CC BY 4.0

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная статья

УДК 625.151

EDN: https://elibrary.ru/aotspi

Научная специальность: 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Проектирование геометрии стрелочных кривых

Д. С. Ершов✉

Муромский стрелочный завод (АО «МСЗ»),
Муром, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Помимо обеспечения надёжности и безопасности особое внимание при разработке конструкции стрелочных устройств должно быть уделено удовлетворению требований к скорости движения железнодорожного подвижного состава на ответственных направлениях. Конструктивные решения стрелочного хозяйства определяются показателями динамики подвижного состава при движении железнодорожных экипажей по пути. По мнению автора, методы проектирования стрелочных кривых не отвечают современным требованиям к скорости подвижного состава. Целью данной статьи является разработка новых подходов к проектированию стрелочных кривых.
Материалы и методы. Использованы методы анализа динамико-кинематических параметров стрелочных кривых, применяемых в конструкциях стрелочных переводов. При проведении испытаний стрелочных переводов применены тензометрические методы получения исследуемых параметров.
Результаты. Выполнен анализ методов проектирования стрелочных кривых. Выполнены эксплуатационные испытания стрелочного перевода с улучшенными динамико-кинематическими характеристиками. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности усовершенствования методики проектирования стрелочных кривых, эффективности применения геометрических схем стрелочных переводов с касательной геометрией.
Обсуждение и заключение. Сравнительные эксплуатационные испытания стрелочных переводов с предлагаемыми в работе касательной и секущей формами стрелочной кривой показывают, что срок службы криволинейных остряков увеличился. Целесообразно провести аналогичные испытания и с другими марками стрелочных переводов. Учитывая результаты испытаний и расчетов, следующим этапом планируется рассмотреть вопрос по корректировке методик проектирования стрелочной продукции, в особенности для высокоскоростного движения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стрелочные переводы, геометрия рельсовой колеи, динамико-кинематические показатели, виды геометрических схем, касательная геометрия, методы проектирования стрелочных кривых, проект стрелочного перевода

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ершов Д. С. Проектирование геометрии стрелочных кривых // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 1. С. 29–41.

✉ denis-fiolent@bk.ru (Д. С. Ершов)

© Ершов Д. С., 2025

BY 4.0

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article
UDK 625.151
EDN: https://elibrary.ru/aotspi
Scientific specialty 2.9.2. Railway track, survey and design of railways

Design of switch curves geometry

Denis S. Ershov✉

Murom Switch Plant,
Murom, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In addition to ensuring reliability and safety, special attention should be paid to meeting the speed requirements of railway rolling stock in main lines in designing switch devices. Constructive solutions of switch facilities are determined by indicators of the dynamics of rolling stock when railway crews move along the track. According to the author, the design methods of switch curves do not meet modern speed requirements of rolling stock. The purpose of this article is to develop new approaches to the design of switch curves.
Materials and methods. The author applied analysis method of dynamic and kinematic parameters of applied switch curves used in turnout switches constructions. Tensometric methods of the investigated parameters of turnout switches are obtained.
Results. The analysis of turnout switch design methods is performed. Operational tests of the turnout switch with improved dynamic and kinematic characteristics were performed. The obtained results indicate the expediency of improving the design methodology of switch curves, the effectiveness of using geometric schemes of switch switches with tangential geometry.
Discussion and conclusion. Comparative operational tests of turnout switches with the tangential and secant shapes of the switch curve proposed in the article show that the service life of the curved contact tongues increased. It is relevant to conduct similar tests with other types of turnout switches. Considering the results of tests and calculations, the next stage is planned to address the issue of adjusting the design methods of turnout switches products, especially for high-speed traffic.

KEYWORDS: turnout switches, rail track geometry, dynamic and kinematic parameters, types of geometric schemes, tangential geometry, switch curves design methods, turnout switch design

FOR CITATION: Ershov D. S. Design of switch curves geometry. *Russian Railway Science Journal.* 2025;84(1):29–41. (In Russ.).

✉ denis-fiolent@bk.ru (D. S. Ershov)

© Ershov D. S., 2025

Введение. Стрелочное хозяйство каждого вида рельсового транспорта имеет важнейшее значение по влиянию на пропускную способность линий и затраты на устройство и содержание железнодорожного пути. Эффективность геометрии стрелочных переводов также оказывает значительное влияние как на технические, так и на экономические показатели железных дорог[1].

Анализ развития стрелочного хозяйства показывает, что кроме обязательного повышения надежности и безопасности особое внимание следует уделять вопросам скоростей движения подвижного состава на ответвленное направление и уменьшения затрат на обслуживание стрелочных переводов [1, 2]. Конструктивные решения, обеспечивающие выполнение требований безопасности движения подвижного состава и уровня плавности хода, определяются показателями динамики и кинематики движения железнодорожных экипажей по пути.

Стрелочные переводы в силу особенностей своей конструкции и назначения не позволяют использовать большинство из технических решений, применяемых для прямых и криволинейных участков перегонных путей. Основными отличиями геометрии рельсовой колеи стрелочных переводов от пути на перегонах и станциях являются:

- отсутствие переходных кривых;
- скачкообразные переходы от прямых участков к криволинейным;
- наличие угла в плане в месте расположения острия остряков (начальный стрелочный угол);
- скачкообразное изменение радиуса кривой без переходного участка;
- наличие углов «доворота» в местах изменения кривизны кривой или перехода от кривой к прямой;
- конструктивное местное уширение колеи для укрытия острия остряков, предотвращающего вкатывание колес с неблагоприятной формой рабочей поверхности на остряк [3];
- наличие вертикальной неровности в зоне перекатывания колес с остряка на рамный рельс и обратно;
- отсутствие возвышения наружного рельса [4];
- наличие элементов, направляющих движение колесных пар (контррельсов);
- требования к взаимному положению остряков и рамных рельсов на стрелке;
- требования к взаимному положению контррельсов и элементов крестовины (усовиков, сердечника);
- отсутствие подуклонки рельсовых нитей (у целого ряда конструкций стрелочных переводов).

В силу этих особенностей методики проектирования геометрии пути на стрелочных переводах существенным образом отличаются от методик проектирования геометрии перегонных путей.

Характеристики стрелочных переводов для российских железных дорог непосредственно связаны с соблюдением динамико-кинематических параметров движения подвижного состава. Современные стрелочные переводы должны быть спроектированы удовлетворяющими следующим динамико-кинематическим характеристикам:

- внезапно появляющееся ускорение при входе на боковой путь стрелочного перевода не более $J_0 = 0{,}640$ м/с^2;
- скорость нарастания ускорения вагона при входе на боковой путь стрелочного перевода не более $\psi = 0{,}800$ м/с^3;
- непогашенное центробежное ускорение при движении по переводной кривой не более $\gamma_0 = 0{,}690$ м/с^2 (фактические значения для марок крестовины: 1/9 — 0,620 м/с^2; 1/11 — 0,640 м/с^2; 1/18 — 0,513 м/с^2; 1/22 — 0,690 м/с^2);
- величина (условная), характеризующая изменение кинетической энергии при ударе (набегании) колеса на остряк не более $W_0 = 0{,}225$ м/с^2.

Величины этих характеристик были определены экспериментальным путем и нормированы в процессе испытаний стрелочной продукции с учетом функционального состояния и работоспособности локомотивных бригад, воздействия на пассажиров и грузы, динамических эффектов, возникающих в стрелочных переводах и подвижном составе при скорости движения до 40–50 км/ч. Они неоднократно перепроверены и подтверждены многолетним опытом эксплуатационной работы стрелочных переводов на отечественных железных дорогах.

В соответствии с указанными параметрами, а также с учетом требований взаимозаменяемости (если они есть) проектируются новые геометрические схемы стрелочных переводов, рассчитанные на более высокую скорость.

При проектировании новых стрелочных кривых применяются различные технические решения, при этом могут использоваться две основные концепции.

Нормирование нескомпенсированного ускорения. При движении по кривым возникает центробежное ускорение, зависящее от скорости и радиуса кривой. Для компенсации вызываемых им сил в кривых устраивается возвышение наружного рельса. В стрелочной кривой, в связи с особенностью конструкции стрелочного перевода, возвышение не устраивается.

[1] Стратегия развития холдинга «РЖД» до 2030 года [Электронный ресурс]: утв. советом директоров ОАО «РЖД» (протокол № 19 от 23 декабря 2013 года). URL: https://ar2020.rzd.ru/pdf/ar/ru/strategic-report_strategy.pdf (дата обращения: 18.02.2025).

[2] Железнодорожный путь: [Учебник для вузов ж.д. транспорта] / Г. М. Шахунянц. М.: Трансжелдориздат, 1961. 615 с.

Нескомпенсированная часть ускорения может выражаться в виде недостатка возвышения [5]. Величину радиуса входа на стрелочную кривую R_0, м, исходя из допустимой величины недостатка возвышения можно определить из выражения

$$R_0 = \frac{12{,}5v_{\max}^2}{H}, \quad (1)$$

где $v_{\max}$ — максимальная скорость движения, км/ч; H — допустимая величина недостатка возвышения, мм.

Рассмотрим конструкцию таких стрелочных кривых. Вход на стрелочную кривую в пределах зоны набегания колес на остряк выполняется постоянным радиусом, определяемым по формуле (1). Начальный стрелочный угол и угол удара колес в криволинейный остряк определяется исходя из нормируемых величин потери кинетической энергии и внезапно появляющегося ускорения по обычным методикам. Радиус R является минимальным[3].

За пределами зоны набегания колес на криволинейный остряк радиус стрелочной кривой плавно увеличивается до величины, определяемой заданной в проекте скорости движения по ответвлению. Интенсивность изменения радиуса стрелочной кривой эквивалентна интенсивности отвода возвышения наружного рельса. Отвод, как правило, производится с изменением кривизны по кубической параболе или клотоиде.

Интенсивность отвода эквивалентна интенсивности возвышения наружного рельса[4]. На линиях французских железных дорог (SNCF) принята величина изменения недостатка возвышения Δi от времени Δt или скорости подъема колес на возвышение $\Delta i/\Delta t = 30$ мм/с.

Исходя из допускаемой величины этого показателя длина отвода L, м определяется по формуле[4]:

$$L = Hv_{\max}/(\Delta i/\Delta t). \quad (2)$$

Нормирование кинематических параметров движущегося экипажа. Расчетные зависимости стрелочной кривой в соответствии с заданными динамико-кинематическими требованиями имеют следующий вид.

Радиус криволинейного остряка не менее

$$R_0' = \frac{V_{\text{бок}}^2}{j_0}, \quad (3)$$

где R_0' — радиус остряка в зоне набегания колеса, м; $V_{\text{бок}}$ — скорость движения экипажа на ответвленное направление, м/с; j_0 — допускаемая величина внезапно появляющегося непогашенного центробежного ускорения, м/с^2.

Начальный стрелочный угол и угол удара в остряк при входе на стрелку составляет не более

$$\beta_n \leqslant \arcsin\left[\frac{1}{V_{\text{бок}}}\sqrt{W_0^2 - 2\delta_{\max} j_0}\right];$$
$$\beta_y \leqslant \arcsin\left[\frac{W}{V_{\text{бок}}}\right], \quad (4)$$

где β_n — начальный стрелочный угол стрелочной кривой (без учета подстрожки остряка для укрытия острия), градус; β_y — угол набегания колеса на остряк в расчетном сечении, градус; $\delta_{\max}$ — наибольший расчетный зазор колеса относительно рамного рельса при входе на стрелку, мм.

Радиус основной части стрелочной кривой

$$R_0 \geqslant \frac{V_{\text{бок}}^2}{\gamma_0}, \quad (5)$$

где R — радиус кривой, м.

Из указанных соотношений возможно определить основные параметры геометрической схемы проектируемого стрелочного перевода:

- радиус криволинейного остряка (начальный радиус);
- радиус переводной кривой;
- начальный стрелочный угол.

Начальный радиус и радиус переводной кривой зависят от скорости движения и допустимой величины непогашенного и внезапно возникающего при набегании колеса на остряк ускорения. Начальный стрелочный угол напрямую зависит от величины, характеризующей потерю кинетической энергии. Этот показатель призван ограничить угол, под которым колесо будет наезжать на криволинейный остряк [6].

В целом, соотношения (3)–(5) позволяют проектировать кривизну стрелочной кривой, соответствующую движению по ней точечного экипажа, однако при практическом определении параметров нужно учитывать, что элементом, воспринимающим закругления пути, является не точечный объект, а база экипажа.

Анализ практических реализаций действующей в настоящее время методики проектирования показывает, что она отвечает задачам выработки технических решений при невысоких скоростях движения до 50 км/ч на ответвление, но обладает рядом недостатков, которые следует учесть при детальной отработке

[3] Проектирование скоростных стрелочных переводов: памятка ОСЖД Р 752/3. Варшава, 2003. 13 с.
[4] Там же.

метода проектирования стрелочных кривых для более высоких скоростей.

Таким образом, соотношения (3)–(5) рассматривают вход экипажа на стрелочную кривую только как процесс набегания направляющих колес колесных пар на остряк. Это справедливо, если рассматривать экипаж как точечный объект.

Если рассматривать движение экипажа как протяженного объекта, имеющего жесткую базу, то очевидно, что помимо набегания направляющего колеса на остряк и возникновения при этом изменения кинетической энергии при входе экипажа на стрелочную кривую возникает нестационарный процесс, сопровождающийся изменением центробежного ускорения от исходной величины (до входа в кривую) до величины непогашенного ускорения, соответствующего движению всего экипажа по стрелочной кривой [7]. Скорость изменения ускорений при движении по этой части кривой не анализируется.

Скорость изменения ускорения при входе жесткой базы экипажа на стрелку определяется соотношением

$$\psi = \frac{V^3}{Rd}, \qquad (6)$$

где ψ — скорость изменения ускорения, м/с^3; d — длина жесткой базы расчетного экипажа, м; V — скорость движения экипажа, м/с.

При этом угол поворота стрелочной кривой до места установки на ней базы экипажа (участок нестационарного движения) уже не может быть местом удара колес в остряк. То есть этот угол нельзя идентифицировать с углом удара — смысл нормирования динамики входа на стрелку по углу удара в данной методике теряется.

Важнейшим фактором является также то, что траектория движения базы экипажа при входе на стрелку может быть различной. Причем, задняя точка базы экипажа может смещаться в зависимости от конкретных отношений размеров и скорости движения, как в сторону рамного рельса, так и от него.

Теоретический анализ кинематики движения базы экипажа после набегания его на остряк возможен, однако следует иметь ввиду, что фактическое движение экипажа зависит еще и от силового взаимодействия с путем и соседними по поезду экипажами [8].

Скорость изменения ускорения оказывает существенное влияние на геометрию стрелочных кривых при скоростях движения, превышающих 80 км/ч, и движении по сочетаниям стрелочных переводов [9, 10]. В связи с изложенным, целесообразно при проектировании остряков для высокоскоростных стрелочных переводов и съездов сохранить принятое в России нормирование величин внезапно появляющегося ускорения удара в остряк, дополнив этими показателями критерии проектирования по скорости изменения ускорения. Это позволит контролировать геометрию остряка на участке от острия до сечения 30 мм. Имеет смысл использовать также контроль средней скорости нарастания ускорения на участке входа базы экипажа в стрелочную кривую, принятый за рубежом.

Спроектированные таким образом остряки будут одновременно удовлетворять всем требованиям российских и зарубежных методик проектирования.

Кроме требований кинематики и динамики геометрия остряков должна обеспечивать возможность их изготовления при минимальных дополнительных затратах на реконструкцию оборудования заводов-изготовителей стрелочных переводов и остряковых спецпрофилей. Выполнение этих требований достигается применением различных конструктивных решений.

В применяемых в настоящее время стрелочных переводах используются разные варианты геометрии остряков. Наиболее распространены остряки, выполненные по одной из следующих схем:

- остряки с постоянной или скачкообразной изменяющейся кривизной, однорадиусные (рис. 1, *а*), двухрадиусные (рис. 1, *б*);

Обозначения на рис. 1–4: $x_о$ — длина острия (строганой части); $l_п$ — длина поворотной части (поворачивающаяся часть остряка с полным профилем); $y_п$ — ордината в начале поворотной части (в корне); $y_и$ — ордината упорной нити бокового пути в месте изменения радиуса; l — длина переводной кривой; $l_и$ — длина упорной нити бокового пути до места изменения радиуса; $R_{вх}$ — радиус на входе на стрелку; R_0 — начальный радиус переводной кривой; R_{lx} — радиус в определенной точке переводной кривой; R — радиус бокового пути, 1 — место изменения кривизны; 2, 3 — подварианты кривизны.

- клотоидные с увеличением кривизны, с уменьшением кривизны и комбинированные (рис. 2);
- остряки в виде комбинации клотоиды и круговой кривой с увеличением кривизны или с уменьшением кривизны (рис. 3);
- остряки с косинусоидальным изменением кривизны с нулевой начальной кривизной или с ненулевой начальной кривизной (рис. 4).
- остряки с косинусоидальным изменением кривизны с нулевой начальной кривизной или с ненулевой начальной кривизной (рис. 4).

Каждая из перечисленных схем остряков может быть осуществлена по одному из следующих вариантов кривых, применяемых на железных дорогах различных стран (рис. 5).

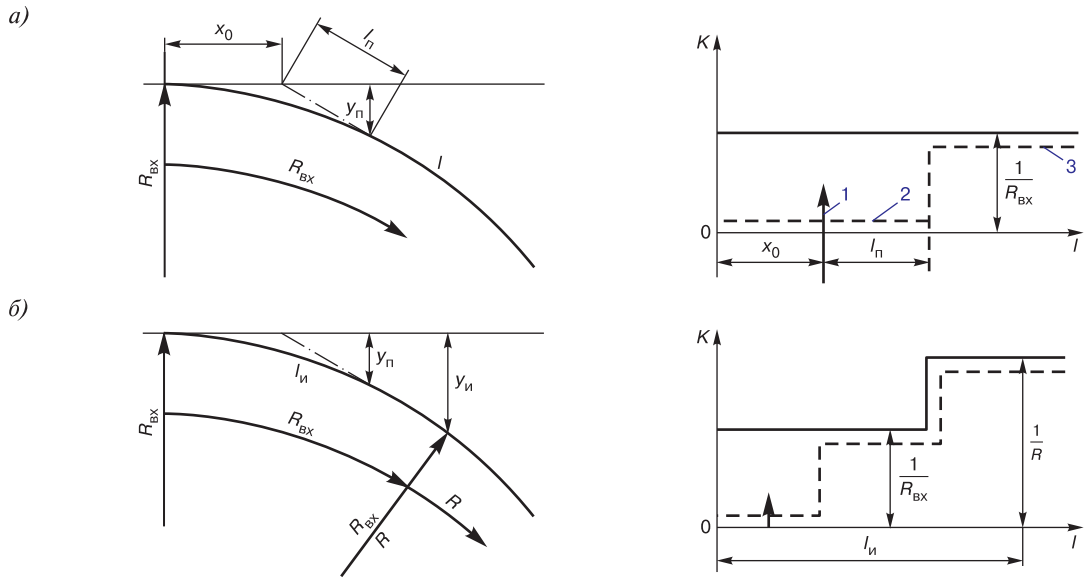

Рис. 1. Геометрические схемы остряков (слева) и кривизна стрелочных кривых в зоне остряков K (справа)*:
а — остряки с постоянной кривизной; *б* — со скачкообразно изменяющейся кривизной
* Источник: разработан автором

Fig.1. Geometric schemes of contact tongues (left) and curvature of switch curves in the area of the contact tongues K (right)*:
а — contact tongues with constant curvature; *б* — with intermittently changing curvature
* Source: developed by the author

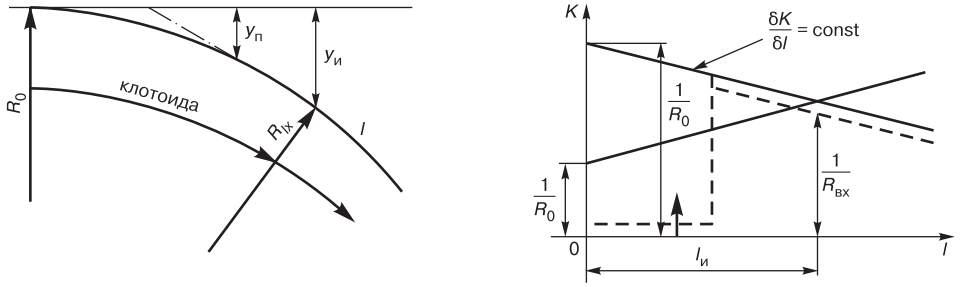

Рис. 2. Геометрическике схемы остряков (слева) и кривизна стрелочных кривых в зоне остряков (справа) с комбинированным клотоидным увеличением и уменьшением кривизны*
* Источник: разработан автором

Fig. 2. Geometric schemes of contact tongues (left) and curvature of switch curves in the contact tongues area (right) with a combined clotoid increase and decrease in curvature*
* Source: developed by the author

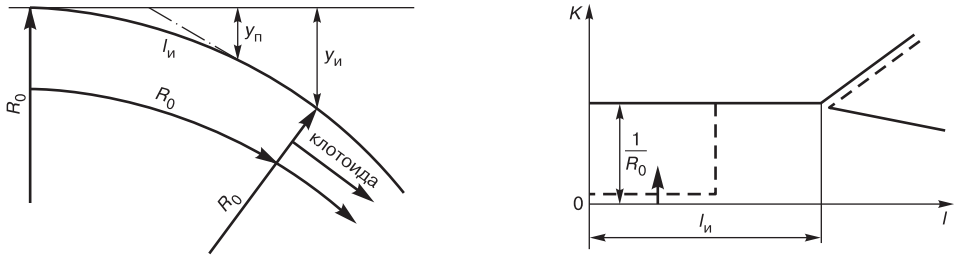

Рис. 3. Геометрические схемы остряков (слева) и кривизна стрелочных кривых в зоне остряков (справа) в виде комбинации клотоиды и круговой кривой с увеличением кривизны, или с уменьшением кривизны*
* Источник: разработан автором

Fig. 3. Geometric schemes of contact tongues (left) and curvature of switch curves in contact tongues area (right) in combination of a clothoid and a circular curve with an increase in curvature, or with a decrease in curvature*
* Source: developed by the author

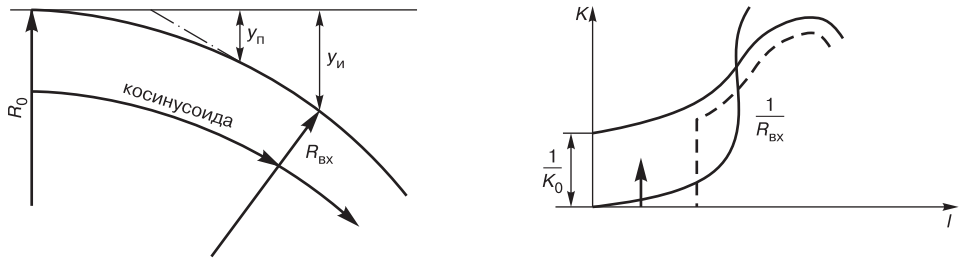

Рис. 4. Геометрические схемы остряков (слева) и кривизна стрелочных кривых в зоне остряков (справа) с косинусоидальным изменением кривизны с нулевой начальной кривизной, или с ненулевой начальной кривизной*
* Источник: разработан автором

Fig. 4. Geometric schemes of contact tongues (left) and the curvature of switch curves in the contact tongues area (right) with a sinusoidal change in curvature with zero initial curvature, or with non-zero initial curvature*
* Source: developed by the author

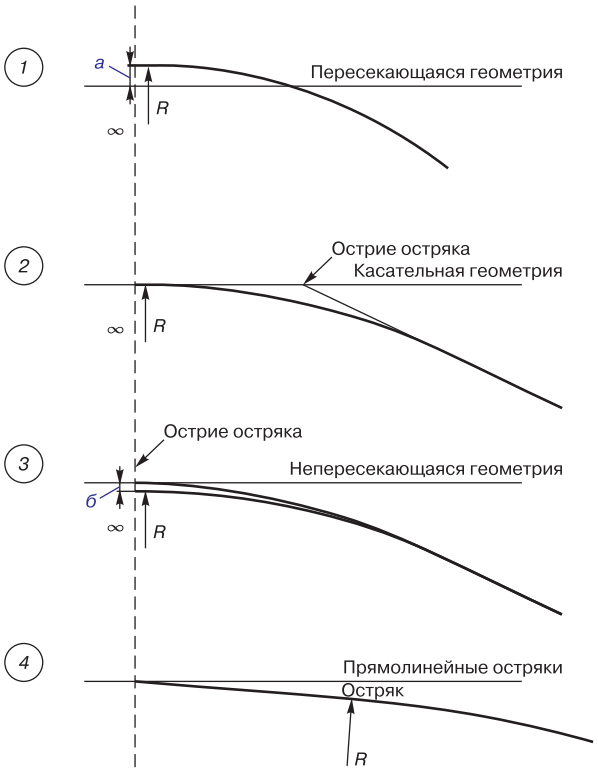

Рис. 5. Виды стрелочных кривых*:
1 — с пересекающейся геометрией; *2* — с касательной геометрией; *3* — с непересекающейся геометрией; *4* — с прямолинейными остряками, *а* — засечка; *б* — обратная засечка
* Источник: разработан автором

Fig. 5. Types of switch curves*:
1 — with intersecting geometry; *2* — with tangent geometry; *3* — with non-intersecting geometry; *4* — with rectilinear contact tongues, *a* — notch; *б* — reverse gauge notch
* Source: developed by the author

Пересекающаяся геометрия (*секущая*), рис. 5, *1*. Основное преимущество такой геометрии — это возможность спроектировать более короткий перевод за счет большого начального угла. При этом к отрицательным параметрам можно отнести высокий уровень внезапно возникающего ускорения.

Касательная геометрия, рис. 5, *2*. Наибольший комфорт движения подвижного состава за счет меньших углов входа. Используется, в том числе, в высокоскоростных стрелочных переводах Великобритании, Франции, Германии.

Непересекающаяся геометрия, рис. 5, *3*. В данной геометрии путь не пересекается с рамным рельсом. Применяется в стрелочных переводах Великобритании NR60 mk 1, BWG.

Прямолинейные остряки, рис. 5, *4*. Устаревшая геометрия остряков, используемая в настоящее время только в шахтных или специальных конструкциях.

Кроме того, для каждого варианта возможны различные подварианты, связанные с оформлением практического острия остряка.

Итак, в разных странах существуют различные методы проектирования стрелочных кривых, различаются подходы к проектированию стрелочной продукции в зависимости от скоростей движения. На железных дорогах установлены разные нормативные параметры, в соответствии с которыми производятся расчеты. Целью данной работы является улучшение динамико-кинематических параметров стрелочной продукции, используемой на отечественных железных дорогах, посредством изменения методики проектирования геометрии стрелочной кривой на основе анализа отечественного и мирового опыта.

Выполнение динамико-кинематических требований можно обеспечить применением практически всех представленных схем, поэтому в процессе проектирования стрелочного перевода должны быть рассмотрены и сопоставлены конструктивные решения всех этих видов. Наилучшим вариантом является тот, который при выполнении всех условий обеспечивает минимальные длину и стоимость разрабатываемого стрелочного перевода.

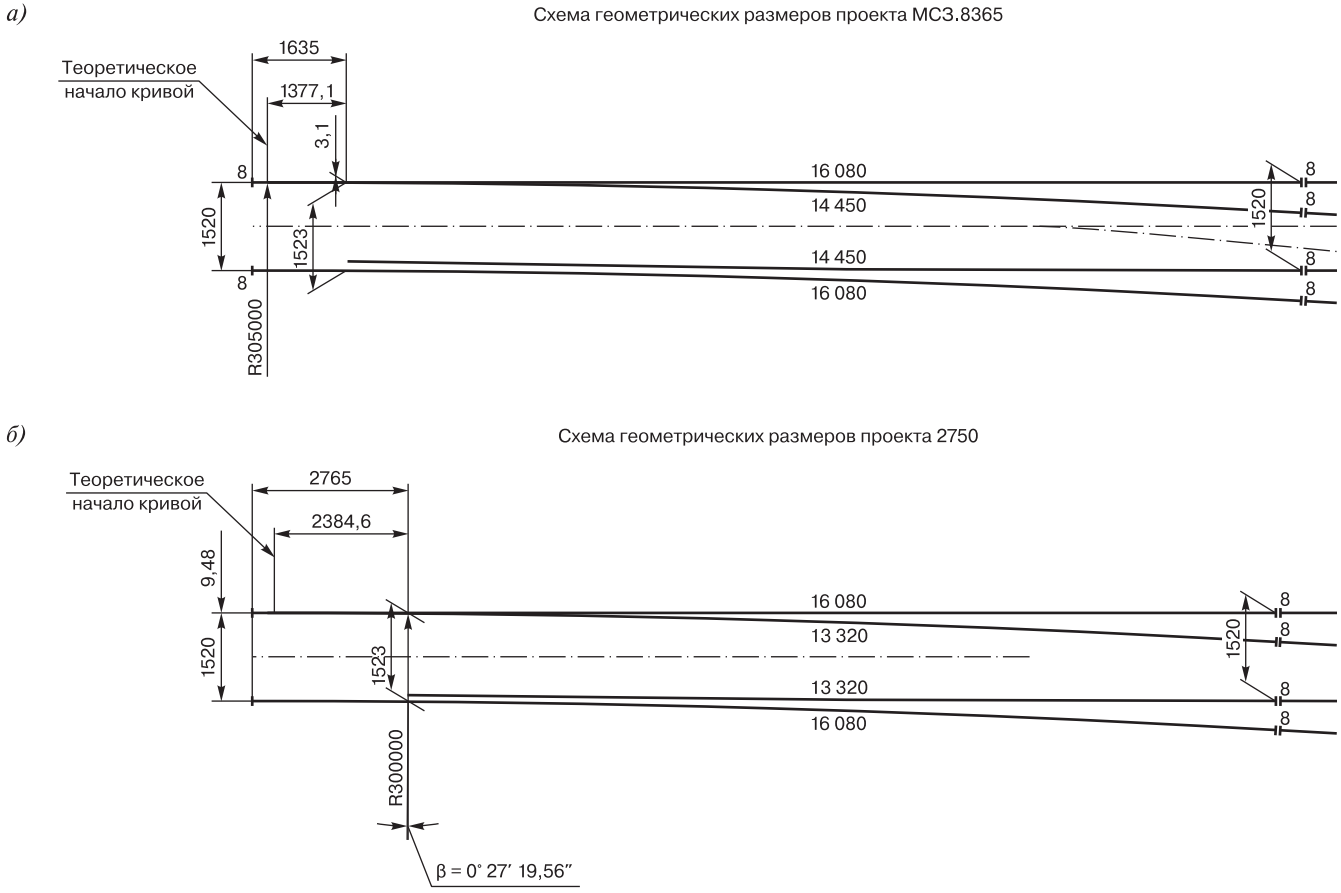

Рис. 6. Различия геометрических схем стрелочных переводов в зоне стрелочной части*:
а — проекта МСЗ.8365; *б* — проекта 2750
* Источник: данные автора

Fig. 6. Differences in geometric schemes of turnout switches in the area of the switch part*:
а — MSP.8365 project; *б* — 2750 project
* Source: author's data

Отечественные стрелочные переводы в абсолютном большинстве спроектированы с использованием схемы с пересекающейся геометрией, в том числе и высокоскоростные. Конструкторы, имея возможность соблюсти норматив по потере кинетической энергии подвижного состава при ударе в криволинейный остряк и стремясь увеличить радиус кривой, создавали стрелочные переводы с практически максимальными значениями начального стрелочного угла даже на самых пологих марках, предназначенных для высокоскоростного движения.

Учитывая мировой опыт эксплуатации стрелочных переводов с касательной геометрией с целью снижения воздействия колес подвижного состава на криволинейные остряки стрелочных переводов, проведены расчеты по возможности модернизации типовой геометрической схемы стрелочных переводов марок 1/9 и 1/11 со скоростями движения на ответвление до 50 км/ч с применением касательной геометрии остряка вместо секущей.

В результате была разработана новая схема стрелочного перевода с касательной геометрией остряка проекта МСЗ.8365.00.000 (рис. 6). При разработке схемы учитывалось требование по взаимозаменяемости нового стрелочного перевода и типового проекта 2750.00.000. Для применения касательной геометрии остряка потребовалось уменьшить передний вылет рамных рельсов с 2765 мм в проекте 2750 до 1635 мм в новом проекте. При этом увеличилась длина сварных остряков с 13 320 до 14 450 мм. Также увеличился радиус бокового пути с 300 до 305 м.

Результаты. Анализ результатов расчетов показал, что при касательном остряке условная зона, на которую приходятся все удары колес в криволинейный остряк, становится длиннее, а соответственно все удары распределяются на большую длину, что должно благоприятно сказаться на ресурсе остряка. Кроме того, угол этих ударов меньше, чем при секущей геометрии с начальным углом (табл. 1).

Таблица 1

Углы стрелочной кривой в характерных сечениях остряка*

Table 1

The angles of the switch curve in the characteristic sections of the contact tongue*

Проект стрелочного перевода	Сечения остряка на уровне измерения, мм	
	20	50
2750	0° 48' 11,53"	1° 8' 27,36"
МСЗ.8365	0° 39' 22,15"	1° 2' 14,92"

* Источник: данные автора
* Source: author's data

В табл. 1 показаны углы рабочей грани остряка к оси прямого железнодорожного пути в сечениях, где толщина остряка на уровне измерений составляет 20 и 50 мм. Большинство ударов колес в остряк происходит между указанными сечениями. Соответственно, чем меньше углы удара в зоне набегания колеса в остряк, тем меньшими будут контактные напряжения.

Учитывая положительные теоретические результаты, было принято решение о проведении натурных испытаний и изготовлении опытного образца. После проведения заводских испытаний стрелочный перевод был уложен на станции Вековка Горьковской железной дороги для проведения эксплуатационных испытаний.

Основными отличиями в геометрической схеме стрелочного перевода проекта МСЗ.8365 является увеличенный радиус бокового железнодорожного пути и уменьшенный начальный стрелочный угол по сравнению с типовыми конструкциями (табл. 2).

Угол в острие остряка в новой геометрии уменьшен практически в два раза в сравнении с типовой (табл. 2).

Для оценки влияния результатов улучшения геометрии стрелочного перевода на динамику прохода экипажей были проведены сравнительные измерения горизонтальных поперечных ускорений кузовной части локомотива ЧМЭ3 при движении по двум стрелочным переводам проектов 2750 и 8365 на станции Вековка Горьковской железной дороги.

Стрелочные переводы № 17 (проект МСЗ.8365) и № 19 (2750) работают в аналогичных условиях под воздействием одних и тех же поездов, поэтому величины ускорений, возникающие в двигающемся по стрелочному переводу локомотиве, должны характеризовать особенности геометрии стрелочной кривой перевода.

Таблица 2

Параметры стрелочных переводов проектов МСЗ.8365 и 2750*

Table 2

Parameters of turnout switches of MSP.8365 and 2750 projects*

Параметр	Проект МСЗ.8365	Проект 2750
Начальный стрелочный угол, град	0° 15' 31,32"	0° 27' 19,56"
Радиус бокового пути, м	305,00	300,00

* Источник: данные автора
* Source: author's data

Во время работы в пути рельсовые элементы обоих стрелочных переводов были подвержены боковому износу, поэтому перед проведением опытных поездок были проведены измерения фактического состояния стрелочных кривых обоих стрелочных переводов непосредственно в пути. Измерения производились методом хорд — от хорды длиной 10 м с расположением точек измерения от острия остряка в сторону его корня с шагом через 5 м. Результаты измерений представлены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, геометрия бокового пути в зоне криволинейного остряка более благоприятная у стрелочного перевода проекта МСЗ.8365, чем у перевода проекта 2750. Величины радиусов в точках

Таблица 3

Фактическая геометрия стрелочных кривых переводов № 17 и № 19 на станции Вековка Горьковской железной дороги при проведении опытных поездок локомотива*

Table 3

The actual geometry of the switch curves No. 17 and No. 19 at the Vekovka station of the Gorky Railway during the experiment locomotive trips*

Расстояние от острия остряка до места измерения стрелы изгиба, м	Стрелочный перевод № 17, проект МСЗ.8365.00.000			Стрелочный перевод № 19, проект 2750.00.000		
	Стрела, мм	Радиус кривой, м		Стрела, мм	Радиус кривой, м	
		номинальный	фактический		номинальный	фактический
0	38	305	329	40	300	312
5	40		312	45		278
10	43		291	45		278

* Источник: данные автора
* Source: author's data

на расстоянии 0,5 м и 10 м от острия в стрелочных переводах проекта МСЗ.8365 и 2750 составляют соответственно 329/312 м, 312/278 м и 291/278 м. Соотношение величин радиусов соответственно равно 1,05, 1,12 и 1,05 раз в пользу стрелочного перевода проекта МСЗ.8365.

В качестве испытательной подвижной единицы использовался маневровый тепловоз ЧМЭ3 № 5943, обращающийся на железнодорожных путях станции Вековка Горьковской железной дороги. Для проведения опытных поездок локомотив был оборудован акселерометрами, которые были расположены на раме кузова.

По результатам опытных поездок были получены величины ускорений кузовной части локомотива при движении по стрелочным кривым исследуемых стрелочных переводов (табл. 4).

Из данных, приведенных в таблице, видно, что при проходе стрелки стрелочного перевода проекта МСЗ.8365, как в противошерстном, так и в пошерстном направлениях в экипаже возникают ускорения меньше на величину порядка 10–13%, чем при аналогичном движении по переводу проекта 2750. Это связано с тем, что в процессе эксплуатационной работы и износа рельсовых элементов радиус стрелочной кривой, «выкатанной» колесами на переводе проекта МСЗ.8365, больше и что начальный стрелочный угол на новом переводе проекта МСЗ.8365 меньше, а радиус стрелочной кривой больше соответствующих величин стрелочного перевода проекта 2750. Также на стрелочном переводе были произведены замеры величин напряжений в остряках, рамных рельсах, рельсах соединительных путей, рельсовой и литой частях крестовины и контррельсах, максимальные значения которых составили соответственно 232, 185, 206, 150, 80 и 250 МПа. Эти значения не превышают допускаемые, составляющие 275, 240, 240, 240, 110 и 330 МПа.

Кроме натурных испытаний с помощью Программного комплекса «Универсальный механизм»[5] было проведено моделирование движения локомотива ЧМЭ3 по стрелочным кривым переводов проектов 2750 и МСЗ.8365. Данные, полученные в результате расчетов, представлены на рис. 7.

Как видно из рис. 7, результаты моделирования подтверждают преимущества геометрии касательного остряка стрелочного перевода проекта МСЗ.8365 по сравнению с секущим остряком стрелочного перевода проекта 2750. Максимальное значение поперечного ускорения для перевода МСЗ.8365 составило 0,96 м/с^2, для 2750 — 1,09 м/с^2, т.е. применение касательной геометрической схемы позволяет уменьшить горизонтальные поперечные ускорения при движении локомотива по стрелочной кривой на 13%.

В настоящее время продолжаются сравнительные эксплуатационные наблюдения за работой стрелочных переводов с касательной и секущей формами стрелочной кривой. Данные последовательных испытаний криволинейных остряков проекта МСЗ.8365 и проекта 2750 на трех стрелочных переводах № 2, 4, 536 станции Ярославль-Главный Северной железной дороги приведены на рис. 8. Разброс срока службы остряков до замены по износу (14–44%) связан с особенностями работы конкретных стрелочных переводов, влиянием окружающей температуры, изменением грузонапряженности. Наблюдается однозначная тенденция — срок службы стрелочных переводов с касательной формой стрелочной кривой выше, чем в тех же условиях у переводов с секущей геометрией.

Таблица 4

Ускорения рамы кузова локомотива при движении по стрелочным переводам № 17 и № 19 на станции Вековка Горьковской железной дороги*

Table 4

Acceleration of the locomotive body frame when moving along switches No. 17 and No. 19 at the Vekovka station of the Gorky Railway*

Направление движения	Место расположения акселерометра	Наибольшие ускорения, м/с^2		Соотношение ускорений для № 17 относительно № 19
		стрелочный перевод № 17, проект МСЗ.8365	стрелочный перевод № 19, проект 2750	
Противо-шерстное (ПРШ)	Над первой по ходу тележкой	2,6	3,0	0,87
	Над второй по ходу тележкой	2,1	2,8	0,84
Пошерстное (ПШ)	Над первой по ходу тележкой	2,4	2,8	0,86
	Над второй по ходу тележкой	2,2	2,5	0,88

* Источник: данные автора
* Source: author's data

[5] Моделирование динамики железнодорожных экипажей: Руководство пользователя [Электронный ресурс]. URL: www.universalmechanism.com/download/80/rus/08_um_loco.pdf (дата обращения: 11.02.2025).

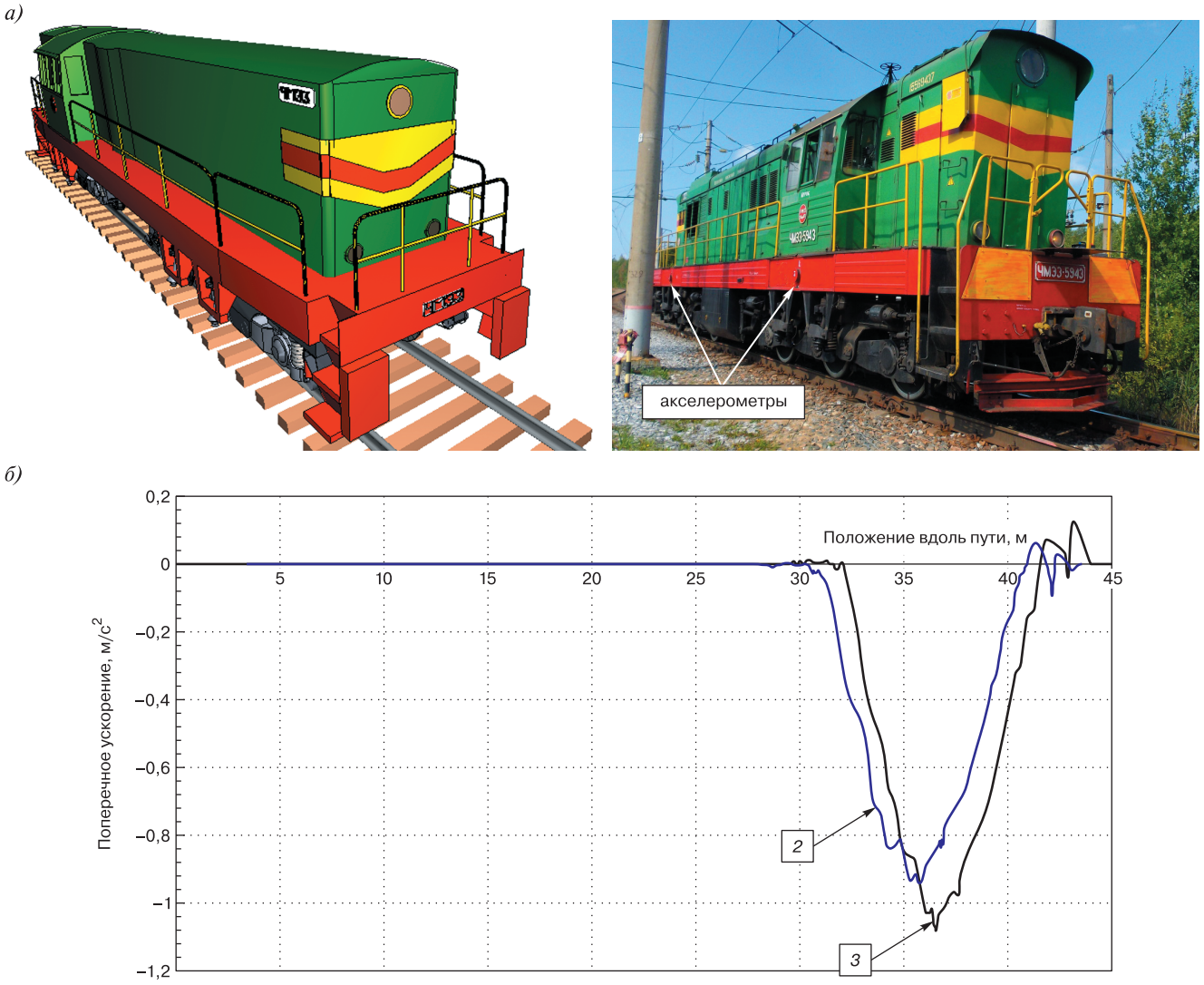

Рис. 7. Моделирование движения маневрового тепловоза ЧМЭ3 по стрелочным кривым переводов проектов 2750 и МСЗ.8365 в программном комплексе «Универсальный механизм»*:
а — модель тепловоза; *б* — зависимость поперечных ускорений по длине пути; *1* — акселерометры; *2* — кривая ускорений для МСЗ.8365; *3* — кривая ускорений для 2750
* Источник: разработан автором

Fig. 7. Simulation of the movement of the ChME3 shunting locomotive along switch curves of turnout switches of 2750 and MSP.8365 projects in the Universal Mechanism software package*:
а — locomotive model; *б* — dependence of transverse accelerations along the length of the track; *1* — accelerometers; *2* — acceleration curve for MSP.8365; *3* — acceleration curve for 2750
* Source: developed by the author

Примечание: РК 2750 — стрелочный перевод с применением ремонтного комплекта по проекту 2750. РК № 005 21, РК № 011 21, РК № 001 21 (1,2), РК 8365 — стрелочные переводы с касательной формой стрелочной кривой по проекту МСЗ.8365.

Обсуждение. Методы проектирования стрелочных кривых, используемые с 1960-х годов, в большей степени отвечают задачам прохождения подвижного состава со скоростью 40–80 км/ч, принятой в качестве максимально допустимой. Для современного подвижного состава и высокоскоростного движения необходима разработка новых подходов к проектированию.

Сравнительные эксплуатационные наблюдения за работой стрелочных переводов с предлагаемыми в работе касательной и секущей формами стрелочной кривой на примере переводов марки 1/11 показывают, что срок службы криволинейных остряков увеличился, поэтому целесообразно провести аналогичные испытания и с другими марками стрелочных переводов.

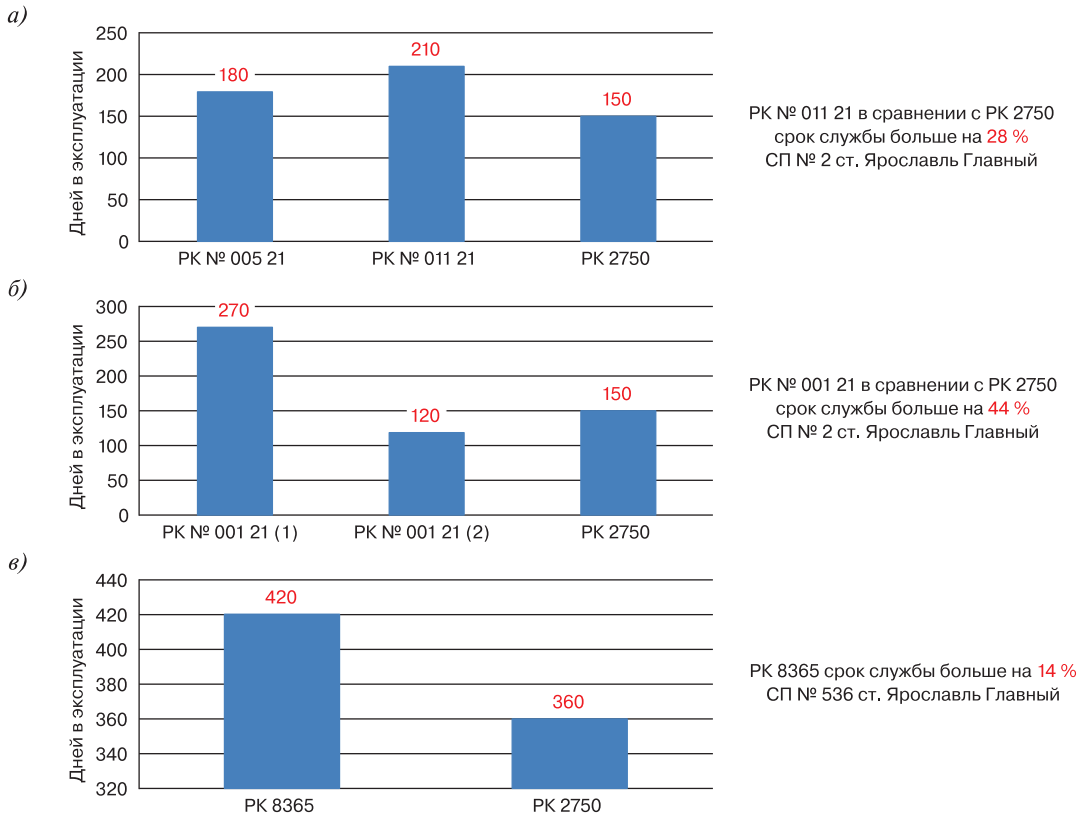

Рис. 8. Сравнение срока службы до замены по износу криволинейных остряков с остряками проекта 2750, ст. Ярославль-Главный Северной железной дороги*:
а — стрелочный перевод № 2; *б* — стрелочный перевод № 4; *в* — стрелочный перевод № 536
* Источник: разработан автором

Fig. 8. Comparison of the service life before replacement by wear of curved contact tongues with contact tongues of 2750 project, Yaroslavl-Glavny station, Northern Railway*:
a — turnout switch No. 2; *б* — turnout switch No. 4; *в* — turnout switch No. 536
* Source: developed by the author

Учитывая результаты испытаний и расчетов, следующим этапом планируется рассмотреть вопрос по корректировке методик проектирования стрелочной продукции, в особенности для высокоскоростного движения. Уже сейчас стрелочные переводы, которые создаются для высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Санкт-Петербург, проектируются не по типовым методикам, а с учетом подходов, изложенных в настоящей статье.

Выводы

1. Для улучшения геометрии стрелочных кривых требуется сохранить принятое в России нормирование величин внезапно появляющегося ускорения удара в остряк, дополнив этот показатель критериями проектирования по скорости изменения ускорения. Это позволит контролировать геометрию остряка на участке от острия до сечения 30 мм. Имеет смысл использовать также контроль средней скорости нарастания ускорения на участке входа базы экипажа в стрелочную кривую, принятый за рубежом.

2. В стрелочных переводах для высокоскоростного движения, а также для марок переводов большей или равной 1/11, учитывая требования к плавности хода и комфортабельности движения, целесообразно использовать касательную геометрию стрелки. Для стрелочных переводов массовых конструкций необходимо проводить сравнительный анализ с точки зрения динамических и конструктивных преимуществ исходя из планируемых условий их работы.

3. Результаты эксплуатации стрелочного перевода проекта МСЗ.8365 показывают преимущества новой геометрической схемы. Более низкий уровень ускорений в экипаже при проходе стрелки стрелочного перевода МСЗ.8365 уменьшит износ рельсовых элементов, а также позволит рекомендовать повысить скорость движения грузового подвижного состава по этому переводу до 50 км/ч.

4. Результаты исследований в совокупности с положительными результатами моделирования и натурных испытаний позволяют сделать вывод об эффек-

тивности проведенной работы. Совокупность данных, полученных при исследованиях и испытаниях, может и должна быть использована при корректировке методологии проектирования стрелочных переводов.

5. Учитывая полученные результаты, одним из направлений для дальнейших исследований может стать распространение полученных результатов на геометрию стрелочных переводов пологих марок для высокоскоростного движения поездов.

Благодарности: автор выражает благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

Acknowledgments: the author expresses gratitude to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article.

Финансирование: автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding: the author received no financial support for the research, authorship and publication of this article.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов и не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

Conflict of interest: the author declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Глюзберг Б. Э., Королев В. В., Шишкина И. В. Модернизация стрелочных переводов на современной элементной базе // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта. 2019. № 15. С. 156–161. EDN: https://www.elibrary.ru/wuqbif.

Glyuzberg B. E., Korolev V. V., Shishkina I. V. Modernisation of switches on a modern element base. *Modern problems of improving the operation of railway transport*. 2019;(15):156–161. (In Russ.). EDN: https://www.elibrary.ru/wuqbif.

2. Глюзберг Б. Э., Титаренко М. И., Трегубчак П. В. Обеспечение перевозочного процесса при нагрузках на стрелочные переводы, превышающих проектные и нормативные критерии // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2024, Т. 83, № 3. С. 205–214. EDN: https://elibrary.ru/pvmugq.

Glyuzberg B. E., Titarenko M. I., Tregubchak P. V. Ensuring transportation under turnout switches loads exceeding design and regulatory criteria. *Russian Railway Science Journal*. 2024;83(3):205–214. (In Russ.). EDN: https://elibrary.ru/pvmugq.

3. Глюзберг Б. Э., Титаренко М. И., Тимакова Е. А., Савченко А. А., Кузнецов С. В., Калачев А. М. Динамическое воздействие вагонов, имеющих колесные пары с тонкими гребнями, на стрелочные переводы // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. № 4. С. 202–208. EDN: https://www.elibrary.ru/aprxey.

Glyuzberg B. E., Titarenko M. I., Timakova E. A., Savchenko A. A., Kuznetsov S. V., Kalachev A. M. Dynamic effect on turnouts of cars having wheelsets with thin flanges. *Russian Railway Science Journal*. 2020;79(4):202–208. (In Russ.). EDN: https://www.elibrary.ru/aprxey.

4. Титаренко М. И., Глюзберг Б. Э., Трегубчак П. В., Кузнецов С. В. Стрелочные переводы типа Р65 марки 1/11 в условиях обращения поездов повышенной массы и длины // Путь и путевое хозяйство. 2024. № 12. С. 7–11.

Titarenko M. I., Glyuzberg B. E., Tregubchak P. V., Kuznetsov S. V. Switches of the P65 type of the 1/11 mark in the conditions of handling trains of increased weight and length. *Railway Track and Facilities*. 2024;(12):7–11. (In Russ.).

5. Craig Jr. R. R., Bampton M. C. C. Coupling of substructures for dynamic analysis. *AIAA Journal*. 1968;6(7):1313–1319. https://doi.org/10.2514/3.4741.

6. Sun Y. Q., Cole C., McClanachan M. The Calculation of Wheel Impact Force Due to the Interaction between Vehicle and a Turnout. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, *Part F*. 2010;224(5):391–403. https://doi.org/10.1243/09544097jrrt3.

7. Глюзберг Б. Э. Проектирование стрелочных переводов для высоких скоростей движения на ответвленное направление // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1993. № 8. С. 25–30.

Glyuzberg B. E. Design of switches for high speeds of movement in the branching direction. *Russian Railway Science Journal*. 1993;(8):25–30. (In Russ.).

8. Iwnik S. The Manchester Benchmarks for Rail Vehicle Simulation. CRC Press; 1999. 206 p.

9. Xinggao Shu and Davis D. High-Speed Rail Turnout Literature Review [Электронный ресурс]. URL: http://www.fra.dot.gov. (дата обращения: 11.02.2025).

10. Глюзберг Б. Э. Влияние нагрузок подвижного состава на сроки службы элементов стрелочных переводов // Современные способы совершенствования работы железнодорожного транспорта Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. М.: МГУПС; 2016. С. 157–158. EDN: https://www.elibrary.ru/ykpwxf.

Glyuzberg B. E. The influence of rolling stock loads on the service life of switch elements. In: *Modern ways to improve the operation of railway transport Modern problems of railway track design*, *construction and operation*: *Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference*. *Readings dedicated to the memory of Professor G. M. Shakhunyants*. Moscow: MSUPS; 2016. 157–158 p. EDN: https://www.elibrary.ru/ykpwxf.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Денис Сергеевич ЕРШОВ,
Главный конструктор, Муромский стрелочный завод (АО «МСЗ», 602262, Россия, Владимирская обл., г. Муром, ул. Стахановская, 22а), https://orcid.org/0009-0002-9491-2520

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Denis S. ERSHOV,
Chief Constructor, Murom Switch Plant (602262, Murom, 22a, Stakhanovskaya St.), https://orcid.org/0009-0002-9491-2520

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The author has read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 05.12.2024, рецензия от первого рецензента получена 13.12.2024, рецензия от второго рецензента получена 18.12.2024, рецензия от третьего рецензента получена 19.12.2024, принята к публикации 23.01.2025.

The article was submitted 05.12.2024, first review received 13.12.2024, second review received 18.12.2024, third review received 19.12.2024, accepted for publication 23.01.2025.