

ВЫБОР МИНИМАЛЬНОГО РАДИУСА КРИВЫХ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

У статті розглядаються зарубіжні норми проектування високошвидкісних залізниць і вплив мінімального радіуса кривої на вартісні показники траси. Даються рекомендації щодо застосування тих чи інших норм.

В статье рассматриваются зарубежные нормы проектирования высокоскоростных железных дорог и влияние минимального радиуса кривой на стоимостные показатели трассы. Даются рекомендации по применению тех или иных норм.

In article foreign norms of designing of high-speed railways and influence of the minimal radius of a curve on cost indexes of a line are examined. Recommendations on application of those or other norms are given.

Одним из элементов интеграции железных дорог Украины в европейскую транспортную систему является повышение скорости. Украина достаточно уверенно движется в этом направлении [1]. Осуществлен пуск двух «Столичных экспрессов» [2], исследуется возмож-

ность введения в Украине высокоскоростного движения [3].

Как известно, одним из важнейших параметров проектирования высокоскоростных трасс является минимальный радиус кривых. В разных странах применяются различные нормы (табл. 1) [4].

Таблица 1

Параметры	Страны и максимальные скорости, км/ч									
	Франция		Германия			Италия		Испания		Бельгия
	300	350	300	350	300	350	300	350	300	
Тип движения	Пасс.	Пасс.	Пасс.-груз.	Пасс.	Пасс.	Пасс.-груз.	Пасс.-груз.	Пасс.	Пасс.	Пасс.
Максимальная проектная скорость, км/ч	300	350	300	300	350	250–300	350	270	350	320
Максимальная реализованная скорость, км/ч	300	320	300	300	330	300	350	270	> 300	300
Минимальный радиус кривых для максимальной скорости, м	4 000	6 250	4 000	3 350	5 120	5 450	7 000	4 000	6 500	4 800

Поскольку сегодня Украина в вопросе высокоскоростного движения ориентируется на французский опыт, целесообразно рассмотреть именно его. По данным французских железных дорог (SNCF), для минимального радиуса кривых представлен достаточно широкий диапазон значений, зависящий как от условий рельефа, так и от максимальной скорости движения поездов (табл. 2).

Так, при росте максимальной скорости в 1,5 раза минимальный радиус увеличивается практически в два раза. Во-вторых, проектиро-

вание линии с каким-либо предельным значением максимальной скорости делает практически невозможным перевод этой линии на более высокую скорость в будущем. Это связано, прежде всего, с тем, что рекомендованный радиус для более низкой категории скоростей не допускается для более высокой скорости даже в трудных условиях.

Таким образом, выбор максимальной скорости движения и минимального радиуса кривых является чрезвычайно ответственной задачей. Он предопределяет работу данной линии на

длительный период, поскольку разработки составов с принудительным наклоном кузова для скоростей 300–350 км/ч находятся пока только в стадии идей.

Таблица 2

Минимальный радиус кривых, м	Максимальная скорость, км/ч		
	270	300	350
Рекомендованный	3 846	4 545	7 143
Допустимый	3 226	4 000	6 250
В трудных условиях	3 125	4 000	5 556

При вписывании в угол поворота α (рад) двух кривых радиусами R_1 и R_2 длина пути по участку с меньшим радиусом (первый вариант) оказывается больше (рис. 1).

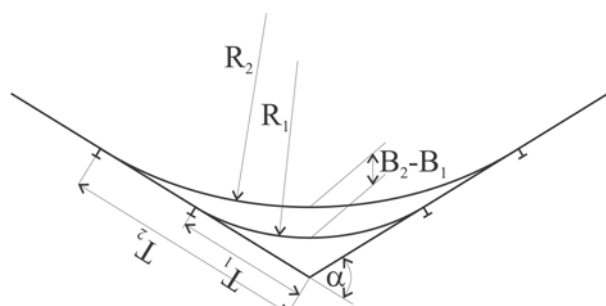


Рис. 1

Разность в длине пути L_1 и L_2 составит

$$\Delta L = (R_2 - R_1) \left(2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \alpha \right).$$

Поскольку для высокоскоростной линии доля затрат, пропорциональных длине линии, достаточно высока, имеет смысл оценить уменьшение этих затрат.

С использованием результатов исследований французских специалистов фирмы «СИСТРА» [3] были получены некоторые значения [5], которые позволяют в предварительных расчетах принять стоимость 1 км высокоскоростной линии в размере 5 млн евро, стоимость земляных работ и искусственных сооружений – в размере 2,64 млн евро на 1 км, расходы по эксплуатации линии – 280 тыс евро на 1 км в год. Если взять период сравнения вариантов 20–30 лет, то отношение k приведенных линейных затрат $a_{\text{лин}}$ к стоимости земляных работ и искусственных сооружений в средних условиях $a_{\text{зр-норм}}$ составит 5:2.

Стоимость земляных работ и искусственных сооружений при увеличении радиуса кривой, как правило, возрастает. Оценим, какое увели-

чение этой стоимости можно допустить при увеличении радиуса (дополнительные затраты на замедление и разгон в кривой меньшего радиуса не учитываются).

Если затраты по первому и второму вариантам равны, то мы имеем

$$L_1 a_{\text{лин}} + K_1^{\text{зр}} = L_2 a_{\text{лин}} + K_2^{\text{зр}},$$

где $K_1^{\text{зр}}$, $K_2^{\text{зр}}$ – затраты на земляные работы и искусственные сооружения по первому и второму вариантам соответственно.

Тогда допустимое увеличение стоимости земляных работ и искусственных сооружений ΔK в процентах составит

$$\begin{aligned} \Delta K &= \frac{100(K_2^{\text{зр}} - K_1^{\text{зр}})}{K_1^{\text{зр}}} = 100 \frac{a_{\text{лин}}(L_1 - L_2)}{a_{\text{зр-норм}} L_1} = \\ &= 100k \left(1 - \frac{L_2}{L_1} \right). \end{aligned}$$

Приведенные затраты составят:

– в первом варианте при радиусе R_1

$$K_1 = L_1 a_{\text{лин}} + L_1 a_{\text{зр-норм}};$$

– во втором варианте при радиусе R_2

$$K_2 = L_2 a_{\text{лин}} + L_2 \left(a_{\text{зр-норм}} + \frac{\Delta a \cdot a_{\text{зр-норм}}}{100} \right),$$

где Δa – увеличение в процентах стоимости 1 км земляных работ и искусственных сооружений за счет большего радиуса.

Приравняв K_1 и K_2 и выполнив некоторые преобразования, получим

$$\Delta a = 100(1+k) \left(\frac{L_1}{L_2} - 1 \right).$$

Выполнив расчеты при $R_2 = 6\,500$ м и $R_1 = 3\,000 \dots 6\,000$ м для кривых с различными значениями угла поворота α , получим следующий график (рис. 2).

Как видно из графика, применение большего радиуса кривой при больших углах поворота позволяет за счет сокращения длины трассы увеличить расходы на земляные работы и искусственные сооружения почти на 15%. При этом стоимость 1 км этих расходов может быть увеличена на 20%.

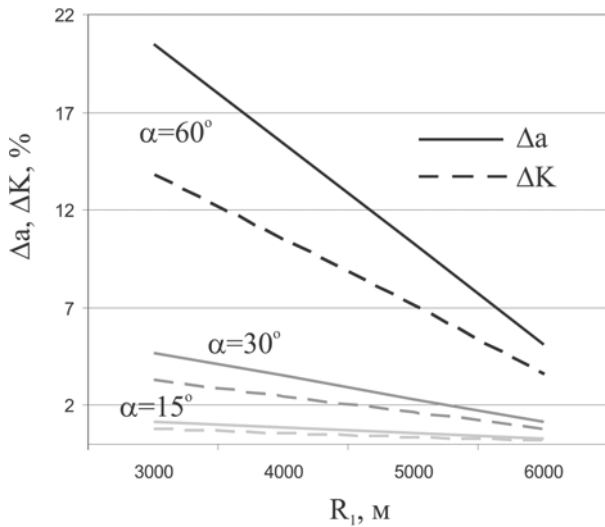


Рис. 2

При применении большего радиуса кривой трасса в средней части сдвигается на величину, равную разности биссектрис. Как показали расчеты, разность биссектрис $\Delta B = B_2 - B_1$ практически линейно зависит от Δa (рис. 3).

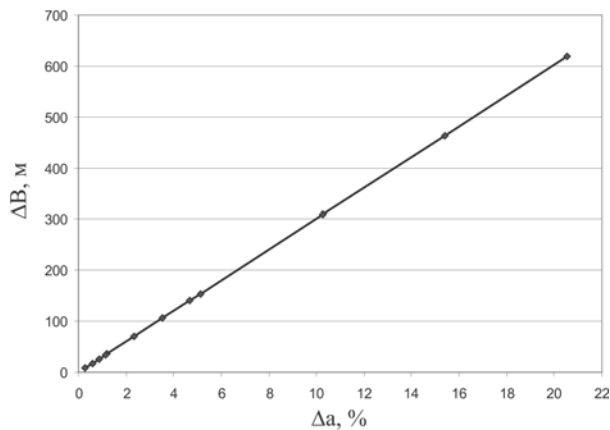


Рис. 3

Анализ этого графика показывает, что сдвигка средней части кривой может достигать значительных величин (600 м и более). Понятно, что в этом случае рельеф в районе трассы может существенно измениться.

Были сделаны расчеты для оценки изменения рабочей отметки земляного полотна, при котором приведенные затраты по вариантам с меньшим и большим радиусом будут приблизительно равны. Как и в предыдущем случае, данную зависимость удобно построить от величины Δa . Приняв

$$\Delta a = 100 \frac{S_2 - S_1}{S_1},$$

где S_1 и S_2 – площади поперечных сечений земляного полотна в первом и втором вариан-

тах соответственно, и выполнив преобразования, получим зависимость

$$\Delta a = 100 \left\{ \frac{\Delta h}{h_1} \left[1 + \frac{h_1}{b + nh_1} \left(1 + n \frac{\Delta h}{h_1} \right) \right] \right\},$$

где Δh – допустимое изменение рабочей отметки, м; h_1 – рабочая отметка в первом варианте, м; b – ширина основной площадки земляного полотна, м; n – крутизна откосов земляного полотна.

Решив получившееся квадратное уравнение, построим зависимость Δh от Δa (рис. 4).

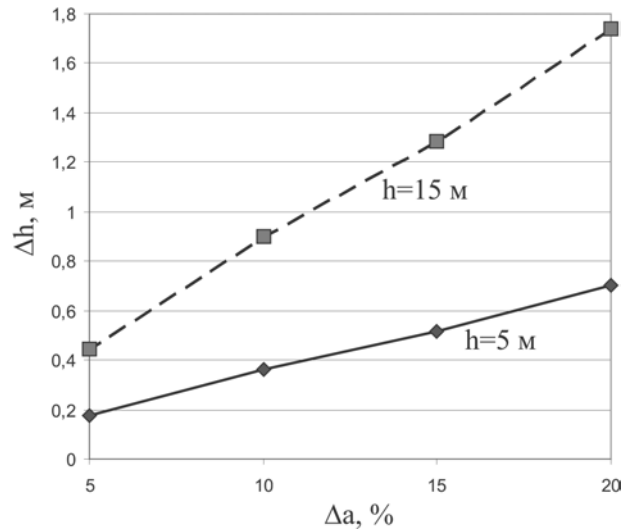


Рис. 4

Из рисунка следует, что даже при достаточно больших значениях Δa допустимое изменение рабочей отметки не достигает 2 м, и это при уходе трассы почти на 600 м в сторону.

Таким образом, расчеты показывают, что замена меньшего значения радиуса большим будет эффективна только в условиях относительно спокойного рельефа. В условиях сложного рельефа экономически оправданным будет переход на значения радиуса, допустимые в трудных условиях. А это, в свою очередь, сделает практически невозможным повышение скорости движения на таких участках в будущем.

Поэтому выбор максимальной скорости движения поездов на высокоскоростной линии и соответственно минимального радиуса кривой являются чрезвычайно ответственным шагом, от которого будет зависеть дальнейшая судьба данной линии на протяжении десятков, а то и сотен лет.

В приведенном исследовании не рассматривались варианты прохождения трассы в тоннелях и на виадуках, где зависимость стоимости от сдвига трассы будет не столь существенной.

Не рассмотрены также дополнительные эксплуатационные затраты в кривых меньшего радиуса, связанные с уменьшением скорости и дополнительным износом пути и подвижного состава. Все это может послужить предметом для дальнейшего исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кірка Г. М. Інтеграція залізничного транспорту України у європейську транспортну систему: Монографія. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, Арт-Прес, 2003. – 268 с.
2. Кирпа Г. Н. Стратегия взаимодействия // Залізничний транспорт України. 2003. – № 6. – С. 2–7.

3. Предварительное технико-экономическое обоснование проекта высокоскоростных железных дорог на Украине: Окончательный отчет / Министерство транспорта Украины. Государственная администрация железнодорожного транспорта Украины. – К., 2002. – 311 с.
4. Design of New Lines for Speeds of 300–350 km/h. State of the Art. First Report / International Union of Railways (UIC) – Paris, 2001. – 54 p.
5. Кирпа Г. Н., Корженевич И. П., Курган Н. Б. Перспективы внедрения сети высокоскоростных железных дорог в Украине // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Сб. науч. тр.: В 3-х т. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2003. – Т. 1. С. 511–518.

Поступила в редколлегию 23.01.04.