия,  $w_d$  – весовой коэффициент.

Представлены полученные значения оптимальных параметров (рис. 3).

Результаты расчетов показывают необходимость увеличения радиуса кривой при увеличении числа грузовых поездов. При этом радиусы достигают очень больших размеров (до 18 000 м), возможность устройства и эксплуатации которых требует обоснования [13].

### Условия целесообразности понижения скорости высокоскоростного пассажирского движения

Обоснование понижения скорости высокоскоростного поезда строится на основе составления матрицы рисков [14]. Количество строк матрицы  $m$  соответствует рассматриваемому диапазону возможного понижения скорости высокоскоростного поезда

$$m = (V_{вск}^{\max} - V_{вск}^{\min}) / 10 + 1,$$

(в данной работе от 400 км/ч до 350 км/ч), а количество столбцов  $n$  соразмерно возможным состояниям среды – процентному соотношению высокоскоростных поездов в общем поездопотоке.

Состояния среды  $H_j$  в свою очередь характеризуют возможные изменения структуры поездопотока времени. Вероятности состояний среды рассчиты-

вались по формуле [15]:

$$P(H_j | A) = \frac{P(A | H_j)P(H_j)}{\sum_{j=1}^n P(A | H_j)P(H_j)},$$

где  $H_j$  – возможное состояние среды, характеризующееся процентной составляющей высокоскоростных поездов в общем потоке ( $j = 1, 2 \dots a \dots n$ );  $A$  – текущее состояние среды;  $P(H_j)$  – априорная вероятность  $j$ -го состояния среды, принимающая равно-возможные значения –  $1/n$ ;  $P(A|H_j)$  – апостериорная вероятность возможного состояния среды, определяемая по принципу

$$\underbrace{H_1; \dots; H_{a-2}; H_{a-1}}_p; H_a; \underbrace{H_{a+1}; H_{a+2} \dots; H_n}_k$$

$$P(A | H_j) = \begin{cases} p \geq k \\ \left\{ \frac{1}{p+1}; \dots; \frac{p-2}{p+1}; \frac{p-1}{p+1}; \frac{p}{p+1}; 1; \frac{p}{p+1}; \right. \\ \left. \frac{p-1}{p+1}; \frac{p-2}{p+1}; \dots; \frac{j-k}{p+1} \right\} \\ p < k \\ \left\{ \frac{j-p}{k+1}; \dots; \frac{k-2}{k+1}; \frac{k-1}{k+1}; \frac{k}{k+1}; 1; \frac{k}{k+1}; \right. \\ \left. \frac{k-1}{k+1}; \frac{k-2}{k+1}; \dots; \frac{1}{k+1} \right\} \end{cases}$$

Разность величин требуемого минимального радиуса, необходимого для организации совмещенного движения –  $R^*$  (см. рис. 3), и требуемого минимального радиуса  $R_{\min}$ , необходимого для реализации исключительно высокоскоростного движения, формирует матрицу упущенных возможностей (рисков):

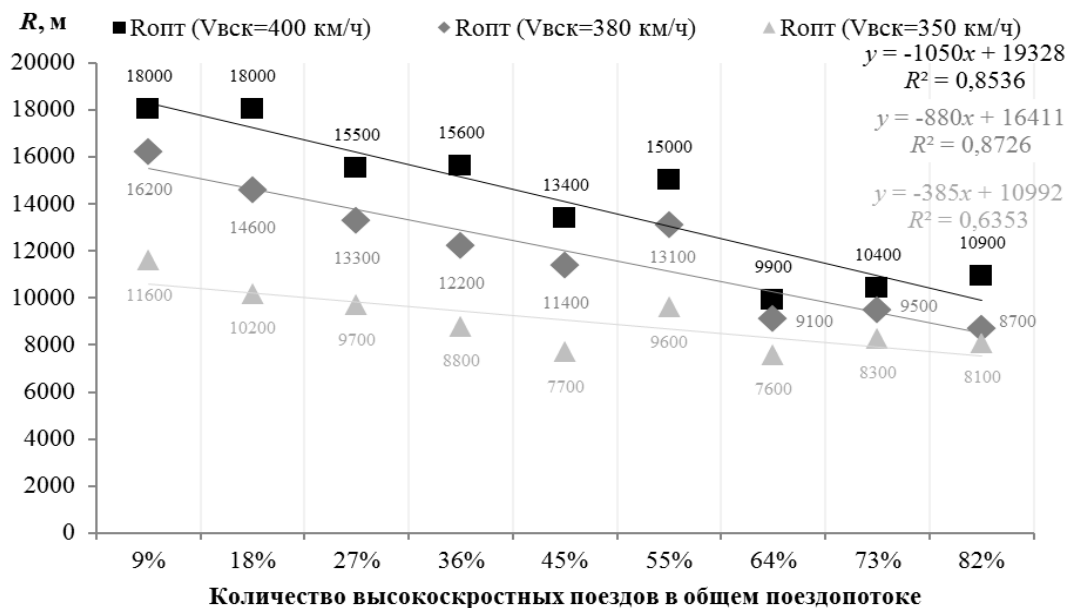


Рис. 3. Оптимальные параметры круговой кривой в зависимости от заданных размеров движения  
Fig. 3. Optimal parameters of a circular curve depending on the specified dimensions of traffic

$$R^r = \left\| r_{ij}^r \right\|_{m,n}$$

где каждый элемент принимает значение

$$r_{ij}^r = R_{ij}^* - R_i^{\min}$$

при  $j=a$ .

Выбор предпочтительного варианта основан на определении среднего риска по критерию

$$\min \sum_{1 \leq i \leq m} \Pi(A|H_j) \cdot r_{ij}^r$$

Далее представлены предпочтительные варианты скоростей высокоскоростного поезда в зависимости от размеров движения (рис. 4).

Результаты расчетов (см. рис. 4) показывают, что с увеличением размеров грузового движения (более 45 %) предпочтительная скорость высокоскоростного поезда снижается до 350 км/ч. В тоже время  $R_{\min}$  увеличивается. Во избежание неоправданного с точки зрения максимальной скорости высокоскоростного поезда завышения радиуса круговой кривой в расчет вводится дополнительный фактор риска – потери скорости высокоскоростного поезда. Разность величин максимальной скорости высокоскоростного поезда  $V_{\max}$  и скорости  $V^*$ , являющаяся максимально возможной для каждого состояния среды  $H_j$ , формирует матрицу

$$R^v = \left\| r_{ij}^v \right\|_{m,n}$$

где каждый элемент принимает значение

$$r_{ij}^v = V_i^{\max} - V_{ij}^*$$

Необходимо отметить, что скорость  $V_{ij}^{\max}(p_i)$  с увеличением размеров пассажирских перевозок ( $j < a$ ) уменьшается.

Принятию окончательного решения предшествует определение среднего риска:

$$\sum_{j=1}^n \Pi(A|H_j) \cdot r_{ij}^v$$

для каждой  $i$ -ой строки матрицы  $R^v$ , а также среднего риска:

$$\sum_{j=1}^n \Pi(A|H_j) \cdot r_{ij}^r$$

для каждой  $i$ -ой строки матрицы  $R^r$ .

Определение наилучшего решения осуществляется из условия:

$$\min \left[ \left( \sum_{j=1}^n \Pi(A|H_j) \cdot r_{ij}^r \right)^* + \left( \sum_{j=1}^n \Pi(A|H_j) \cdot r_{ij}^v \right)^* \right],$$

где \* обозначена операция нормализации факторов – средних рисков для матриц  $R^r$  и  $R^v$ . Полученные результаты представлены (рис. 5).

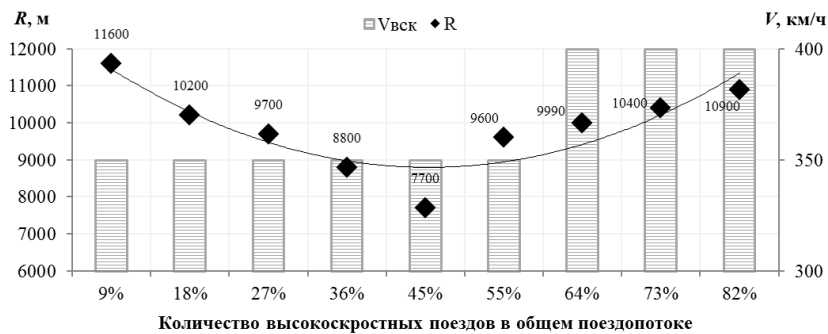


Рис. 4. Максимальная скорость высокоскоростного поезда по критерию  $R^* \rightarrow R_{\min}$ .

Fig. 4. Maximum speed of a high-speed train according to the criterion  $R^* \rightarrow R_{\min}$

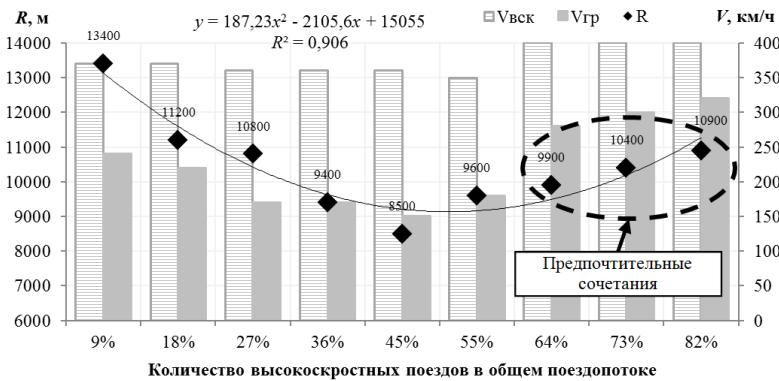


Рис. 5. Максимальная скорость высокоскоростного поезда по критериям  $R_{\min} \rightarrow R^*$  и  $V_{\max} \rightarrow V^*$

Fig. 5. Maximum speed of a high-speed train according to the criteria  $R_{\min} \rightarrow R^*$  and  $V_{\max} \rightarrow V^*$

Результаты расчетов (см. рис. 5) показывают, что при размерах грузовых перевозок менее 36 % возможно обеспечить максимальные скорости высокоскоростного пассажирского движения, при этом значение радиуса круговой кривой увеличивается до 16 %, однако скорость специального грузового поезда должна достигать более 270 км/ч. При большом объеме грузовых перевозок на совмещенной ВСМ предпочтительным решением является уменьшение скорости высокоскоростного поезда. Разрыв скоростей высокоскоростного и специального грузового поезда может достигать 55 % при равном соотношении рассматриваемых категорий поездов.

Таким образом, максимальная скорость движения может осуществляться на участках безостановочного движения высокосортных и специальных грузовых поездов при небольшом количестве региональных и скоростных поездов (менее 10 %). На участках с большим числом остановок специальных грузовых поездов или большим количеством региональных и скоростных поездов скорость высокоскоростного поезда необходимо снижать во избежание необоснованного завышения радиуса круговой кривой.

### Заключение

Представленная методика обоснования проектных параметров криволинейных участков плана трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей позволяет получать экономически обоснованные проектные решения, обладающие устойчивостью к неравномерности перевозок во времени. Применение имитационного компьютерного моделирования взаимодействия пути и подвижного состава при движении в пределах криволинейных участков трассы ВСМ позволяет скорректировать диапазон возможных скоростей движения в кривой, а также определять варианты, при которых грузовое движение не оказывает вредного воздействия на путь. Предварительный расчет показателя ЧДД показывает, что организация совмещенного высокоскоростного пассажирского и грузового движения на высокоскоростной железнодорожной магистрали снижает срок окупаемости инвестиционного проекта в 1,5 раза, что делает ее не только возможной, но и необходимой в случаях недостаточного пассажиропотока.

### Список литературы

1. Киселев И.П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт и перспективы его развития в мире // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 5 (42). С. 44–51.
2. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. 344 с.
3. Певзнер В.О. Новое руководство по определению возвышения наружного рельса // Путь и путевое хозяйство. 2010. № 3. С. 11–14.
4. Шкурников С.В. Повышение скоростей движения поездов на основе модернизации постоянных устройств однопутных железных дорог : дис. ... канд. техн. наук: Ленинград, 1990. 175 с.
5. Специальные технические условия для проектирования, строительства и эксплуатации высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва – Казань – Екатеринбург»: согласованы Минстроем РФ 03.08.2016 г. № 24651-ЕС/03.
6. Бушуев Н.С., Шкурников С.В., Голубцов В.А. Рекомендации по выбору параметров круговых кривых при совмещенном движении высокоскоростных пассажирских и скоростных специальных грузовых поездов // Техника железных дорог. 2016. № 2 (34). С. 71–75.
7. Морозова О.С., Шкурников С.В. Особенности геометрии трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей при организации на них совмещенного движения // Транспорт: проблемы, идеи, перспективы : сб. тр. LXXVI Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб, 2016. С. 236–239.
8. Проект ВСМ «Евразия» [Электронный ресурс]. 2017. 15 ноября. URL: [www.spbtrd.ru/local/filedownload.php?file\\_id=52479](http://www.spbtrd.ru/local/filedownload.php?file_id=52479). (Ссылку не смогла открыть, запись не доделанная)
9. Правила тяговых расчетов для поездной работы : утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 12.05.2016 № 867р «Об утверждении Правил тяговых расчетов для поездной работы». М.: ОАО «РЖД», 2013. 515 с.
10. Шкурников С.В., Морозова О.С. О разработке имитационной модели высокоскоростного поезда // Изв. Петербург. ун-та путей сообщ. 2017. Т. 14. № 3. С. 481–489.
11. Адлер А.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
12. Федунец Н.И., Куприянов В.В. Теория принятия решений. М.: Горная книга, 2005. 218 с.
13. Sirong Y. Dynamic analysis of high-speed railway alignment: theory and practice. Academic Press, 2018. 324 p.
14. Демидова Л.А., Кираковский В.В., Пылькин А.Н. Принятие решений в условиях неопределенности. М.: Горячая линия-Телеком, 2012. 288 с.
15. Четыркин Е.М., Калихан И.Л. Вероятность и статистика. М.: Финансы и статистика, 1982. 320 с.

### References

1. Kiselev I.P. Vysokoskorostnoi zheleznodorozhnyi transport i perspektivy yego razvitiya v mire [High-speed railway transport and its development prospects in the world]. *Transport Rossiiskoi Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 2012. No. 5 (42). Pp. 44–51.
2. Podinovskiy V.V., Nogin V.D. Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach [Pareto-optimal solutions to multicriterial problems]. Moscow: Nauka Publ., Chief ed. of phys.-math. liter., 1982.



3. Pevzner V.O. Novoe rukovodstvo po opredeleniyu vozvysheniya naruzhnogo rel'sa [New guide for determining the elevation of the outer rail]. *Put' i putevye khozyaistvo [Railway track and facilities]*, 2010. No. 3. Pp. 1–51.

4. Shkurnikov S.V. Povyshenie skorostei dvizheniya poyezdov na osnove modernizatsii postoyannykh ustroystv odnopolnykh zheleznykh dorog [Increase of train speeds on the basis of modernization of permanent devices of single-track railways]. Ph.D. (Engineering) diss.: 05.22.03, Leningrad, 1990, 175 p.

5. Spetsial'nye tekhnicheskie usloviya dlya proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii vysokoskorostnoi zheleznodorozhnoi magistrali «Moskva – Kazan' – Yekaterinburg» [Special technical conditions for the design, construction and operation of the Moscow-Kazan-Ekaterinburg high-speed railway]. Agreed by the Ministry of Construction of the Russian Federation on 08.08.2016. No. 24651-EU/03.

6. Bushuev N.S. Rekomendatsii po vyboru parametrov krugovykh krivykh pri sovmeshchennom dvizhenii vysokoskorostnykh passazhirskikh i skorostnykh spetsial'nykh gruzovykh poezdov [Recommendations on the selection of parameters of circular curves for the combined movement of high-speed passenger and high-speed special freight trains]. *Tekhnika zheleznykh dorog [Railway Equipment Magazine]*, 2016. No. 2 (34). Pp. 71–75.

7. Morozova O.S. Osobennosti geometrii trassy vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralei pri organizatsii na nikh sovmeshchennogo dvizheniya [Features of the geometry of the route of high-speed railways when organizing combined traffic on them]. *Transport: problemy, idei, perspektivy sbornik trudov LXXVI Vserossiyskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh [Transport: problems, ideas, prospects, collection of works LXXVI of the All-Russian scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists]*, 2016. Pp. 236–239.

8. Proekt VSM “Evraziya” [HSR project “Eurasia”] [Electronic media], 2017, November 15, URL: [www.spbtrd.ru/local/filedownload.php?file\\_id=52479](http://www.spbtrd.ru/local/filedownload.php?file_id=52479).

9. Pravila tyagovykh raschetov dlya poyezdnoi raboty [Rules for traction calculations for train work]. Utv. Rasporyazheniem OAO “RZHD” ot 12.05.2016 N 867r “Ob utverzhdenii Pravil tyagovykh raschetov dlya poezdnoi raboty” [Approved by order of Russian Railways OAO dated 12.05.2016 N 867r “On approval of the Rules for traction calculations for train operation”]. Moscow: OAO “RZHD” Publ., 2013. 515 p.

10. Shkurnikov S.V. O razrabotke imitatsionnoi modeli vysokoskorostnogo poyezda [On the development of a simulation model of a high-speed train]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya [Proceedings of Petersburg Transport University]*, 2017. No. 3. Pp. 481–589.

11. Adler A.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii [The design of the experiment in the search for optimal conditions]. Moscow: Nauka Publ., 1976, 279 p.

12. Fedunets N.I., Kupriyanov V.V. Teoriya prinyatiya reshenii [Theory of decision making]. Moscow: Gornaya kniga Publ., 2005, 218 p.

13. Sirong Y. Dynamic analysis of high-speed railway alignment: theory and practice. Academic Press, 2018, 324 p.

14. Demidova L.A., Kirakovskii V.V., Pyl'kin A.N. Prinyatiye resheniy v usloviyakh neopredelennosti [Decision making under uncertainty]. Moscow: Hotline-Telecom, 2012, 228 p.

15. Chetyrkin E.M., Kalikhman I.L. Veroyatnost' i statistika. [Probability and statistics]. Moscow: Finance and statistics Publ., 1982, 320 p.

### Информация об авторах

**Морозова Ольга Сергеевна** – инженер кафедры изысканий и проектирования железных дорог, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, e-mail: [olyamorozova51@gmail.com](mailto:olyamorozova51@gmail.com)

**Шкурников Сергей Васильевич** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой изысканий и проектирования железных дорог, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, e-mail: [3123810@mail.ru](mailto:3123810@mail.ru)

### Information about the authors

**Ol'ga S. Morozova** – the engineer of the Subdepartment of Surveying and Designing of Railways, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, e-mail: [olyamorozova51@gmail.com](mailto:olyamorozova51@gmail.com)

**Sergei V. Shkurnikov** – Ph.D. in Engineering Science, the head of the Subdepartment of Surveying and Designing of Railways, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg, e-mail: [3123810@mail.ru](mailto:3123810@mail.ru)

DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).159-166

УДК 656.21

## Анализ эффективности организации движения поездов в режиме интервального регулирования на участке Петровский Завод – Хилок в сложноструктурированной транспортной системе

**С. С. Громышова**✉, **А. В. Маштакова**

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉ [ghromyshova7997@mail.ru](mailto:ghromyshova7997@mail.ru)

### Резюме

Железнодорожный транспорт ежегодно укрепляет свое место в транспортной системе страны. В структуре грузооборота по видам транспорта перевозка железными дорогами занимает второе место и составляет 47 %. Для того чтобы освоить