

**ОРГАНИЗАЦИЯ СОТРУДНИЧЕСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ  
(ОСЖД)**

I издание

Разработано совещанием экспертов Комиссии ОСЖД по  
инфраструктуре и подвижному составу  
с 23 по 25 апреля 2003 г. в г. Варшава

Утверждено совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и  
подвижному составу

Дата вступления в силу: 30 октября 2003 г.

**Р  
752/3**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ  
СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ**

# 1. РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПЕРЕВОДОВ И СЪЕЗДОВ ДЛЯ ВЫСОКИХ СКОРОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ НА ОТВЕТВЛЕННОЕ НАПРАВЛЕНИЕ

Подход к проектированию стрелочных кривых существенным образом отличается от подходов к проектированию обычных кривых, так как стрелочные кривые имеют особенности, связанные с высокими градиентами изменения кривизны в начале и конце перевода.

В этих условиях при скоростях свыше 50 км/час результаты воздействия в значительной степени определяются скоростью изменения действующих сил, которая характеризуется величинами производных от перемещения более высокого порядка, чем второй, оцениваемых величинами действующих ускорений.

## 1.1. Кинематические характеристики движения

Скорость нарастания ускорения –  $h$ -вектор равен

$$\vec{h} = \left( \frac{da_\tau}{dt} + v^3 q^2 \right) \vec{\tau} + \left( 3va_\tau q + v^3 \frac{dq}{dl} \right) \vec{n} + (v^3 c' q) \vec{b} . \quad (1)$$

продольная составляющая	поперечная составляющая	вертикаль- ная состав- ляющая
----------------------------	----------------------------	-------------------------------------

где  $v$ - модуль вектора скорости движения вдоль кривой;

$a_\tau$  модуль вектора касательного ускорения;

$\tau, n, b$  - направляющие векторы главной нормали, бинормали и касательной к кривой;

$q$  - кривизна кривой;

$c'$  - скручивающая кривизна кривой.

Из трех составляющих воздействия нас интересует составляющая, действующая в горизонтальном поперечном направлении, то есть

$$h = 3va_\tau q + v^3 \frac{dq}{dl} . \quad (2)$$

При постоянной скорости движения вдоль кривой  $a_\tau = 0$ , тогда, если рассматривать движение не точки, а экипажа с базой  $d$ , то при входе из прямой в кривую получим

$$\frac{\Delta q}{\Delta l} = \frac{1}{R} / d = \frac{1}{Rd}, \quad (3)$$

тогда с учетом (2) получим

$$h = \frac{v^3}{Rd}. \quad (4)$$

Величины действующих и нормируемых величин ускорений и  $h$ -векторов определяют выбор стрелочных кривых.

В практике проектирования стрелочных переводов для высоких скоростей движения могут использоваться две основные концепции.

### **1.2. Проектирование стрелочных кривых исходя из нормирования некомпенсированного ускорения**

При движении по кривым возникает центробежное ускорение, зависящее от скорости и радиуса кривой. Для компенсации его в кривых устраивается возвышение наружного рельса. В стрелочной кривой возвышение не устраивается, поэтому некомпенсированная часть ускорения может выражаться в виде недостатка возвышения.

Величину радиуса, исходя из допустимой величины недостатка возвышения, можно определить из выражения

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

где  $v_{\max}$  - максимальная скорость движения;  
 $H$  - допустимая величина недостатка возвышения.

Конструкция таких стрелочных кривых следующая.

Вход на стрелочную кривую, в пределах зоны набегания колес на острьяк, выполняется постоянным радиусом, определяемым по формуле (5). Начальный стрелочный угол и угол удара колес в криволинейный острьяк определяется исходя из нормируемых величин потери кинетической энергии и внезапно появляющегося ускорения по обычным методикам. Радиус  $R$  является минимальным. За пределами зоны набегания колес на

криволинейный остряк радиус стрелочной кривой плавно увеличивается до величины  $R = \infty$  в середине съезда. Прямая вставка не устраивается. Отвод, как правило, производится с изменением кривизны по кубической параболе или клотоиде. Интенсивность отвода эквивалента интенсивности отвода возвышения наружного рельса. Исходя из допустимой величины этого показателя, длина отвода определяется по формуле:

$$L = H v_{\max} / (\Delta i / \Delta t). \quad (6)$$

## **1.2. Проектирование стрелочных кривых, исходя из анализа изменения кинематических параметров движущегося экипажа**

При высоких скоростях движения динамические параметры взаимодействия пути и экипажа пропорциональны второй и третьей производным вектора перемещения. Поэтому в стрелочных кривых, характеризующихся высокими градиентами изменения кривизны, рассматриваемые ранее расчетные формулы и предельные значения не пригодны.

При исследовании кинематики движения со скоростями более 50 км/ч,  $\vec{h}$  - вектор является определяющим (для стрелочных переводов).

Если считать заданную в естественных координатах скорость движения (вдоль кривой) постоянной, и не рассматривать касательную составляющую  $h$ -вектора, то для расчетов движения следует применять формулы (2) – (4).

В принципе эти соотношения позволяют проектировать кривизну стрелочной кривой по нормируемой величине модуля  $\vec{h}$  -вектора, но соотношение (2) соответствует движению по стрелочной кривой точечного экипажа. Поэтому при практическом определении параметров, нужно исходить из того, что элементом, воспринимающим закругления пути, является база экипажа.

Формула (4) дает возможность определить начальный радиус острьяков и совместно с (2) произвести подбор стрелочной кривой. Однако, анализ практических реализаций этой методики показывает, что она обладает рядом недостатков, которые целесообразно учесть при детальной отработке метода проектирования.

Так, при практическом анализе входа на стрелку, в расчет наибольшего допустимого угла удара вводятся следующие допущения

$$k \approx \frac{\tau}{d}, \quad \frac{dk}{dl} \approx \frac{\Delta k}{\Delta l} \approx \frac{\tau}{d^2}, \quad (7)$$

где  $\tau$  - угол удара в остряк.

В результате соотношение (2) приобретает вид

$$h \approx v^3 \frac{\tau}{d^2}. \quad (8)$$

Из этого соотношения находится наибольший допустимый угол удара в остряк.

Фактическое движение экипажа зависит еще и от силового взаимодействия с путем и соседними по поезду экипажами, поэтому необходимо иметь систему требований, лимитирующих геометрию острьяков в зоне, предшествующей входу базы экипажа на стрелочную кривую.

В связи с этим, целесообразно при проектировании острьяков для скоростных переводов и съездов использовать принятое в России нормирование величин внезапно появляющегося ускорения от набегания колеса на остряк, дополнив этими показателями критерии проектирования по  $h$  - вектору. Это позволит контролировать геометрию острьяка на участке от острья до сечения 30 мм.

Имеет смысл использовать также контроль средней скорости нарастания ускорения на участке входа базы экипажа в стрелочную кривую.

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

- остряки с постоянной или скачкообразной изменяющейся кривизной, однорадиусные, двухрадиусные;
- клотоидные - с увеличением кривизны, с уменьшением кривизны;
- комбинированные;
- остряки в виде комбинации клотоиды и круговой кривой с увеличением кривизны, или с уменьшением кривизны;
- остряки с косинусоидальным изменением кривизны с нулевой начальной кривизной, или с ненулевой начальной кривизной.

Каждый из названных видов острьяков может быть выполнен по касательной или секущей схеме. Кроме того, для каждого вида возможны

различные подвиды, связанные с оформлением практического остря остряка.

Выполнение динамико-кинематических требований можно обеспечить применением практически всех названных схем, поэтому в процессе проектирования стрелочного съезда должны быть рассмотрены и сопоставлены конструктивные решения всех этих видов.

Наилучшим вариантом является тот, который при выполнении всех условий обеспечивает минимальные длину и стоимость съезда.

Рассмотрим проектирование стрелочной кривой для перевода и для съезда, обеспечивающих движение на ответвленное направление со скоростями 120 км/ч.

Часть критериев может рассматриваться как ограничения, по остальным имеется возможность получения различных решений, каждое из которых может быть в принципе реализовано. Поэтому поиск наилучшего решения относится к классу оптимизационных задач. В первую очередь это относится к острякам.

Общая математическая формулировка оптимизационной задачи, пригодная для всех вариантов, имеет вид

$$\begin{aligned} \min \{L_0(k,n), L_c(k,n)\}, \\ \left| \frac{dv}{dt} \right|_b \leq a_b, \\ \left| \frac{dv}{dt} \right|_r = a_y, \\ \left| \frac{d^2v}{dt^2} \right|_k \leq h, \\ \left| \frac{d^2v}{dt^2} \right|_d \leq \psi, \end{aligned} \quad (9)$$

где:  $L_0$  - длина остряка;  $L_c$  - длина его строжки;  $n$  - засечка (для остряков секущего типа);  $a_b$  - предельное значение внезапно появляющегося ускорения;  $a_n$  - предельное значение установившегося ускорения для вариантов, имеющих участки постоянной кривизны, или наибольшее ускорение для кривой переменной кривизны;  $\psi$  - нормируемая скорость нарастания ускорения на участке входа на стрелочную кривую.

Для скоростных стрелочных переводов, со скоростью движения на ответвленный путь более 100 км/ч, задача проектирования остряков облегчается тем, что вход экипажа на стрелочную кривую полностью происходит в пределах остряка. Поэтому проектирование стрелочной кривой на остряке можно производить отдельно.

Выбор величин предельных значений ограничений определяет качество технического решения В связи с этим критерии и параметры, определяющие ограничения, следует выбирать опираясь на опыт проектирования.

Наибольшая величина скорости нарастания ускорения для конструкций при скорости движения 120 - 130 км/ч составляет 0,85-1,24 м/с<sup>3</sup>.

Такой величиной рекомендуется ограничивать скорость нарастания ускорения в начале и в конце коллоидных участков стрелочной кривой и на участке входа экипажа в стрелочную кривую.

Скорость нарастания ускорения в стрелочной кривой рекомендуется принимать для различных кривых от 0,25 м/с<sup>3</sup> до 0,40 м/с<sup>3</sup>. Если использовать приведенные выше величины ограничений, то решение задачи (9) дает результаты, представленные в табл.1.

Наилучшими из технических решений, представленных в таблице являются варианты 5 и 6.

Стрелочная кривая за корнем остряка продолжает собой кривую в пределах остряка. Ее параметры определяются значением нормируемой скорости нарастания ускорения и предельным значением установившегося ускорения. После достижения предельного значения ускорения (установившегося) кривая имеет участок постоянной кривизны (он может отсутствовать). Прилегающие к нему участки имеют переменную кривизну, зависящую, как уже указывалось, от скорости нарастания ускорения. Затем следует участок кривой, обеспечивающий симметричные, или не хуже, условия входа в кривую, чем на стрелке. После этого в пределах полусъезда располагается прямая вставка (ее также может не быть), сопрягающая смежные стрелочные переводы съезда.

Длина прямой вставки принимается, как функция от скорости движения

$$\min L_{bc} = m v \quad (10)$$

Коэффициент  $m$  в зависимости от скорости и стесненности условий движения колеблется в пределах 0,05 - 0,40 м (км/ч)<sup>-1</sup>.

Величина  $L_{bc}$  может ограничиваться снизу условиями минимальной длины рельсового элемента или иными условиями. Однако имеются практически реализованные схемы съездов без прямых вставок. Это съезды клотоидного типа с примыкающими к друг другу в центре съезда точки с нулевой кривизной.

Поскольку возможны различные комбинации сочетаний участков составляющих съезд, то задача проектирования стрелочной кривой вне остряка также представляет собой оптимизационную задачу. Ее математическая формулировка выглядит следующим образом

$$\begin{aligned} \min \sum_j L, \\ \alpha_i(v, \frac{dv}{dt}, \frac{d^2v}{dt^2}) \leq [\alpha]_i, i = 1, \dots, 4 \\ L_{bc} \geq \min L_{bc} \\ L_k \geq \frac{a_y - a_b}{n}, \end{aligned} \quad (11)$$

где:  $\sum L$  - длина съезда;  
 $L_{bc}$  - длина прямой вставки;  
 $L_k$  - длина клотоидного участка;  
 $\alpha_i$  - динамико-кинематические критерии;  
 $(a_y - a_b)$  - приращение ускорений на участке кривой переменной кривизны.

### 1. 3. Сопоставление методик и окончательный выбор концепции проектирования

Для решения вопроса выбора концепции проектирования выполняются сравнительные расчеты стрелочных кривых и съездов по концепции нескомпенсированного ускорения и по концепции  $h$ - вектора для требуемой скорости движения на ответвленное направление.

В качестве примера, результаты расчетов для скорости движения на ответвленное направление 120 км/ч и ширине междупутья 4,5 м представлены в табл.2.

Как видно из данных, приведенных в табл. 2, предпочтительным является проект, исходящий из концепции нормирования  $h$  - вектора. Стрелочные съезды и переводы, спроектированные по данной методике, имеют лучшие динамико-кинематические показатели и значительно экономичнее, чем полученные исходя из концепции нескомпенсированного ускорения. Длина съезда, спроектированного по концепции нормирования  $h$  - вектора на 48 м короче, чем по концепции нескомпенсированного ускорения. Недостатком является то, что длина остряка у этого проекта несколько

больше (на 1,2 м), однако, это компенсируется значительной разницей угла крестовины (марка 1/22 вместо 1/34), что уменьшает ее длину, значительно упрощает конструкцию гибкого подвижного сердечника и крестовины в целом.

Важным фактором является также то, что наибольшее воздействие на пассажира возникает не сразу в момент входа экипажа на стрелку, а постепенно нарастает по мере движения к середине стрелочной кривой.

Здесь следует отметить, что недостатком данного варианта является относительно малое время между возникновением максимумов двух разнонаправленных воздействий (в 2 раза меньше, чем у варианта спроектированного, исходя из концепции нескомпенсированного ускорения). Тем не менее этот параметр не превышает аналогичный для стрелочных переводов и съездов, применяемых на дорогах большинства стран Европы для скоростей до 160 км/ч на ответвленное направление.

В целом анализ данных табл. 2 говорит о безусловном преимуществе концепции проектирования, опирающейся на нормирование кинематических параметров до третьего порядка от вектора перемещения.

Таблица 1

## Сравнительные данные по вариантам острияков

№№ пп	Схема остряка	Радиус (м)		Наиболь- ший угол удара в остряк (рад)	Внезапно появля- ющееся ускорение (м/с <sup>2</sup> )	Скорость нарастания ускорения (м/с <sup>3</sup> )		Длина (м)	
		в начале кривой	в конце остряка			на входе в кри- вую	в кри- вой	стро- жки ост- ряка	ост- ряка
1.	Касательный, $R_{bx}=\text{const}$ , Клотоида от сеч.30 мм, подстрожка острия касательная к сеч. 5 мм	3000	1982	0,0044	0,37	0,67	0,40	17,4	26,5
2.	То же, с началом клотоиды в сеч. 5 мм	3300	1804	0,0045	0,34-0,43	0,69	0,40	17,4	26,1
3.	То же, с началом клотоиды в теоретическом острии	3300	1883	0,0047	0,34-0,46	0,74	0,30	16,7	25,3
4.	Секущий, засечка $n=3$ мм $R_{bx}=\text{const}$ , клотоида от сеч. 30 мм	3000	1993	0,0047	0,37	0,85	0,40	16,3	25,4
5	То же, с подстрожкой касательной к сеч. 5 мм	3000	1993	0,0047	0,37	0,85	0,40	15,8	24,8
6.	То же, клотоида от сеч. 25 мм	3000	1953	0,0047	0,37-0,38	0,86	0,40	15,7	24,7

Таблица 2

**Показатели по вариантам скоростного съезда  
(междупутье 4,5 м V= 120 км/ч)**

№.№ пп	Показатель	Ед. изме- рения	Концепция нескомпенсирован- ного ускорения	Концепция $\frac{1}{h}$ - вектора
1	2	3	4	5
1.	Теоретическая длина съезда	м	220	172
2.	Длина остряка	м	19,8	21
3.	Место возникновения наибольшего бокового ускорения	-	Вход на стрелку	Середина переводной кривой
4.	Показатель потери кинетической энергии	м/с	0,266	0,225
5.	Угол удара в остряк	рад	0,0067	0,0067
6.	Марка съезда	-	1/34	1/22
7.	Сочетание переводов в съезде	-	Прямая вставка отсутствует	Прямая вставка 26,5 м
8.	Внезапно появляющееся ускорение при входе на стрелку	м/с <sup>2</sup>	0,51	0,40
9.	Радиус входа на стрелку	м	2200	2800
10.	Минимальный радиус	м	2200	1600

## **ПРИМЕР РАСЧЕТА СКОРОСТНОГО СЪЕЗДА И ПЕРЕВОДА**

Для детального конструирования элементов стрелочного перевода необходимы подробные данные по геометрии нитей стрелочных переводов в пределах всего съезда.

### **1. Исходные данные**

Исходными данными для расчета являются результаты оптимизации общей геометрии съезда, выполненные по методике, изложенной в разделе 1.

1. Ширина междупутья - 4,2 м.
2. Скорость по ответвлению - 120 км/ч.
3. Внезапно-появляющееся ускорение -  $0,397 \text{ м/с}^2$ ,
4. Скорость нарастания ускорения в клотоиде -  $0,4 \text{ м/с}^3$ .
5. Наибольшее ускорение -  $0,695 \text{ м/с}^2$ ,
6. Показатель потери кинетической энергии -  $0,223 \text{ м/с}$ ,
7. Наибольший расчетный зазор колеса в колее - 30 мм.
8. Сечение перехода к подстрожке острия - 5 мм.
9. Угол подстрожки острия -  $0,0067 \text{ рад.}$ ,
10. Шаг интегрирования - не более 0,5 м.

### **2. Реализация расчетных методик, результаты расчетов**

Описанные выше методики и алгоритмы были реализованы в виде программы для ЭВМ.

Пакет программ управляется оператором в диалоговом режиме, выбор варианта расчета (общая геометрия упорной нити, общая геометрия съезда, подробный расчет, расчет с учетом укладки на железобетонные брусья и т.д.) производится автоматически в процессе задания исходных данных.

Предусмотрены режимы работы:

- автоматическая оптимизация,
- последовательная оптимизация,
- расчет по заданным условиям без оптимизации (подбор решения непосредственно оператором).

По данной программе были проведены расчеты для междупутья 4,2 м и скорости движения на ответвление 120 км/ч. В результате были получены следующие основные геометрические параметры съезда



Параллельно с измерениями в пути проводились измерения динамико-кинематических характеристик в подвижном составе. Исследовалась динамика обыкновенного и специального скоростного вагонов.

Для обоих типов подвижного состава наибольшие горизонтальные поперечные ускорения возникали в кузове вагона над тележкой. Их уровень при скорости 120 км/ч не превышал  $0,92 \text{ м/с}^2$ , что ниже нормативного значения –  $0,12g$ .

Другие показатели динамики взаимодействия пути и подвижного состава также не превышали допустимых величин.

Таким образом, результаты испытаний полностью подтвердили правильность выбора концепции проектирования скоростных переводов и съездов, метод расчета геометрии перевода и правильность выбора конструктивных решений при разработке конструкторской документации.