

УДК 625.113:656.224.027.3

Курган Н. Б., Байдак С.Ю., Хмелевская Н.П. Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна, Днепропетровск, Украина

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫБОРУ РАДИУСА КРИВОЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МАГИСТРАЛИ

Предложены подходы к определению минимальных радиусов кривых в плане, учитывающие уровень максимальной скорости, тип перевозок на магистрали, объемы строительных работ, зависящие от величины радиуса

Ключевые слова: высокоскоростная магистраль, максимальная скорость, радиус кривой, возвышение наружного рельса, непогашенные поперечные ускорения, объем работ

Kurgan N., Baidak S., Khmelevskaya N. Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Acad. V. Lazarian, Dnepropetrovsk, Ukraine

THE MAIN APPROACHES TO THE CALCULATION OF THE RADIUS OF THE CURVE IN TERMS OF HIGH-SPEED LINE

Named the approaches to the determination of the minimum radius of the curve. Taking into account the level of the maximum speed, types of trains, the amount of construction work, depending on the radius

Keywords: high-speed highway, the maximum speed, curve radius, elevation, lateral acceleration, the amount of work

История вопроса

Страны Европейского Союза планируют создать систему высокоскоростного движения от Хельсинки в Мадрид и от Лондона до Варшавы на базе единых технических стандартов. При этом будет достигнуто скорости 300 км/ч и выше, что соответствует современным международным стандартам [1].

В передовых в техническом отношении странах уже не ставится вопрос о необходимости строительства высокоскоростных магистралей (ВСМ), а ведется поиск оптимальных схем финансирования для реализации таких проектов.

Еще десять лет назад по заказу Укрзалізнички французская фирма «Систра» разработала технико-экономическое обоснование проекта высокоскоростных железных дорог в Украине. Длина предложенной высокоскоростной сети составила более 3 тыс. км [2]. Предполагается строительство новых линий по техническим параметрами, обеспечивающим

движение высокоскоростных экспрессов с минимальной расчетной скоростью 300-350 км/ч.

Как такой параметр скорости согласуется с европейскими нормативами? В материалах ОСЖД предлагается следующая классификация высокоскоростных железных дорог: скоростные – для скорости до 200-250 км/ч, которые могут проектироваться как на новой трассе, так и использовать существующие линии после проведения реконструкции; высокоскоростные – для скорости 250-300 км/ч на специально построенных железных; сверхскоростные – для скорости более 300 км/ч на специально построенных железных дорогах.

С уровнем скорости тесно связан такой основной параметр плана линии как радиус круговой кривой. В специальных технических условиях Российской Федерации (СТУ) для проектирования, строительства и эксплуатации ВСМ [3] сказано, что значение минимально допустимого радиуса кривых в плане для различных интервалов скоростей движения поездов определяются при условии обеспечения: непогашенного поперечного ускорения не более $0,4 \text{ м/с}^2$ (в тяжелых условиях по согласованию с заказчиком непогашенное поперечное ускорение может быть увеличено до $0,7 \text{ м/с}^2$ [4]). В СТУ [5] отмечается, что ВСМ проектируются на максимальную скорость движения пассажирских поездов до 400 км/ч при статической нагрузке на ось не более 170 кН, а также на пропуск специальных поездов со скоростями не более 120 км/ч при максимальной статической нагрузке на ось 230 кН. Следовательно, возникает необходимость при определении минимального радиуса учитывать не только уровень максимальной скорости, но и тип поездов, обращающихся на высокоскоростной магистрали.

В странах, где реализовано высокоскоростное движение поездов, нормативы минимального радиуса кривых различаются (табл. 1)

Таблица 1. Минимальные радиусы кривых в разных странах

Параметры	Страны и максимальные скорости, км/ч									
	Франция		Германия			Италия		Испания		Бельгия
	300	350	300	350	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
Минимальный радиус кривых для максимальной скорости, м	4000	6250	4000	3350	5120	5450	7000	4000	6500	4800

Из табл. 1 следует, что на скоростных исключительно пассажирских направлениях значение минимального радиуса в 1,2-1,4 раза меньше чем при такой же скорости на направлениях с совмещенным пассажирским и грузовым движением.

Необходимо отметить, что в странах, которые не входят в ЕС, но имеют ВСМ: Япония, Южная Корея, Тайвань, США, КНР разработаны и действуют свои нормативные базы, обеспечивающие процессы разработки, проектирования, строительства, эксплуатации и обслуживания ВСМ. В Японии и США эта нормативная база складывалась в результате самостоятельных разработок и в некоторых вопросах имеет расхождения с нормами ЕС. Южная Корея создавала ВСМ под большим влиянием Франции, Тайвань – Японии, КНР успешно аккумулировала и адаптировала к своим условиям опыт нескольких ведущих в области высокоскоростного железнодорожного движения стран.

Ряд государственных структур России, ОАО «РЖД» осуществляют в настоящее время работу по изучению нормативной базы высокоскоростного железнодорожного транспорта ЕС и других стран, создают отечественную нормативную базу, совместимую по основным компонентам с базой, используемой в передовых в техническом отношении странах. В Российской Федерации основополагающим документом в этой области является «Технический регламент Таможенного союза о безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» [6].

С некоторой долей приближения можно выделить три основных концептуальных подхода к инфраструктуре и организации высокоскоростного движения: тип высокоскоростной магистрали I – исключительно скоростное движение. К типу I относятся ВСМ во Франции, Бельгии, Германии и др; тип II – высокоскоростные пассажирские перевозки сочетаются с обычными пассажирскими поездами с более низкими скоростями. В этой группе Испания и некоторые линии Бельгии и Голландии; тип III – смешанные пассажирские перевозки (высокоскоростные и обычные) и грузовое движение. В этой группе Италия и Германия, а также новые линии в Испании, Франции и в Англии. Так, например, в Германии есть линии, на которых скорости пассажирских поездов до 280 км/ч, а грузовых – 120 км/ч.

Особенности выше перечисленных систем высокоскоростных магистралей и их совместимость с существующей сетью железных дорог представлены в виде концептуальных моделей в табл. 2.

В связи с изложенным выше, будем рассматривать два принципиальных варианта: исключительно пассажирское движение и преимущественно пассажирское движение, когда инфраструктура ВСМ может использоваться для пропуска специальных контейнерных, пассажирских пригородных и поездов дальнего следования со скоростями до 160 км/ч.

Таблица 2. Совместимость системы ВСМ с существующей сетью железных дорог

Условное наименование модели ВСМ	Железнодорожные пути ВСМ	Сеть ВСМ	Характер линий ВСМ	Станции ВСМ
Японско-испанская	ВСМ создаются с использованием колеи отличной от колеи общей железнодорожной сети страны	Ж.-д. линии ВСМ отделены от остальной сети железных дорог	Относительно протяженные отделенные от остальной сети железных дорог магистрали	Строятся новые станции или ж.-д. пути ВСМ вводятся на существующие реконструированные вокзалы
Французская	ВСМ создаются с использованием той же колеи, что и основная железнодорожная сеть страны	Линии ВСМ объединены с остальной сетью железных дорог страны		Как правило, используются существующие станции, связанные с ВСМ соединительными ж.-д. линиями
Германско-итальянская			Относительно короткие участки ВСМ в общих скоростных коридорах	

Целью исследования является определение минимального значения радиуса круговой кривой в плане в зависимости от уровня максимальной скорости и типа высокоскоростной магистрали с учетом объемов работ.

Минимальное значение радиуса кривых на ВСМ типа I

При рассмотрении ВСМ, которые предназначены исключительно для скоростного движения, минимальный радиус кривой $R_{\min}$ можно определить из формулы расчета возвышения наружного рельса [7]

$$R_{\min}^I = \frac{V_{\max}^2}{3,6^2 \left(\left[\alpha_{nn}^{nc} \right] + \frac{gh}{S} \right)}. \quad (1)$$

где:

$V_{\max}$ – максимальная допустимая скорость для пассажирских поездов, км/ч;,
 α_{nn}^{nc} – непогашенный ускорения для пассажирских поездов ($0,4 \text{ м/с}^2$);
 g – ускорение силы тяжести, $9,81 \text{ м/с}^2$;
 h – величина возвышения наружного рельса, мм;
 S – расстояние между осями рельсов соответственно 1500 мм для европейских железных дорог и 1600 мм для железных дорог стран СНГ.

По результатам расчетов построены графики зависимости возвышения наружного рельса от радиуса кривой (рис. 1), и получены значения минимальных радиусов кривых $R_{\min}$ (табл. 3).

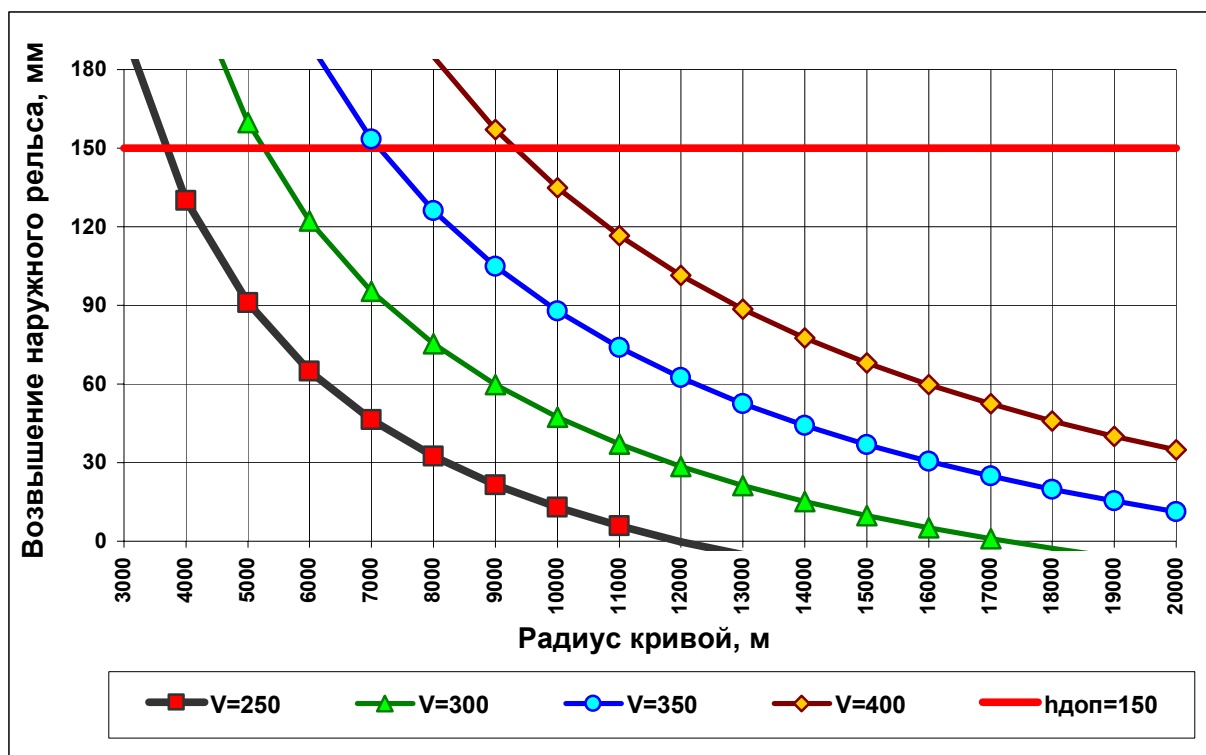


Рис 1. Графики зависимости возвышения наружного рельса от радиуса кривой для заданного уровня максимальной скорости (тип ВСМ I)

Наибольшая величина возвышения наружного рельса на железных дорогах Франции независимо от скорости составляет 180 мм, в то время, как в странах СНГ 150 мм (эксплуатационные нормы), а СТУ [3, 5] при проектировании ВСМ предусмотрено возвышение 140 мм, что касается, прежде всего, железнодорожного пути на балласте. Преимущество безбалластного пути состоит в том, что в кривых можно путь устраивать с возвышением на 10-20% большим. Благодаря этому при одинаковой скорости радиус кривой может быть меньше (см. табл. 3), что дает возможность при прокладке трассы лучше вписываться в рельеф местности, уменьшая затраты на строительную стоимость.

Таблица 3. Минимальное значение радиуса кривых
(Тип ВСМ I – исключительно скоростное движение)

Максимальная скорость, км/ч	Минимальное значение радиуса (м) для исключительно скоростного движения (тип ВСМ I) при соответствующем возвышении наружного рельса в кривых		
	Украина		SNCF
	140 мм	150 мм	180 мм
250	3800	3700	3000
300	5500	5300	4500
350	7500	7200	6000
400	9800	9300	7700

Минимальное значение радиуса кривых на ВСМ типа II

При преимущественно пассажирском движении и наличии поездов других категорий, например, контейнерных грузовых, минимальный радиус кривой устанавливается из условия:

$$h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \quad (2)$$
$$h_{\min} = \frac{A \cdot V_{\max}^2}{R} - I, \quad h_{\max} = \frac{A \cdot V_{\min}^2}{R} + E,$$

где: $A = 11,8$ соответственно для европейских железных дорог и $12,5$ для железных дорог стран СНГ;

$h_{\min}$ – минимально допустимое возвышения наружного рельса для пассажирских поездов, мм;

$h_{\max}$ – максимальная допустимая величина возвышения наружного рельса для грузовых поездов, мм;

$V_{\min}$ – минимальная скорость грузового поезда, км/ч;

α_{nn}^e – непогашенное ускорения для медленных грузовых поездов ($-0,3 \text{ м/с}^2$);

E – избыток возвышения наружного рельса, $E = \frac{S}{g} \alpha_{nn}^e$ мм;

I – недостаток возвышения наружного рельса $I = \frac{S}{g} \alpha_{nn}^{nc}$, мм.

При выполнении условия (2) минимальный радиус кривой для совмещенного движения поездов (тип ВСМ II) определяется из соотношения

$$\frac{A \cdot V_{\min}^2}{h - E} \leq R \leq \frac{A \cdot V_{\max}^2}{h + I}, \quad (3)$$

где h – возвышение наружного рельса в кривой, мм.

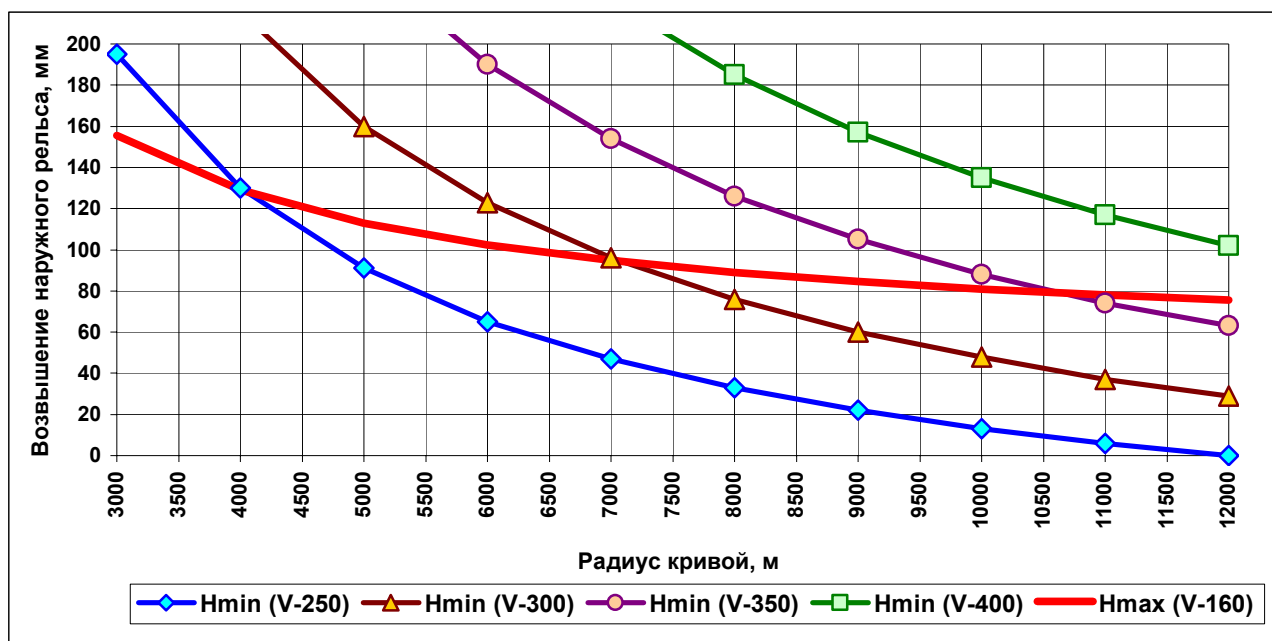


Рис 2. Графики зависимости возвышения наружного рельса от радиуса кривой для заданного уровня максимальной скорости (Тип ВСМ II)

В приведенном примере (рис. 2) скорость грузовых поездов принята 160 км/ч. Если же скорость будет меньше, например, 120 или 140 км/ч, то минимальный радиус увеличивается (см. табл. 4). Прокладка трассы с такими параметрами кривых вызовет большие объемы работ, а, следовательно, и стоимость строительства.

Таблица 4. Минимальное значение радиуса кривых (тип ВСМ II)

Скорость, км/ч		Радиус кривой, м	Возвышение наружного рельса, мм
максимальная	минимальная		
250	120	5300	85
300	120	8300	75
350	120	12000	65
400	120	16000	60
250	140	4700	100
300	140	7800	80
350	140	11300	70
400	140	15500	65
250	160	4000	130
300	160	7000	95
350	160	10600	80
400	160	15000	70

Из приведенного выше анализа следует, что сочетание высокоскоростного и грузового движения поездов является нежелательным, поскольку возникают существенные ограничения геометрии пути из-за дефицита возвышения наружного рельса в кривых. Учитывая вышеизложенное, следует считать целесообразным на направлениях внедрения скоростного движения обеспечить исключительно пассажирское движение.

Минимальное значение радиуса кривых из условия объемов работ

Поскольку сегодня Украина в вопросе высокоскоростного движения ориентируется на французский опыт, целесообразно рассмотреть именно его [8]. 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. 5).

Таблица 5. Значение минимального радиуса кривых (м) в зависимости от топографических условий и уровня максимальной скорости

Минимальный радиус для топографических условий	Минимальный радиус для уровня скорости, км/ч		
	270	300	350
Рекомендованный	3 846	4 545	7 143
Минимально допустимый	3 226	4 000	6 250
Применяемый в трудных условиях	3 125	4 000	5 556

Обратим внимание (табл. 5) на два момента. Во-первых, уровень максимальной скорости существенно влияет на величину минимального радиуса. Так, при росте максимальной скорости в 1,5 раза минимальный радиус увеличивается практически в два раза. Во-вторых, проектирование 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.

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. 3).

а во втором, при радиусе R_2

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

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

Приравняв K_1 и K_2 и выполнив некоторые преобразования, получим

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

Выполнив расчеты при $R_2 = 6500$ м и $R_1 = 3000 \dots 6000$ м для кривых с различными значениями угла поворота α , получим следующий график (рис. 4).

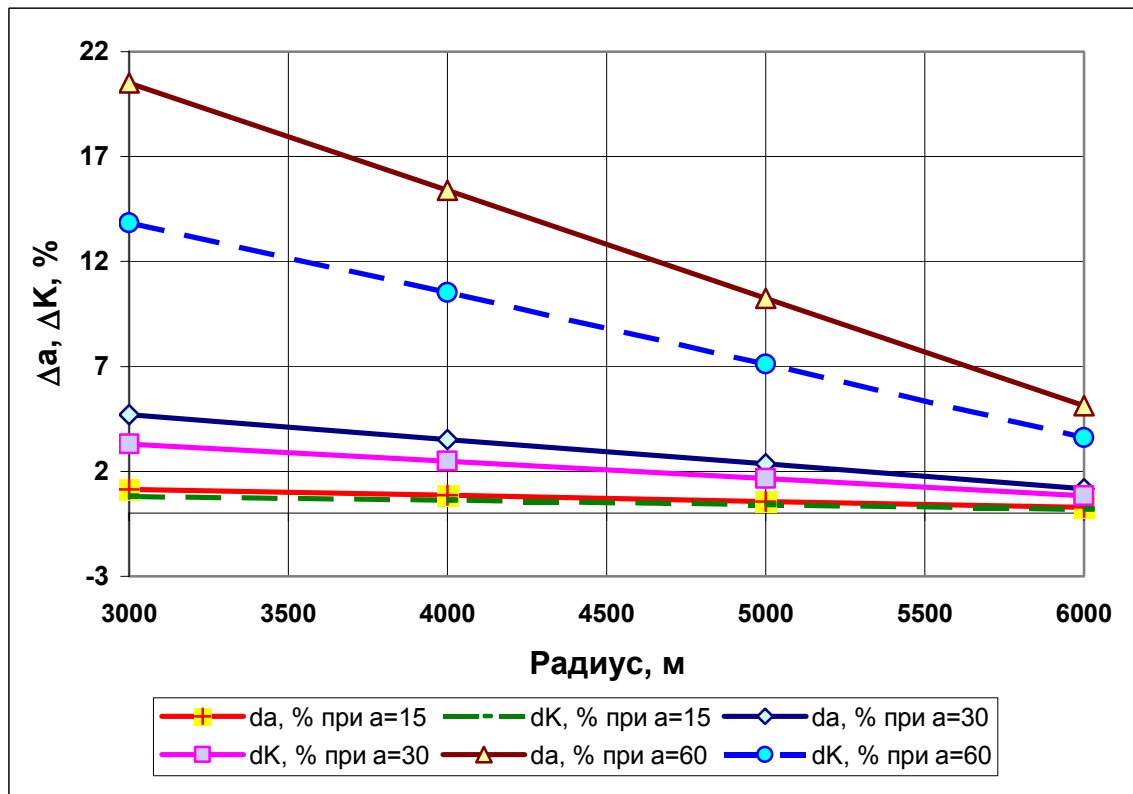


Рис. 4. Увеличение в процентах стоимости 1 км земляных работ и искусственных сооружений за счет применения большего радиуса

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%.

В случае применения большего радиуса кривой трасса в средней части сдвигается на величину, равную разности биссектрис. Можно показать, что разность биссектрис $\Delta B = B_2 - B_1$ практически линейно зависит от Δa (рис. 5).

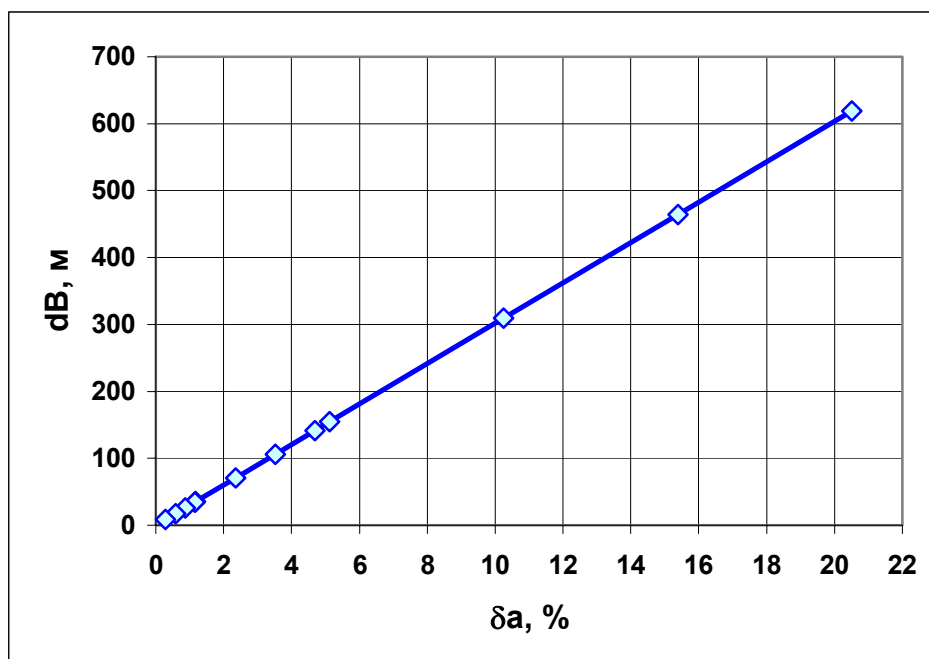


Рис. 5. Зависимость разности биссектрис от увеличения в процентах стоимости 1 км земляных работ и искусственных сооружений за счет применения большего радиуса

Анализ этого графика и данных, приведенных в работе [10], показывает, что сдвигка средней части кривой может достигать значительных величин. 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 радиусами будут приблизительно равны.

Как и в предыдущем случае, данную зависимость удобно построить от величины $\Delta\alpha$. Приняв $\Delta\alpha = 100 \frac{S_2 - S_1}{S_1}$, где S_1 и S_2 – площади поперечных сечений земляного полотна в первом и втором вариантах соответственно, и выполнив преобразования, получим зависимость

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

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 квадратное уравнение, была построена зависимость Δh от $\Delta\alpha$ (рис. 6).

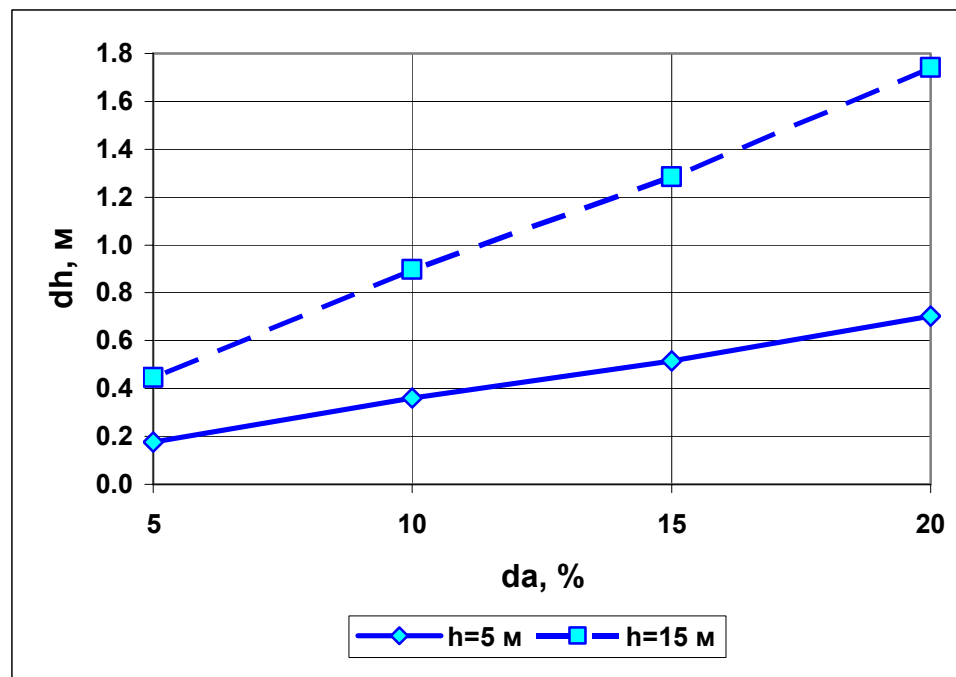


Рис. 6. Зависимость изменения рабочей отметки земляного полотна от увеличения в процентах стоимости 1 км земляных работ и искусственных сооружений за счет применения большего радиуса

Из рис. 6 следует, что даже при достаточно больших значениях $\Delta\alpha$ допустимое изменение рабочей отметки не достигает 2 м, и это при смещении трассы почти на 600 м в сторону.

Из анализа результатов расчетов следует, что замена меньшего значения радиуса большим будет эффективна только в условиях относительно спокойного рельефа. В условиях сложного рельефа экономически оправданным будет переход на значение радиуса, допустимого в трудных условиях, что, 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 является комплексным, чрезвычайно ответственным решением, от которого будет зависеть положение трассы ВСМ.

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

Заключение

Минимально допустимое значение радиуса следует устанавливать дифференцированно в зависимости от максимальной скорости движения поездов с учетом специализации направлений для перевозок пассажиров. На выбор параметров кривых влияет прежде всего тип ВСМ: исключительно скоростное движение, или же смешанные пассажирские перевозки (высокоскоростные, обычные) и грузовое движение.

При проектировании новых высокоскоростных магистралей важным остается вопрос выбора концептуальной модели (типа) ВСМ, так как от этого зависит величина минимального радиуса и, собственно, прохождение трассы.

Из приведенного выше анализа следует, что сочетание высокоскоростного и грузового движения поездов является нежелательным, поскольку возникают существенные ограничения геометрии пути из-за дефицита возвышения наружного рельса в кривых. Учитывая вышеизложенное, следует считать целесообразным на направлениях введения высокоскоростного движения обеспечить исключительно пассажирское движение.

Список литературы

1. О результатах разработок предложений по созданию скоростных и высокоскоростных железнодорожных линий в странах-членах ОСЖД / Бюллетень ОСЖД. - Варшава, 2000, №3. – С. 9-13.
2. Предварительное технико-экономическое обоснование проекта высокоскоростной железнодорожной сети в Украине. Окончательный отчет. - К: «Систра», 2002. - 311 с.
3. Специальные технические условия (СТУ) для проектирования, строительства и эксплуатации новой высокоскоростной пассажирской железнодорожной магистрали «Москва – Санкт-Петербург». Согласованы решением Министерства регионального развития РФ от 28.07.2009 г. №23683 – ИП/08. – 52 с.
4. Смелянский И.В. Совершенствование нормативов непогашенного ускорения и его приращения для современного подвижного состава при скоростном движении. Автореф. дис. на соиск. степени к.т.н. по спец. 05.22.06 – железнодорожный путь, изыскания и проектирование железных дорог. М., МИИТ, 2008. – 208 с.
5. Специальные технические условия для проектирования, строительства и эксплуатации высокоскоростной железнодорожной магистрали «Москва – Казань – Екатеринбург». – М.: МИИТ, 2013. - 79 с.
6. Технический регламент Таможенного союза ЕврАзЭС «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» (ТР ТС 002/2011) / Утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710.
7. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії / М.Б. Курган, А. М. Орловський, О. М. Патласов, В. В. Циганенко, Д. М. Курган: ЦП-0236: Затв. наказом Укрзалізниці від 14.12.2010 №778-Ц. – К., 2010. – 52 с.
8. Кирпа Г. Н. Перспективы внедрения сети высокоскоростных железных дорог в Украине / Г. Н. Кирпа, И. П. Корженевич, Н. Б. Курган // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Сб. науч. тр.: В 3-х т. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2003. – Т. 1. с. 511 – 518.

9. Кирпа Г.Н. Выбор минимального радиуса кривых при проектировании высокоскоростных железных дорог / Г. Н. Кирпа // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ. – 2003. – Вип. 3. – С. 78-81.
10. Курган Н.Б. Определение объемов работ для снятия ограничений скорости, связанных с планом линии / Н.Б. Курган, Н.П. Хмелевская, С.Ю. Байдак // Сб. науч. тр. Дальневосточного гос. ун-та путей сообщения / Под. ред. В.С. Шварцфельда. – Хабаровск: из-во ДВГУПС, 2014. – Вып. 2. – С. 52-62.