

К вопросу о допустимости совмещения кривых в вертикальной плоскости с переходными кривыми в плане при проектировании ВСМ



Г. Л. Аккерман,
д.т.н., действительный
член РАН, профессор
кафедры «Путь и железно-
дорожное строительство»
Уральского государствен-
ного университета путей
сообщения (УрГУПС)



С. Г. Аккерман,
к.т.н., зав. кафедрой
«Путь и железнодорожное
строительство» УрГУПС



А. В. Замуховский,
к.т.н., доцент кафедры
«Путь и путевое хозяйст-
во» Российского универ-
ситета транспорта
(МИИТ)



В. А. Копыленко,
к.т.н., профессор
кафедры «Проектирование
и строительство желез-
ных дорог» РУТ (МИИТ)

В настоящее время правовая база запрещает совмещение переходных кривых в плане и вертикальных кривых в профиле при строительстве железнодорожных линий. Однако данное нормативное положение весьма усложняет проектирование высокоскоростных магистралей (ВСМ). Поэтому представляется целесообразным привести некоторые аргументы в пользу снятия существующего запрета.

Участие авторов в разработке нормативных документов (Специальных технических условий) для проектирования высокоскоростных магистралей Москва — Казань — Екатеринбург (ВСМ 2) и Москва — Ростов-на-Дону — Адлер (ВСМ Центр — Юг), а затем и в экспертизе проектных решений пилотного участка ВСМ Москва — Владимир привело к появлению вопроса, почему в нормативных документах содержится требование о недопустимости совпадения вертикальных кривых с переходными кривыми в плане при проектировании трассы железнодорожных линий.

Если скорость движения не превышает 100 км/ч, длины вертикальных кривых и переходных кривых в плане редко превышают 150–200 м. В этом случае требование об их несовпадении не приводит к большим сложностям при проектировании.

Однако с повышением скорости, особенно свыше 200 км/ч, значения длин кривых существенно увеличиваются и приближаются к километровым величинам, что создает трудности при прокладке трассы и приводит к значительному увеличению объемов земляных работ и искусственных сооружений (в основном, эстакад).

Проектируя продольный профиль ВСМ 2, смежные элементы профиля при алгебраической разности уклонов Δi , равной или превышающей 0,5 %, со-

прягают круговой кривой в вертикальной плоскости радиусом

$$R_B = \frac{v_{ac}^2 \max}{a_B \cdot 3,6^2}, \text{ м} \quad (1)$$

где $v_{ac} \max$ — максимальная скорость высокоскоростного поезда в данной кривой, км/ч; a_B — наибольшая допускаемая величина вертикального ускорения в данной кривой, равная согласно СТУ «Проектирование участка Москва — Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва — Екатеринбург со скоростями движения до 400 км/ч» [1]: на выпуклых переломах профиля 0,3 м/с²; на вогнутых — 0,4 м/с².

Согласно требованию СТУ [1] эта вертикальная кривая не должна совмещаться (совпадать) с переходной кривой в плане. Однако соблюдение указанного требования приводит к необходимости размещать переломы профиля реже, что увеличивает значения длин элементов продольного профиля и, как следствие, объемы строительных работ.

Другой способ обеспечить требования СТУ [1] — уменьшить длину вертикальной кривой K_B , которая прямо пропорциональна ее радиусу R_B и принятой величине Δi . Уменьшать R_B крайне нежелательно, так как согласно (1) это приведет к ограничению максимально допустимой скорости поезда на рассматриваемом участке пути, поскольку она зависит от радиусов кривых в плане. Следовательно, другой «рычаг» воздействия на длину вертикальной кривой, имеющийся в распоряжении проектировщика, — варьировать величиной Δi .

В результате уменьшения Δi нередко можно добиться существенного укорочения вертикальной кривой, обеспечив соблюдение требования СТУ [1]. Однако возможность уменьшения величины Δi обеспечивается снижением абсолютных значений уклонов сопрягаемых элементов продольного профиля, что приводит к увеличению объемов работ.

В проекте строительства ВСМ 2 на участке от Москвы (км 23-й) до Владимира (км 195-й), разработанном ОАО «Мосгипротранс», переломы продольного профиля размещали сравнительно редко, что послужило причиной завышенных значений длины элементов профиля, а величину Δi часто уменьшали, что приводило к недоиспользованию максимально возможного для данной линии уклона $i_{max} = 24\%$. Нам представляется, что это привело к существенному увеличению объемов и стоимости строительных работ, прежде всего в пределах протяженных эстакад и на подходах к ним.

Отмеченные положения позволяют говорить о возможности достижения значительного экономического эффекта, если разрешить совмещение вертикальных кривых с переходными кривыми в плане. Ранее «табу» на такое совмещение связано главным образом с тем, что путейцы не могли точно отследить пространственное положение оси пути на участке совпадения вертикальной и переходной кривой в плане линии. Это осложняло работы по выправке пути в процессе эксплуатации железной дороги. Однако сегодня задача непрерывного описания геометрии рельсовой колеи практически решена: современной измерительной техникой оборудованы путеизмерительные вагоны, путевые машины, строительная техника.

Между тем возможность решения поставленной задачи связана не только с техническими ограничениями. До сих пор не разработано строгое техническое обоснование, согласно которому были бы установлены численные критерии и ограничения возможности или недопустимости совмещения вертикальной и переходной кривых.

Высказанные соображения приводят к целесообразности рассмотреть вопрос о возможности уменьшения объемов строительных работ и стоимости строительства ВСМ 2 вследствие более тщательного проектирования продольного профиля дороги при неизменном

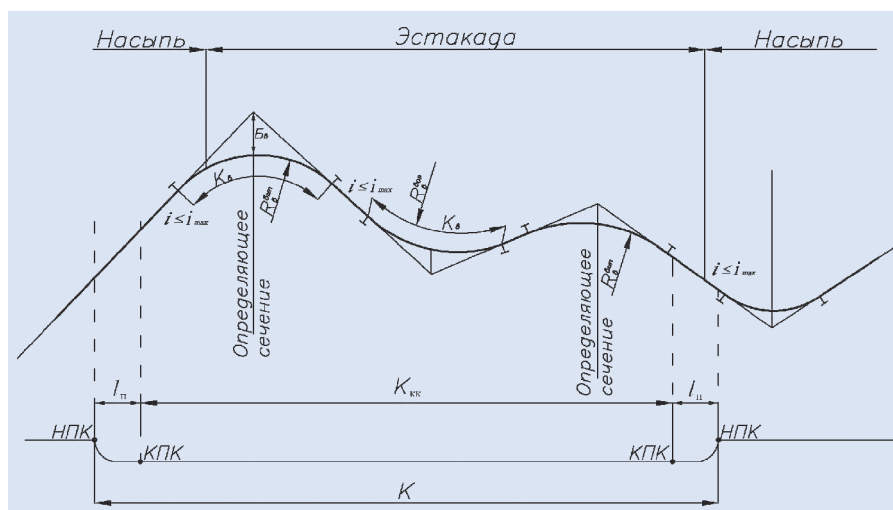


Рис. 1. Рациональное очертание продольного профиля пути в пределах эстакады и на подходах к ней

плане ее трассы. В качестве примера рассмотрены проектные решения по плану и продольному профилю трассы ВСМ 2, принятые в «проекте» на участке км 33-й — км 38-й. В плане здесь размещены две смежные кривые, каждая радиусом 2500 м. Длина прямой вставки между начальными точками переходных кривых — 404 м. Принятые параметры плана трассы ограничивают максимально допустимую скорость пассажирских поездов $v_{вс max}$ на уровне 250 км/ч. На указанном участке запроектирована эстакада протяженностью 2278 м, размещенная в плане на обеих указанных кривых. Продольный профиль пути в пределах эстакады запроектирован одним элементом с уклоном 0,4 ‰.

Максимальные отметки продольного профиля на эстакаде в большинстве случаев определяют одно или несколько сечений, в которых проектируемая трасса ВСМ пересекает существующие, а иногда и планируемые в перспективе железные и автомобильные дороги. В указанных сечениях минимально потребная высота эстакады, а значит, и отметка проектируемой линии продольного профиля зависят от требуемой высоты подмостового габарита и строительной высоты пролетного строения. Когда на рассматриваемом участке магистральной в процессе проектирования продольного профиля установлена целесообразность устройства протяженной эстакады, а характерных сечений, определяющих минимально допустимую высоту эстакады, два и более, причем расположены они друг от друга на значительном расстоянии (не менее 1,5 км), следует проверить возможность размещения в пределах эстакады не-

скольких переломов профиля, точнее вертикальных кривых, обеспечивающих уменьшение значений высоты между указанными сечениями (рис. 1).

С учетом сформулированного предложения на указанном участке ВСМ 2 в порядке альтернативы проектному решению ОАО «Мосгипротранс» запроектированы четыре варианта очертания продольного профиля пути при неизменном плане трассы [2]. Главная особенность этих вариантов заключается в устройстве вместо одной протяженной эстакады двух эстакад, отделенных друг от друга насыпью, средняя высота которой существенно меньше средней высоты эстакады в Проекте. Каждая из указанных эстакад запроектирована в двух вариантах, отличающихся расположением, средней высотой и длиной. В продольном профиле значительные по длине участки эстакад размещены на вертикальных кривых. При этом суммарная протяженность двух эстакад в любом из вариантов оказалась меньше, чем длина эстакады в Проекте.

Вертикальные кривые, размещенные в пределах первой эстакады и на участках земляного полотна, нигде не совмещены с переходными кривыми в плане трассы, что полностью соответствует требованию СТУ [1]. Для выполнения этого условия на второй эстакаде потребовалось увеличить ее высоту и сдвинуть вправо ее конец, что увеличило длину эстакады. Для того чтобы выпуклая кривая на второй эстакаде полностью разместилась в пределах прямой вставки между начальными точками смежных переходных кривых в плане, потребовалось применить на данном переломе профиля сравни-

тельно небольшую величину $\Delta i = 23\%$ ($\Delta i_{\max} = 48\%$). В результате значительно увеличилась высота и длина подходной насыпи по сравнению с вариантом в Проекте..

Еще один вариант очертания продольного профиля — альтернатива предыдущему — затрагивает только вторую эстакаду и насыпь подхода к ней справа. При частичном нарушении требования СТУ [1] — левая треть выпуклой вертикальной кривой в пределах 155 м совмещена с первой половиной второй переходной кривой в плане — оказалось возможным значительно снизить объемы строительных работ на эстакаде, уменьшив ее высоту и протяженность, и в пределах подходной к ней насыпи с правой стороны.

Указанные варианты эстакад вошли в разных комбинациях в намеченные варианты очертания продольного профиля пути на рассматриваемом участке магистрали [2]. Максимальное сокращение длины эстакад (более чем в 2 раза) относится к случаю, когда левая треть вертикальной кривой, на которой размещена вторая эстакада, совмещена с первой половиной 2-й переходной кривой в плане трассы, т. е. частично нарушено требование СТУ [1]. Однако именно этот вариант обеспечивает наибольший экономический эффект на указанном участке ВСМ 2: сокращение строительной стоимости эстакад, земляного полотна и водопропускных сооружений достигает 1086 млн руб. (33,8%).

Рассмотрим другой подход к проектированию переходных и вертикальных кривых.

Как известно, к переходным кривым предъявляют ряд требований, важнейшие из них — условия плавного изменения кривизны (радиуса) и отвода возвышения [3]. У переходных кривых в настоящее время эти параметры изменяются пропорционально длине.

В качестве переходных кривых могут использоваться: кубическая парабола, клотоида (радиоидальная спираль), парабола четвертой степени, мажоритарная, минорантная кривые и т. д. [4, 5]. В [6] указана возможность использовать кубические гладкоспряженные сплайн-кривые. В практике проектирования железных дорог применяют, как правило, кубическую парабола и клотоиду, поскольку нормирование параметров остальных кривых затруднено.

Как отмечалось раньше, СТУ [1] не

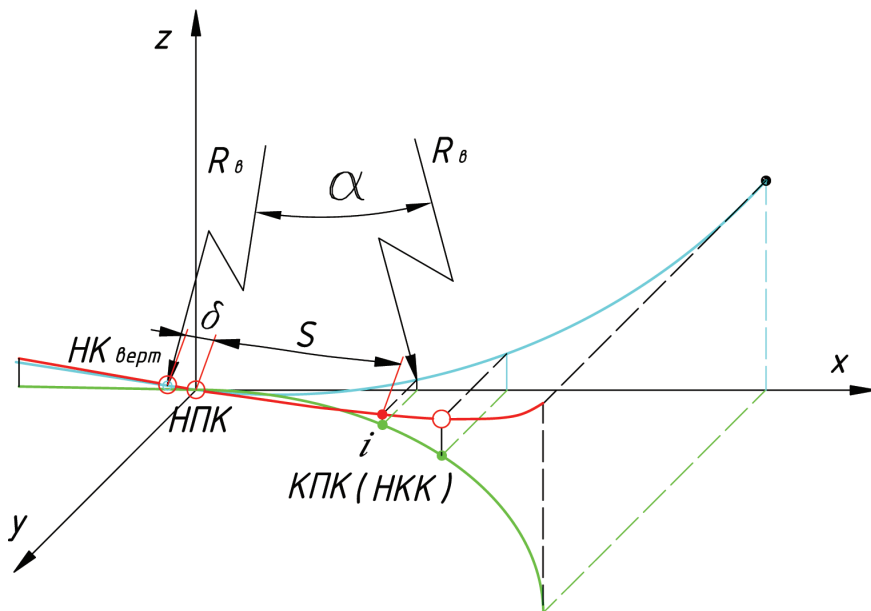


Рис. 2. Взаиморасположение в трёхмерном пространстве вертикальной кривой с переходной и круговой кривыми в плане

разрешают совпадения переходной кривой в плане с вертикальной кривой. Однако современные геотехнологии позволяют избежать этих трудностей [7].

Если в качестве переходной кривой исследовать кубическую параболу, а начало координат поместить в точку начала переходной кривой, совпадающую с круговой кривой в вертикальной плоскости, то параметрические уравнения полученной пространственной кривой будут иметь вид

$$\begin{cases} y = \frac{S^3}{6Rl}; & (2) \\ x = S; & (3) \\ z = R_B(1 - \cos(\frac{S \pm \delta}{R_B})). & (4) \end{cases}$$

Здесь $x; y; z$ — координаты точки пространственной кривой соответственно по оси пути, в горизонтальной и вертикальной плоскости.

В системе уравнений (2) – (4) S — расстояние от начала переходной кривой до рассматриваемой точки (текущая «линейная координата»), $0 \leq S \leq l$; l — длина переходной кривой; R — радиус круговой кривой в плане; R_B — радиус вертикальной кривой; δ — расстояние от начала переходной кривой до начала кривой в вертикальной плоскости (рис. 2).

Если точка начала вертикальной кривой ($HK_{\text{верт}}$) расположена до начала переходной кривой (НПК), то принимают δ со знаком «плюс», если после — со знаком «минус».

Уравнение (2) — это уравнение кубической параболы.

Уравнение (3) получено на основании того, что длина дуги S практически

совпадает с координатой x . У клотоиды кривизна пропорциональна длине дуги.

Уравнение (4) получено из следующего условия:

$$z_i = R_B(1 - \cos \alpha). \quad (5)$$

Угол равен отношению длины дуги к радиусу, т. е. $\alpha = \frac{S \pm \delta}{R_B}$.

Уравнение (5) можно упростить, приравняв z_i к длине эвольвенты в этой же точке: i .

$$z_i = \frac{(S \pm \delta)^2}{2R_B}. \quad (6)$$

Из расчетов следует, что при максимально допустимой величине перелома профиля $\Delta i = 48\%$ результаты, полученные по (4) и (6), совпадают с точностью до 1 см. Следовательно, в пределах переходной кривой при совпадении ее с круговой кривой в вертикальной плоскости параметрически пространственная кривая может быть описана следующими уравнениями:

$$\begin{cases} y = \frac{S^3}{6Rl}; \\ x = S; \\ z = \frac{(S \pm \delta)^2}{2R_B}. \end{cases} \quad (7)$$

Третье уравнение в системе (7) справедливо, если

$$(S \pm \delta) \leq 0,001R_B \Delta i, \quad (8)$$

где Δi — величина перелома профиля, %.

Это означает, что вертикальная круговая кривая не заканчивается в пределах переходной кривой.

$x, \text{ м}$	50	100	200	300	350
$\Delta S, \text{ м}$	0,002	0,016	0,13	0,14	0,68
$y = f(S)$	–	–	0,38	1,29	2,05
$y = f(x)$	–	–	0,38	1,29	2,04

Например, максимальная величина правой части уравнения (8) при $\Delta i = 48 \text{ ‰}$ и $R_B = 20\,000 \text{ м}$ равняется 960 м .

В системе (7) принято допущение, что $x = S$.

На основании расчетов установлено, что чем больше l и R и меньше x , тем незначительнее отличается S от x . В таблице приведены соответствующие значения $y = f(S)$ и $y = f(x)$ при $R = 10\,000$ и $l = 350 \text{ м}$:

Из приведенных данных видно, что максимальное расхождение между S и x составляет $0,68 \text{ м}$, при этом величины $y = f(S)$ и $y = f(x)$ практически равны (при $x = 350 \text{ м}$ – $2,05$ и $2,04 \text{ м}$, соответственно). Таким образом, можно считать, что замена x на S практически не влияет на точность расчета системы уравнений (7). Расчет и разбивка пространственной кривой согласно системе (7) не вызывают затруднений.

Динамика экипажа при прохождении криволинейного участка пути в значительной степени зависит от величины поперечного непогашенного ускорения a_n принятой $a_n \leq 0,6 \text{ м/с}^2$.

При движении поезда по пространственной кривой (кривизна совпадает в профиле и плане) следует учитывать результирующее ускорение

$$a = \sqrt{a_B^2 + a_n^2 + a_{\text{прод}}^2}, \quad (9)$$

где a_B , a_n , $a_{\text{прод}}$ – соответственно вертикальное, поперечное (непогашенное) и продольное ускорения, действующие на экипаж.

Вертикальное ускорение a_B , как правило, принимают не более $0,4 \text{ м/с}^2$, поперечное непогашенное ускорение a_n в [1] принято $0,6 \text{ м/с}^2$, продольное ускорение по условиям комфорта не должно превышать $1,2 \text{ м/с}^2$. Тогда результирующее ускорение составит $a \approx 1,35 \text{ м/с}^2$. Отметим, что на пассажирских самолетах допускается, чтобы на пассажира действовало ускорение $1,5\text{--}2,0g$, т. е. $14,7\text{--}19,6 \text{ м/с}^2$.

Физиологическое влияние ускорения на человека зависит от его направления, времени действия и частоты. Рассмотрим действие на человека непогашенного ускорения при движении экипажа в кривой, применив понятие импульс силы (P):

$$P = Ma_n t \quad (10)$$

где M – масса тела; a_n – ускорение; t – время действия ускорения a_n .

Установлено [8], что при проходе поездом одного километра со скоростью 400 км/ч и $a_n = 1,0 \text{ м/с}^2$ импульс силы меньше, чем импульс силы при скорости 200 км/ч и $a_n = 0,6 \text{ м/с}^2$ на том же отрезке пути, т. е. чем выше скорость, тем меньше импульс силы при проходе одного и того же расстояния.

Следует считать необоснованным требование СТУ [1] относительно ограничения минимальной длины круговой кривой в плане 200 м . При скорости 400 км/ч расстояние 200 м поезд пройдет за $1,8 \text{ с}$. Собственные колебания вагона поезда ВСМ составляют $1,2\text{--}1,3 \text{ Гц}$, за одно колебание при скорости 400 км/ч поезд пройдет 88 м , или при проходе 200 м колебания вагона продлятся $2,3$ периода. Как это влияет на динамику вагона, может показать компьютерное моделирование.

Результаты исследований на кафедре «Путь и железнодорожное строительство» УрГУПС [9–11] свидетельствуют, что если круговая кривая с переходными в плане заменяется клотоидами, то силовые воздействия уменьшаются (поперечные силы на 20 ‰ и более, продольные – на 15 ‰ , средние вертикальные – более чем на 40 ‰). В случае биклотоидного проектирования кривых в плане требование о минимальной длине круговой кривой становится ненужным.

В заключение подчеркнем следующее. При современном развитии техники и технологии следует допустить совпадение вертикальных кривых и переходных кривых в плане. Ограничение величины непогашенного поперечного ускорения $a_n = 0,6 \text{ м/с}^2$ может быть пересмотрено в большую сторону по результатам дальнейших исследований.

Требование СТУ [1] о минимальной длине «чистой» круговой кривой в плане длиной 200 м необоснованное. Сопряжение прямолинейных элементов в плане биклотоидами уменьшает силы взаимодействия в системе «колесо–рельс» до 40 ‰ , увеличивает плавность движения поезда, снижает энергоза-

траты на тягу, повышает стабильность пути.

Главный вопрос, поставленный в статье, о возможности совпадения вертикальных кривых и переходных в плане для последующего включения такого положения в нормативно-техническую литературу требует широкого обсуждения экспертным сообществом. Однако использование в проектной практике компьютерного моделирования поможет ответить на этот вопрос в каждом конкретном случае. Цифровые технологии, безусловно, должны внедряться в процессы создания железных дорог. ■

Литература

1. Специальные технические условия «Проектирование участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва–Екатеринбург со скоростями движения до 400 км/ч ».
2. Копыленко В. А. Технические предпосылки снижения стоимости строительства ВСМ // Транспорт РФ. 2017. № 4. С. 10–14.
3. Шахуняц Г. М. Железнодорожный путь. М.: Транспорт, 1987. 479 с.
4. Ельфимов Г. В. Теория переходных кривых. М.: Трансжелдор-издат, 1948.
5. Замахаев М. С. Переходные кривые на автомобильных дорогах. М.: Транспорт, 1965.
6. Электронный ресурс: Официальный сайт САПР CREDO, Минск. <https://credo-dialogue.ru/produkty.html> (дата обращения 08.10.2017).
7. Пуркин В. И. Основы автоматического проектирования автомобильных дорог: учеб. пособие. М.: Изд. Моск. автотодор. ин-та (Техн. ун-та), 2000. 141 с.
8. Аккерман Г. Л., Аккерман С. Г. Облик высокоскоростной железнодорожной магистрали // Вестн. Уральск. гос. ун-та путей сообщения. 2017. № 2. С. 46–56.
9. Аккерман Г. Л., Аккерман С. Г., Кравченко О. А. Биклотоидное проектирование криволинейных участков железной дороги. // Путь и путей. хоз-во. 2010. № 10. С. 28–30.
10. Аккерман Г. Л., Аккерман С. Г., Кравченко О. А. Метод снижения затрат на содержание криволинейных участков пути // Железнодорож. трансп. 2011. № 5. С. 41–42.
11. Исламов А. Р., Аккерман Г. Л. Патент на изобретение № 258770. Способ проектирования продольного профиля железнодорожного пути. М., 2016.