

# Технические предпосылки снижения стоимости строительства ВСМ



**В. А. Копыленко,**  
к.т.н., профессор  
Московского  
государственного  
университета путей  
сообщения Императора  
Николая II (МИИТ)

Задача эксперта состояла в анализе принятых в Проекте параметров плана и продольного профиля трассы магистрали на соответствие их утвержденным нормативным требованиям для этой линии СТУ 1 [1]. Наряду с этим поставлен вопрос о выявлении возможности с помощью проектных решений по плану и продольному профилю трассы снизить полученную в Проекте высокую стоимость строительства высокоскоростной магистрали (ВСМ).

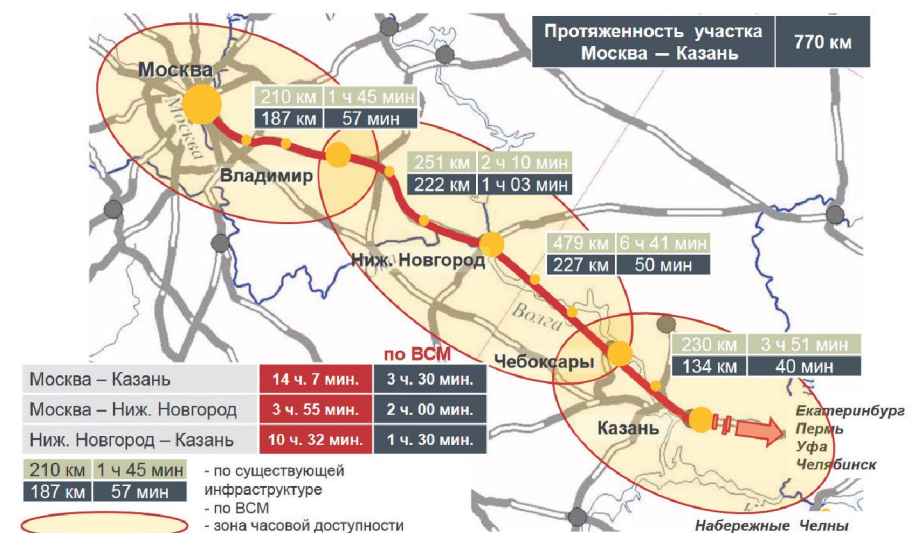
Согласно СТУ 1, на данной линии предусмотрено движение высокоскоростных пассажирских поездов с максимальной скоростью до 400 км/ч. Для достижения этой скорости радиусы круговых кривых в плане должны быть не менее 10 000 м. В представленном Проекте ВСМ 2 применено большое количество кривых в плане трассы. Так, на головном участке магистрали (33-й км – ст. Ногинск ВСМ) запроектировано несколько кривых радиусом 2500–3500 м, ограничивающих максимальную скорость высокоскоростных поездов  $V_{\text{ВСМmax}}$  значениями 230–250 км/ч. Применение кривых указанного радиуса обусловлено тем, что в этой плотно застроенной и густонаселенной зоне много контурных препятствий (промышленных зданий и сооружений, населенных пунктов, в частности, дачных поселений, садовых товариществ), водных препятствий, а также пересекаемых спрямленным направлением трассы железных и автомобильных дорог, линий электропередачи и других протяженных инженерных коммуникаций. Перенос многих указанных сооружений не только нежелателен, но и весьма затруднен, а кроме того, сопряжен с боль-

шими материальными затратами. Устройство на этом участке дороги между соседними кривыми сравнительно коротких прямых вставок длиной от 404 до 553 м не противоречит утвержденным нормативным требованиям. Указанные значения длины прямой вставки, как и приведенных радиусов кривых, определены необходимостью реализовать быстрый разворот плана трассы, чтобы обеспечить благоприятные условия обхода ими пересечения разнообразных препятствий рукотворного или естественного происхождения. На участке от Москвы до Владимира суммарная протяженность кривых в плане составляет 48,3 %, что, конечно, много для ВСМ. Очевидно, что принятые в Проекте параметры плана трассы на данном участке ВСМ 2 продиктованы компромиссным подходом к проблеме. Представляется, что в целом план трассы запроектирован рационально и обя-

зательных корректировок не требует.

Отношение эксперта к проектным решениям в продольном профиле трассы ВСМ 2 иное. Эти решения соответствуют концепции обеспечения при эксплуатации магистрали благоприятных условий для достижения наибольшей плавности движения поездов. Такая позиция понятна и в целом разумна. При очевидной рациональности данного подхода к проектированию продольного профиля ВСМ следует указать, каким образом он реализован.

Указанный результат достигается применением весьма длинных элементов продольного профиля, благодаря чему сокращается количество переломов профиля. Однако на ряде участков недоиспользованы возможности применения принятого на ВСМ 2 значения максимального уклона продольного профиля пути  $i_{\text{max}} = 24 \text{ ‰}$ . Степень его использования составляет всего 3,6 %,



а уклонов в диапазоне от 20 до 24 ‰ – 3,7 ‰, что, конечно, маловато.

Наряду с длинными элементами продольного профиля в основном применены сравнительно небольшие значения алгебраической разности уклонов сопрягаемых элементов профиля  $|\Delta i|$ , хотя в утвержденных СТУ 1 никаких ограничений максимально допустимой величины  $\Delta i$  нет: при необходимости она может достигать предельного значения  $\Delta i = 2i_{\max} = 48 ‰$ .

При  $\Delta i \geq 0,5 ‰$  смежные уклоны профиля сопрягают путем устройства круговой кривой в вертикальной плоскости радиусом  $R_B$ . Согласно требованиям СТУ 1, эта вертикальная кривая не должна совмещаться (совпадать) с переходной кривой в плане линии. В Проекте ВСМ 2 указанное требование выполнено на всех участках магистрали. Однако соблюдение этого требования приводит (и привело!) к более редкому размещению переломов профиля, что увеличивает значения длины элементов продольного профиля

Длина вертикальной кривой  $K_B$  прямо пропорциональна ее радиусу  $R_B$  и принятой (назначенной) величине  $\Delta i$ . Длину вертикальной кривой можно уменьшить, применив меньший радиус  $R_B$  (км), который вычисляют по формуле

$$R_B = \frac{V_{\text{ВСМ max}}^2 \cdot 10^{-5}}{a_B \cdot 3,6^2}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{ВСМ max}}$  – максимальная скорость высокоскоростного поезда в данной кривой, км/ч;

$a_B$  – наибольшая допустимая величина нормального ускорения в данной кривой, м/с<sup>2</sup>, согласно СТУ 1, на выпуклых переломах профиля – 0,3; на вогнутых – 0,4.

Для ряда величин максимальной скорости в табл. 1 приведены вычисленные по приведенной формуле значения минимально допустимого радиуса вертикальной кривой (округлены до 1 км).

В Проекте ВСМ 2 минимальный  $R_B$  принят равным 20 км, в том числе для участков, где  $V_{\text{ВСМ max}}$  не превышает 250 км/ч (от Москвы до Ногинска). В СТУ 1 указанная величина  $R_B$  «перекочевала» из СТН Ц-01-95, отмененных в 2015 г. Стоит отметить следующее: если на участке от Москвы до Ногинска проек-

тировщики применили радиусы кривых в плане значительно меньшие, чем рекомендуемый (10 000 м), которые ограничивают  $V_{\text{ВСМ max}}$ , то в продольном профиле на этих участках ВСМ 2 тем более можно применять значения  $R_B$ , полученные по приведенной формуле, если при этом удастся уменьшить объемы строительных работ.

Несравненно большего экономического эффекта можно было бы достичь, если разрешить совмещения вертикальных кривых с переходными кривыми в плане. Табу на такое совмещение тянется «из глубины веков». Связано оно в основном с тем, что путейцы не могли точно отследить пространственные геометрические параметры пути, прежде всего, наружного рельса, на участке совпадения вертикальной кривой с переходной кривой в плане линии. Кроме того, выявив нарушения геометрических параметров пути, часто нужно проводить работы по выправке пути в процессе эксплуатации железнодорожной линии.

Сегодня задача непрерывного «описания» геометрических параметров рельсовой колеи практически решена: современной измерительной техникой можно оборудовать путеизмерительный вагон. Однако возможность решения поставленной задачи связана не только с техническими ограничениями. До сих пор не разработано строгого научного обоснования проблемы, на основе которого были бы установлены численные критерии и условия (ограничения) возможности или недопустимости совмещения вертикальной и переходной кривых.

Высказанные соображения определяют целесообразность рассмотрения вопроса о возможности уменьшения объемов строительных работ и стоимости строительства ВСМ 2 в результате более тщательной проектировки продольного профиля дороги при неизменном (намеченном) плане ее трассы. Априори понятно, что с этой целью в первую очередь следует подвергать анализу и количественной оценке места сосредоточения больших объемов строительных работ: эстака-

ды и примыкающие к ним насыпи, а также отдельные участки трассы с высокими и протяженными насыпями.

В результате исследования [2] установлены сферы экономической целесообразности применения насыпей и эстакад. Так, для двухпутных линий, проектируемых в инженерно-геологических условиях (ИГУ) умеренной сложности, рационально заменить их эстакадами при высоте насыпей более 11–12 м, а в особо сложных ИГУ эстакады целесообразно возводить при рабочих отметках более 8 м.

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 назначенного в данном месте пролетного строения. Когда на рассматриваемом участке магистрали в процессе проектирования продольного профиля установлена (в первом приближении) целесообразность устройства протяженной эстакады, а характерных сечений, определяющих минимально допустимую высоту эстакады, два и более, причем расположены они друг от друга на значительном расстоянии (1,5 и более км), следует проверить возможность размещения в пределах эстакады нескольких переломов профиля, точнее, вертикальных кривых, обеспечивающих уменьшение высоты между указанными сечениями (рис. 1).

В качестве примера проектирования рассмотрены проектные решения по плану и продольному профилю трассы ВСМ 2, принятые в Проекте ОАО «Мосгипротранс» на участке 33-й км – 38-й км.

В плане запроектированы две смежные кривые, каждая радиусом 2500 м. Суммарная длина первой кривой (с учетом переходных) 2819,19 м, второй – 1673,57 м. Длина прямой вставки между ними 403,76 м. Принятые параметры плана трассы, прежде всего радиусы круговых кривых, ограничивают максимально допустимую скорость пассажирских поездов  $V_{\text{ВСМ max}}$  на уровне 250 км/ч.

На данном участке трасса ВСМ 2 пересекает ул. Центральную и Куди-

Таблица 1. Радиус вертикальной кривой, км

Нормальное ускорение $a_B$ , м/с <sup>2</sup>	Максимальная скорость $V_{\text{ВСМ max}}$ высокоскоростного поезда, км/ч				
	200	250	300	350	400
0,3	11	17	24	32	42
0,4	8	13	18	24	31



новское шоссе, а также строящуюся автодорогу, поэтому здесь запроектирована эстакада, в плане полностью размещенная на первой кривой. Продольный профиль пути в пределах эстакады запроектирован одним элементом с уклоном 0,4 ‰; начало элемента совпадает с началом эстакады, а ее правый конец расположен в 122 м от конца этого элемента профиля. Проектная линия профиля нанесена в уровне головки рельса. Рабочие отметки (значения высоты) в пределах эстакады колеблются от 10,3 до 22,0 м (в самой глубокой точке пересекаемого карьера). На подходах к эстакаде продольный профиль запроектирован уклонами: слева – 10,3 ‰, справа – 9,1 ‰; здесь расположены насыпи: слева – высотой от 11,5 до 3,7 м, справа – от 9,7 до 5,9 м.

На переломах продольного профиля предусмотрено устройство вертикальных кривых радиусом  $R_v = 20$  км, который принят одинаковым, а главное – завышенным для выпуклых и особенно для вогнутых кривых (см. в табл. 1 значения  $R_v$  при  $V_{\text{ВСМmax}} = 250$  км/ч).

Чтобы проверить возможность уменьшить объем и стоимость строительных работ, автор статьи (эксперт) запроектировал разные варианты очертания продольного профиля пути при неизменном плане ВСМ на данном участке магистрали (рис. 2). При разработке этих вариантов решено отказаться от пересечения строящейся автодороги железнодорожной эстакадой, как это предусмотрено в Проекте ОАО «Мосгипротранс». Пересечение в разных уровнях здесь намечено произвести, устроив путепровод на автодороге, который будет расположен над ВСМ. Такое решение обеспечивает существенное сокращение длины эстакады: на 315 м при реализации одного варианта и на 590 м – другого. Следует подчеркнуть, что столь радикальное изменение первоначального проектного решения оправдано лишь тогда, когда есть уверенность, что при строительстве ВСМ 2 намеченный в Проекте план ее трассы сохранится неизменным.

Другая особенность разработанных вариантов – применение на левом подходе максимально допустимого на ВСМ 2 уклона 24 ‰, что позволило значительно уменьшить длину и высоту подходной насыпи. При этом на участке ПК333 – ПК340+65 вместо насыпи запроектирована неглубокая выемка,

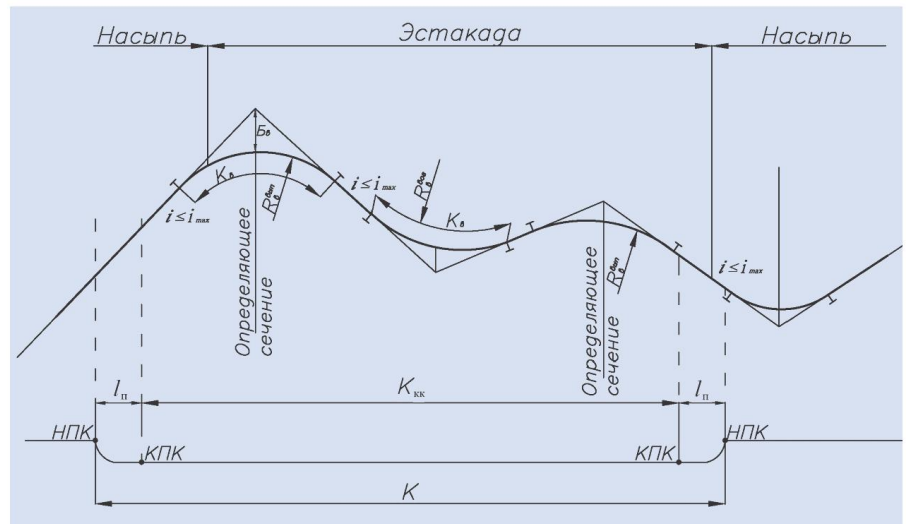


Рис. 1. Рациональное очертание продольного профиля пути в пределах эстакады и на подходах к ней

в которой продольный уклон условно принят равным нулю.

Главная особенность этих вариантов заключается в устройстве вместо одной протяженной эстакады (Проект ОАО «Мосгипротранс») двух эстакад, отделенных друг от друга насыпью, средняя высота которой существенно меньше средней высоты эстакады в Проекте. При этом суммарная протяженность двух эстакад оказалась меньше длины эстакады в Проекте. Протяженность и расположение первой эстакады намечены двумя подвариантами, различающимися точкой начала эстакады: «а» – на ПК344+00; «б» – на ПК346+75. В обоих подвариантах конец первой эстакады один и тот же – на ПК353+00. Проектное решение в подварианте «а» предусматривает пересечение эстакадой существующего глубокого карьера (ПК344+60 – ПК345+40). В подварианте «б» карьер пересекается насыпью, большой объем карьера подлежит засыпке грунтом.

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 этой эстакады (вариант показан синим цветом). Чтобы выпуклая кривая на второй эстакаде полностью разместилась в пределах прямой вставки между начальными точками смежных переходных кривых в плане трассы (см. рис. 2), потребовалось применить на данном выпуклом переломе профиля сравнительно небольшую величину

$\Delta i = 23$  ‰. Невозможность использования на правом конце второй эстакады и на подходной к ней насыпи более крутого уклона продольного профиля пути (круче 12 ‰) привело к значительному увеличению высоты и длины подходной насыпи по сравнению с вариантом в Проекте ОАО «Мосгипротранс».

Предложенный экспертом еще один вариант очертания продольного профиля – как 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 сократить объемы строительных работ как на самой эстакаде, уменьшив ее высоту и протяженность, так и в пределах подходной к ней насыпи с правой стороны.

Учитывая, что на рассматриваемом участке ВСМ 2 максимальная скорость пассажирских высокоскоростных поездов не превысит 250 км/ч, в запроектированных вариантах продольного профиля радиус выпуклых вертикальных кривых принят 17 км, а вогнутых – 13 км (см. табл. 1). Для большей сопоставимости результатов в варианте, разработанном в Проекте, радиусы вертикальных кривых уменьшены (заменены на указанные). Расчеты координат разбивки вертикальных кривых выполнены по ранее разработанной методике [3].

В табл. 2 указаны главные технические характеристики запроектированных вариантов эстакад. Они вошли в разных комбинациях в намеченные варианты очертания продольного про-

филя пути на рассматриваемом участке ВСМ 2. Итоговые показатели сметной стоимости строительства эстакад, земляного полотна и водопропускных сооружений по этим вариантам приведены в табл. 3.

Из данных табл. 2 следует, что суммарная длина двух запроектированных эстакад в зависимости от вариантов их комбинаций составляет от 1700 до 1125 м, т. е. сокращение длины двух эстакад по сравнению с длиной эстакады в Проекте составляет от 578 до 1153 м. Максимальное сокращение длины эстакад (более чем в 2 раза) относится к случаю, когда левая треть вертикальной кривой, на которой размещена вторая эстакада (на чертеже показана коричневым цветом), совмещена с первой половиной второй переходной кривой в плане трассы, т. е. требование СТУ 1 частично нарушено. Однако именно этот вариант обеспечивает наибольший экономический эффект: сокращение строительной стоимости эстакад, земляного полотна и водопропускных сооружений достигает 1086 млн руб., или 33,8 % (см. табл. 3). При полном выполнении соответствующего требования СТУ 1 (в двух вариантах) наибольшее сокращение суммарной длины двух эстакад составляет 853 м,

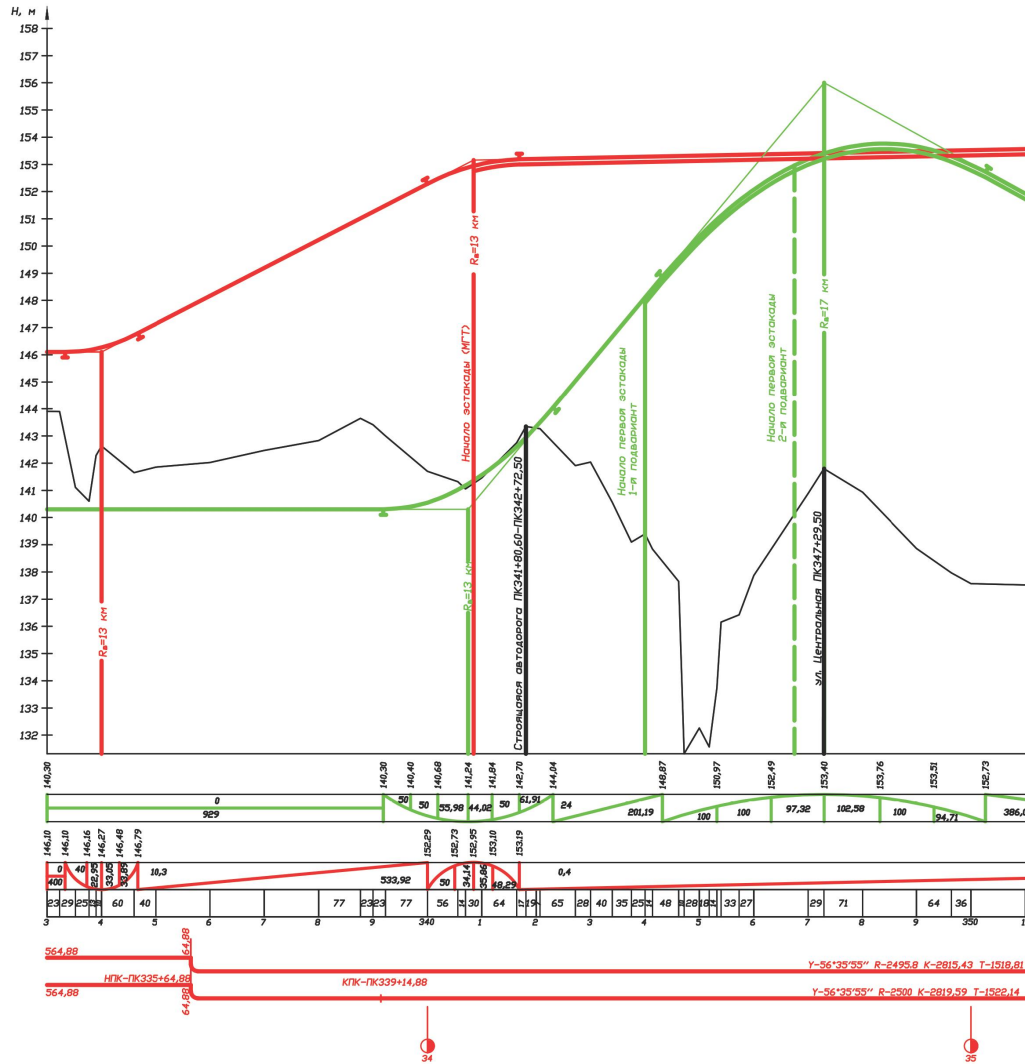


Рис. 2. Возможные варианты очертания продольного профиля пути в пределах протяженной эстакады

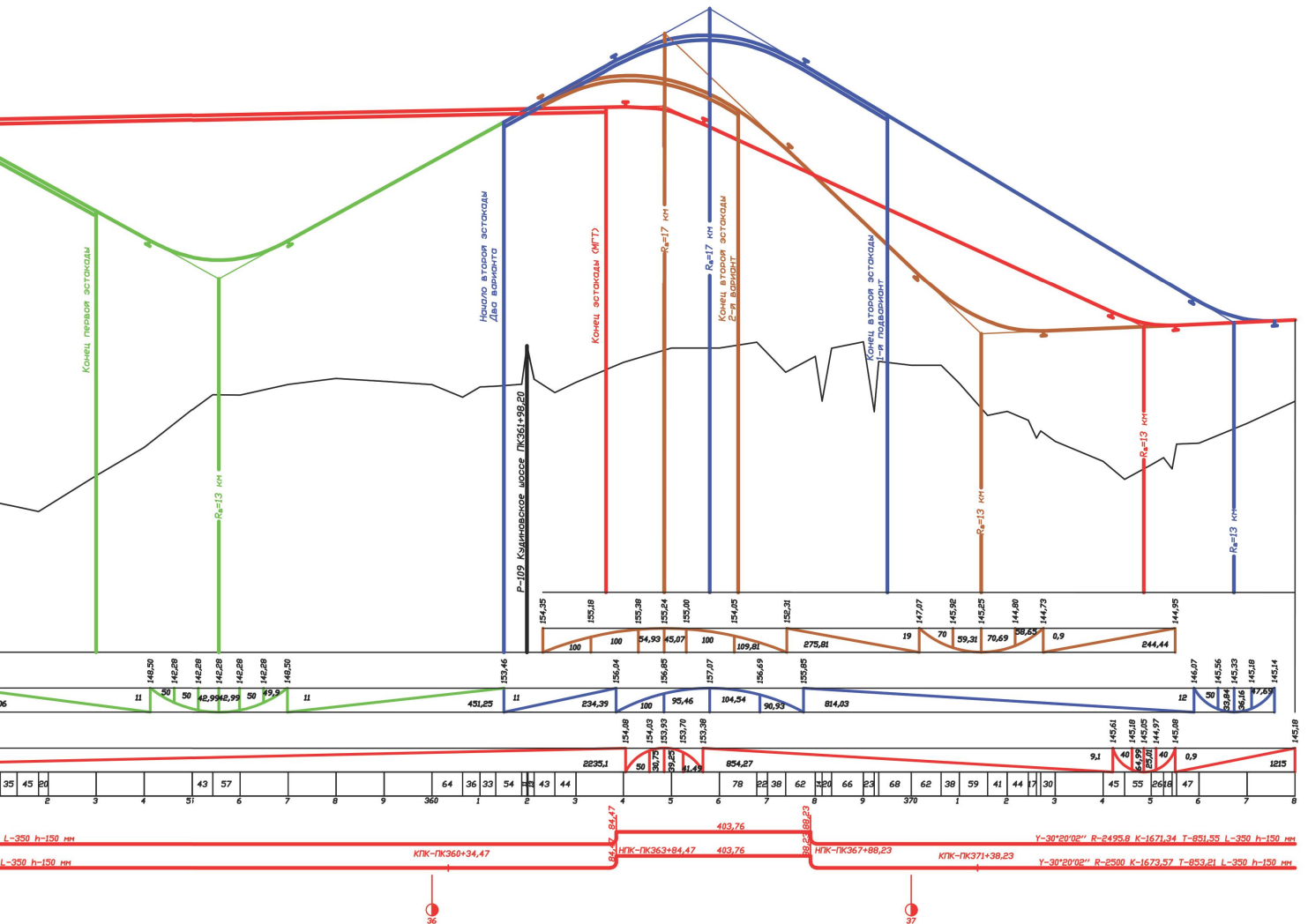
Таблица 2. Основные характеристики эстакад

Показатели	Эстакада в проекте ОАО «Мосгипротранс»	Эстакады, запроектированные экспертом			
		Первая, подварианты		Вторая, подварианты	
		Первый	Второй	Первый	Второй
Местоположение: ПК...+.. (начало) ПК...+..(конец)	ПК340+85 ПК363+63	ПК344+00 ПК353+00	ПК346+75 ПК353+00	ПК361+50 ПК369+50	ПК361+50 ПК366+50
Длина, м	2278	900	625	800	500
Средняя высота, м	13,05	13,84	13,59	12,35	11,61

Таблица 3. Сметная стоимость эстакад, земляного полотна и водопропускных сооружений (в ценах IV квартала 2016 г.), млн руб.

Стоимостные показатели	Проект ОАО «Мосгипротранс»	Варианты, запроектированные экспертом			
		Зеленым и синим цветом		Зеленым и коричневым цветом	
		1-я эстакада 1-й подвариант; 2-я эстакада 1-й вариант	1-я эстакада 2-й подвариант; 2-я эстакада 1-й вариант	1-я эстакада 1-й подвариант; 2-я эстакада 2-й вариант	1-я эстакада 2-й подвариант; 2-я эстакада 2-й вариант
Суммарная стоимость эстакад	2 690	2 008	1 682	1 653	1 327
Стоимость земляного полотна (с учетом укрепительных работ и водопропускных сооружений)	525	660	779	683	803
Суммарная стоимость эстакад и земляного полотна	3 215	2 668	2 461	2 337	2 130
Сокращение строительной стоимости (по сравнению с вариантом ОАО «Мосгипротранс»)	—	547 17,0 %	754 23,4 %	878 27,3 %	1 086 33,8 %





или 37,4 % (1-я эстакада, 2-й вариант; 2-я эстакада, 1-й вариант). В этом случае экономия строительных работ составляет 754 млн руб., или 23,4 %, что тоже немало. Можно предположить, что сэкономленная сумма превысит необходимые дополнительные затраты на устройство путепровода на строящейся автодороге.

Открытым остался вопрос, повлияет ли более сложная конфигурация продольного профиля пути на величину эксплуатационных расходов. Результаты проведенных ранее исследований автора [4] свидетельствуют, что локальные изменения очертания профиля на ограниченной длине линии (в пределах нескольких километров) не оказывают заметного влияния на величину эксплуатационных расходов: изменения не превышают десятых долей процента (max 0,5 %), что не превышает точности их определения.

Таким образом, выполненное автором статьи проектирование про-

дольного профиля ВСМ 2 на участке 33-й км – 38-й км подтвердило предположение о возможности существенно уменьшить стоимость строительства магистрали благодаря применению сложного очертания продольного профиля пути на ряде участков размещения железнодорожных эстакад.

Кроме того, представляется целесообразным поставить под сомнение вопрос о недопустимости совмещения вертикальной кривой с переходной кривой в плане пути. Он до сих пор не имеет строгого научного обоснования. Если в ближайшее время этот вопрос не удастся решить, то все же следует в порядке натурного эксперимента допустить указанное совмещение кривых по крайней мере на двух участках пути, где скорость движения высокоскоростных поездов может достигать 300–400 км/ч. При этом на одном из участков вертикальная кривая должна быть выпуклой, а на другом – вогнутой. □

**Литература**

1. Специальные технические условия «Проектирование участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Екатеринбург со скоростями движения до 400 км/ч».
2. Замуховский А. В., Копыленко В. А., Фридкин В. М. О технико-экономической целесообразности применения железнодорожных эстакад вместо высоких насыпей // Трансп. строительство. 2012. № 10. С. 15–18.
3. Копыленко В. А. Повышение точности расчета вертикальных кривых при проектировании трассы высокоскоростных магистралей // Трансп. строительство. 2014. № 4. С. 25–29.
4. Копыленко В. А., Низовских В. Ю. Технико-экономические предпосылки использования крутых уклонов продольного профиля пути на высокоскоростных магистралях // Проблемы развития транспортных и инженерных коммуникаций. 2003. № 2–3. С. 27–33.