

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНА СОРТИРОВОЧНЫХ ПУТЕЙ

Розроблено методику визначення оптимальних параметрів з'єднувальних кривих на сортувальних коліях, що забезпечують мінімальну відстань від головного пучкового стрілочного переводу до уповільнювачів паркових гальмівних позицій. Дана методика може використовуватись під час проектування плану колійного розвитку гіркових горловин.

*Ключові слова:* сортувальні колії, з'єднувальні криві, пучковий стрілочний перевід, колійний розвиток гіркових горловин

Разработана методика определения оптимальных параметров соединительных кривых на сортировочных путях, которые обеспечивают минимальное расстояние от головного пучкового стрелочного перевода до замедлителей парковых тормозных позиций. Данная методика может использоваться при проектировании плана путевого развития горочных горловин.

*Ключевые слова:* сортировочные пути, соединительные кривые, пучковый стрелочный перевод, путевое развитие горочных горловин

The method of determination of optimum parameters of connecting curves on marshalling tracks, which insure the minimum distance from the first bunch switch to the seating of park car retarders is developed. This method can be applied in designing the plan of marshalling tracks.

*Keywords:* marshalling tracks, connecting curves, first bunch switch, hump yard

Конструкция плана путевого развития горочной горловины оказывает существенное влияние на высоту и профиль горки и, следовательно, на расход энергии, связанный с расформированием составов, а также на качество всего сортировочного процесса. Кроме того, от конструкции плана зависит степень износа рельсов и колесных пар вагонов, а также уровень эксплуатационных расходов на техническое обслуживание горловины. Поэтому, выбор рационального варианта плана путевого развития горочной горловины является одной из основных задач при расчете параметров сортировочной горки.

Данная задача имеет существенные особенности, связанные с требованиями к размещению стрелочных переводов, тормозных позиций, а также устройств автоматики с учетом допускаемых радиусов кривых, ширины междупутий и других технических условий. Кроме того, при проектировании необходимо определить положение и параметры дополнительных кривых на спускной части горки и на сортировочных путях.

В настоящее время существует ряд подходов к проектированию горочных горловин. Наиболее трудоемким является графический метод [1], который предусматривает предварительное приближенное определение положения отдельных пучков горловины с последующим аналитическим расчетом неизвестных углов.

Ускорить проектирование горочных горловин позволяет использование ЭВМ для расчета их неизвестных параметров. С этой целью в [2]

была предложена модель горловины в виде ориентированного бинарного дерева и разработан метод расчета, основанный на построении проекции элементов расчетного сортировочного пути на вертикальную ось, который позволяет рассчитать величину одного неизвестного угла на трассе данного пути. Метод позволяет существенно ускорить проектирование горловин, однако при этом проблема выбора рациональных значений совокупности неизвестных углов остается нерешенной.

Учитывая неопределенность выбора параметров горловины, в [3] была предложена методика оптимизации проектирования трассы расчетного крайнего пути по критерию его минимальной расчетной длины. С использованием метода множителей Лагранжа была решена условная вариационная задача нахождения всех неизвестных углов расчетного пути. Однако данный подход не получил широкого распространения, поскольку он не учитывает влияние углов расчетного пути на конструктивные параметры внутренних пучков горловины.

Следует отметить, что в большинстве работ, посвященных проектированию горочных горловин, основное внимание уделяется расчету неизвестных углов на спускной части горки; в то же время существенное влияние на качество проекта оказывают параметры соединительных кривых на сортировочных путях, от которых зависит как расчетная длина горловины в целом, так и сопротивление движению скатывающихся отцепов. Для решения данной задачи в [4] был предложен метод расчета параметров

всех элементов пучков сортировочных путей. Метод основан на представлении конструкции стрелочной зоны пучка путей, которая инвариантна относительно его положения в горловине, с помощью методов аналитической геометрии. Исследования, выполненные в [4] с использованием указанного метода, показали, что во многих случаях на сортировочных путях необходимо укладывать дополнительные соединительные кривые с различными параметрами и направлением поворота.

Выбор рациональных значений параметров соединительных кривых на сортировочных путях представляет собой достаточно сложную оптимизационную задачу, точное решение которой до настоящего времени не получено. В этой связи в [5] предложен интерактивный метод решения данной задачи, позволяющий с использованием ЭВМ осуществлять подбор приемлемых значений параметров конструкции плана сортировочных путей.

Таким образом, в результате анализа научных работ в данной статье была поставлена задача совершенствования конструкции плана горочной горловины путем оптимизации параметров сопрягающих кривых на сортировочных путях.

Одним из составляющих трассы каждого сортировочного пути является участок между последним разделительным стрелочным переводом и расчетной точкой (рис. 1).

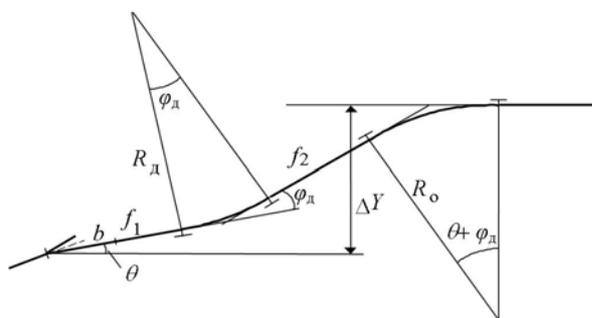


Рис. 1. Расчет параметров сопрягающих кривых на сортировочном пути

При этом план участка сопряжения в общем случае можно описать нелинейным уравнением вида:

$$\Delta Y = (b + f_1) \sin \theta + R_d \cos \theta - R_d \cos(\theta + \varphi_d) + f_2 \sin(\theta + \varphi_d) + R_o - R_o \cos(\theta + \varphi_d), \quad (1)$$

где  $\Delta Y$  – разность ординат центра стрелочного перевода и сортировочного пути;

$\theta$  – начальный угол наклона сортировочного пути;

$f_1, f_2$  – длины прямых вставок;

$\varphi_d$  – угол дополнительной сопрягающей кривой;

$R_o, R_d$  – радиусы, соответственно, основной и дополнительной сопрягающих кривых.

В качестве независимых переменных в (1) удобно принять параметры  $f_1, \varphi_d, R_o, R_d$ , величины  $\Delta Y$  и  $\theta$  обычно известны, а величина вставки  $f_2$  при этом находится из данного выражения.

Следует заметить, что в зависимости от параметров  $\Delta Y$  и  $\theta$  конструкция плана сопрягающих кривых на сортировочном пути может быть трех видов. Указанные кривые могут быть направлены в разные стороны (*S*-образная кривая, см. рис. 1) либо в одну сторону (*U*-образная кривая, рис. 2, путь *i*). Третий простейший вариант конструкции (см. рис. 2, путь *i+1*) используется при отсутствии необходимости устройства дополнительной сопрягающей кривой ( $\varphi_d = 0$ ).

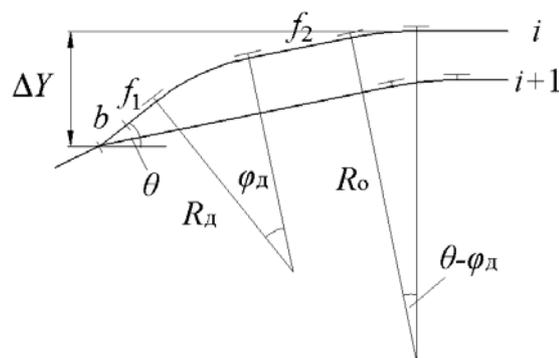


Рис. 2. Варианты сопрягающих кривых

Таким образом, при проектировании горочных горловин возникает задача выбора вида конструкции сопрягающих кривых, а также рациональных значений параметров  $f_{li}, \varphi_{di}, R_{oi}, R_{di}, i=1 \dots M$ , где  $M$  – число сортировочных путей. Как было отмечено выше, основным недостатком существующих методов решения данной задачи является то, что указанные параметры определяются методом подбора, что затрудняет выбор наилучшего варианта плана горловины. Поэтому в данной статье разработана методика оптимизации конструкции сопрягающих кривых на сортировочных путях.

Известно, что параметры сопрягающих кривых оказывают непосредственное влияние на размещение парковых тормозных позиций (ПТП). Поэтому возникает задача определения для каждого сортировочного пути такого вектора параметров  $w_i = (f_{li}, \varphi_{di}, R_{oi}, R_{di})$ , при которых ПТП размещаются на минимальном расстоянии от головных стрелочных переводов соответствующих пучков. Это позволяет увеличить полезную длину сортировочных путей, а также уменьшить потребную высоту горки за

счет сокращения расстояния до расчетной точки и, соответственно, уменьшить расход энергоресурсов, необходимых для реализации сортировочного процесса.

Решение данной задачи целесообразно при использовании на ПТП таких замедлителей (например, РНЗ-2), которые допускается размещать в кривых; при этом обычно регламентируется минимальный радиус кривой  $R_{\min}$  и ширина междупутья  $e_{\min}$  [6].

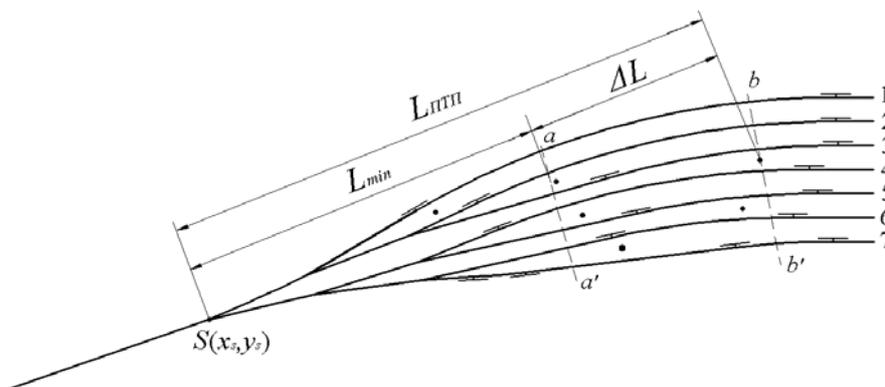


Рис. 3. План пучка путей горочной горловины

Тогда, учитывая требование о взаимном расположении замедлителей пучка путей в створе или «вразбежку» [6], ПТП должна располагаться от головной стрелки пучка (точка  $S$ ) на расстоянии не меньшем, чем  $L_{\text{ПТП}}$ , которое соответствует наиболее удаленной точке  $P_i$ , т.е.  $L_{\text{ПТП}} \geq \max\{L_i\}$ ,  $i=1..m-1$  (см. рис. 3, сечение  $bb'$ ).

В то же время, очевидно, существует некоторое сечение  $aa'$ , в котором расстояние между крайними путями пучка составляет  $e_{\min} \cdot (m-1)$ . Сечение  $aa'$  представляет собой нижнюю границу возможного расположения ПТП, находящуюся на минимальном расстоянии  $L_{\min}$  от головного стрелочного перевода пучка. Следовательно, при данном положении пучка и параметрах  $w_i$  путей на каждом из них имеется участок  $\Delta L = L_{\text{ПТП}} - L_{\min}$ , который нерационально увеличивает расчетную длину горочной горловины, что, в свою очередь, приводит к увеличению капитальных затрат и эксплуатационных расходов. Поэтому, возникает задача выбора такой совокупности параметров  $w_i$  на сортировочных путях пучка, при которой величина  $L_{\text{ПТП}}$  минимальна.

При оптимизации конструкции сопрягающих кривых на сортировочных путях пучка в качестве частного критерия выбрана числовая функция, представляющая собой абсолютную величину разности  $\Delta L_i$  расстояний  $L_{i-1}$  и  $L_i$ ,

Для решения данной задачи введем понятие точки возможной установки замедлителей  $P$ , в которой расстояния до осей двух смежных путей равны  $e_{\min}/2$ . Указанные точки  $P_i$ ,  $i=1..m-1$ , где  $m$  – число путей в пучке, располагаются во всех междупутьях пучка (рис. 3) на расстоянии  $L_i$  от головной стрелки пучка, которое зависит от параметров  $w_i$  путей  $(i, i+1)$ .

соответственно, между точками  $(S, P_{i-1})$ , а также  $(S, P_i)$ :

$$\Delta L_i = |L_i - L_{i-1}|. \quad (2)$$

Учитывая, что оптимальное значение частного критерия  $\Delta L_i$  определяется при фиксированной конструкции сопрягающих кривых на путях  $(i-1, i+1)$ , смежных с  $i$ -м, расстояния  $L_{i-1}$  и  $L_i$  рассматриваются как функции  $L_{i-1} = f_{i-1}(w_i)$ ,  $L_i = f_i(w_i)$  параметров сопрягающей кривой  $i$ -го пути.

Указанные числовые функции  $\Delta L_i$ ,  $i=2..m-1$  образуют векторный критерий

$$\mathbf{Z} = (\Delta L_2, \dots, \Delta L_{m-1}), \quad (3)$$

который принимает значения в арифметическом критериальном пространстве  $\mathfrak{R}^{m-2}$ ; при этом в векторе  $\mathbf{Z}$  составляющие частные критерии  $\Delta L_i$  должны быть упорядочены по убыванию.

Таким образом, задача выбора оптимальной конструкции сортировочных путей пучка, содержащая множество возможных решений  $\mathbf{X}$  и векторный критерий  $\mathbf{Z}$ , является многокритериальной задачей.

Оптимальным решением данной задачи является такое значение  $\mathbf{W}^*$  вектора параметров путей пучка  $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ , при котором вектор  $\mathbf{Z}^*$  является лексикографически минимальным.

Сформулированная задача оптимизации содержит ряд ограничений в виде равенств вида (1) для каждого из  $m$  путей пучка. Кроме того, ограничены и компоненты вектора параметров  $\mathbf{W}$ :

$$f_{1i} \geq 0, f_{2i} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m;$$

$$R_{oi} \in \mathbf{R}, R_{di} \in \mathbf{R}, \quad i = 1, \dots, m.$$

Здесь  $\mathbf{R}$  – множество допустимых по правилам проектирования значений радиусов кривых на сортировочных путях.

Решение сформулированной задачи оптимизации осуществляется с использованием итеративной схемы. Процесс оптимизации начинается с некоторой начальной конструкции пучка, полученной после определения неизвестных

углов поворота кривых на спускной части горочной горловины. Для указанной конструкции при соответствующих значениях параметров вектора  $\mathbf{W} = (\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_m)$  определяются координаты  $(x_i, y_i)$  всех точек возможной установки замедлителей  $P_i$ .

Точка  $P_i$  может быть определена как точка пересечения эквидистант двух смежных путей с номерами  $(i, i+1)$ , построенных для каждого из этих путей в их общем междупутье (рис. 4). Эквидистанта определяется как геометрическое место точек, которые являются концами нормалей длиной  $e_{\min}/2$ , восстановленных в каждой точке исходной кривой.

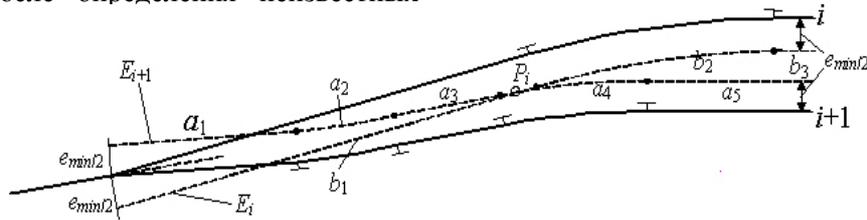


Рис. 4. Расчетная схема определения точки  $P_i$  с использованием эквидистант

В [5] предложена процедура построения эквидистант и алгоритм поиска точки их пересечения, основанный на методах вычислительной геометрии. Основным недостатком указанного метода является сложность расчетов, что существенно затрудняет его использование при решении задач оптимизации итерационными методами. Поэтому в данной статье разработан метод поиска точек  $P_i$ , равноудаленных от смежных путей, который основан на аппроксимации эквидистант модифицированными кубическими сплайнами дефекта 2. Такой подход, по сравнению с другими методами, обеспечивает более простую формализацию задачи и большую скорость ее решения при автоматизированном расчете.

Кубический сплайн представляет собой некоторую функцию  $S(x)$ , которая на каждом отрезке  $[x_{j-1}, x_j]$  является полиномом третьей степени.

$$S_j(x) = a_j + b_j(x - x_j) + \frac{c_j}{2}(x - x_j)^2 + \frac{d_j}{6}(x - x_j)^3, \quad (4)$$

где  $a_j, b_j, \frac{c_j}{2}, \frac{d_j}{6}$  – коэффициенты сплайна.

Каждый элемент  $j$  эквидистанты (см. рис. 4, эквидистанта  $E_i$  – элементы  $b_1 - b_3$ , эквидистанта  $E_{i+1}$  – элементы  $a_1 - a_5$ ) представлен в виде отдельной функции  $S_j(x)$ .

Для определения точки пересечения эквидистант  $E_i, E_{i+1}$  необходимо найти пару их элементов, на которых располагается точка пересечения  $P_i$  (элементы  $a_4$  и  $b_1$ ), и решить уравнение  $S_a(x) - S_b(x) = 0$ .

Координаты точек пересечения эквидистант используются в дальнейшем для определения расстояний  $L_i$  до всех точек  $P_i$  пучка.

$$L_i = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2}, \quad (5)$$

где  $x_i, y_i$  – координаты точки  $P_i$ ;

$x_s, y_s$  – координаты центра перевода горочной стрелки пучка.

Следует заметить, что координаты  $(x_s, y_s)$  определяются в процессе построения плана спускной части горочной горловины и при оптимизации параметров вектора  $\mathbf{W}_i$  не изменяются.

В дальнейшем на каждой итерации с использованием указанных расстояний  $L_i$  определяются компоненты  $\Delta L_i$  вектора  $\mathbf{Z}$  (3), которые упорядочивают по убыванию. После этого выбирают путь с номером  $j$ , у которого разность  $\Delta L_i$  является максимальной (первая компонента текущего значения вектора  $\mathbf{Z}$ , рис. 5,  $a$ ), и для данного пути решают задачу оптимизации конструкции сопрягающей кривой с использованием частного критерия  $\Delta L_j$ ; в ре-

зультате величина  $\Delta L_j$  достигает минимума (см. рис. 5, б).

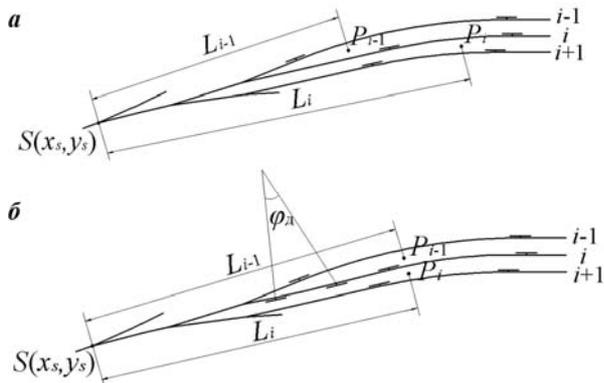


Рис. 5. Размещение точек возможной установки замедлителей  $P_i$  и  $P_{i-1}$ : а – до оптимизации; б – после оптимизации

При этом, если на выбранном пути отсутствует дополнительная кривая, то вначале определяется направление угла ее поворота  $\varphi_{ди}$  по соотношению расстояний  $L_{j-1}$  и  $L_j$ : в случае, если  $L_j > L_{j-1}$ , на пути необходимо устраивать  $S$ -образную кривую, в противном случае проектируется  $U$ -образная кривая.

Поиск величины угла дополнительной сопрягающей кривой  $\varphi_{ди}$ , который обеспечивает  $L_{i-1} = L_i$  равенство  $L_{j-1} = L_j$ , осуществляется методом дихотомии.

В некоторых случаях, когда вследствие особенностей конструкции пучка невозможно добиться равенства  $L_{j-1} = L_j$  для  $j$ -го пути, на очередном шаге итерации в качестве расчетного выбирается следующий путь, имеющий меньшее значение  $\Delta L$ .

Решение задачи оптимизации завершается, когда максимальная компонента вектора  $\mathbf{Z}$  (3)  $\Delta L_{\max}$  окажется меньше заданной точности решения  $\varepsilon$  ( $\Delta L_{\max} \leq \varepsilon$ ), либо если будет установлено, что данной точности достичь невозможно.

Для выбора рациональных значений параметров ( $f_{li}$ ,  $R_{oi}$ ,  $R_{di}$ ) при оптимизации углов  $\varphi_{ди}$  были выполнены исследования их влияния на конструкцию горловины. Установлено, что радиус дополнительной сопрягающей кривой  $R_{di}$  незначительно влияет на величину расстояний  $L_{i-1}$  и  $L_i$ , однако увеличение  $R_{di}$  приводит к возрастанию угла  $\varphi_{ди}$  при выполнении условия  $L_{i-1} = L_i$ , что увеличивает сопротивление движению скатывающихся отцепов. Кроме того, при достаточно больших значениях  $R_d$  вслед-

ствие увеличения длины дополнительной сопрягающей кривой, возможны случаи, когда не обеспечивается размещение основной сопрягающей кривой даже с минимальным радиусом; в этой связи при решении задачи оптимизации принято  $R_d = 200$  м.

Радиус  $R_0$  вначале принимается равным 180 м; при достижении условия  $L_{i-1} = L_i$  радиус основной сопрягающей кривой увеличивается до максимально возможного, если это не влияет на расположение точек  $P_{i-1}$  и  $P_i$ .

Как показали исследования, увеличение прямой вставки  $f_1$  при наличии дополнительной сопрягающей кривой ухудшает конструкцию плана сортировочного пути и всей горловой горловины. В качестве примера на рис. 6 для одного из путей горловины показано влияние длины вставки  $f_1$  на угол дополнительной сопрягающей кривой  $\varphi_d$  при разных величинах  $R_d$  и  $R_0$  (указаны, соответственно, в числителе и знаменателе), при которых выполняется условие  $L_{i-1} = L_i$ .

Каждый график имеет верхнее ограничение, поскольку существует некоторая предельная длина вставки  $f_{li}$ , при которой условие не может быть выполнено при любом значении угла дополнительной сопрягающей кривой  $\varphi_{ди}$ . Следует отметить, что при варьировании вставки  $f_{li}$  координаты точек  $P_{i-1}$ ,  $P_i$  остаются неизменными. В то же время, с увеличением  $f_1$  возрастает угол  $\varphi_d$ , что ухудшает условия скатывания отцепа на данный путь; указанная зависимость характерна как для  $S$ -образных, так и  $U$ -образных кривых.

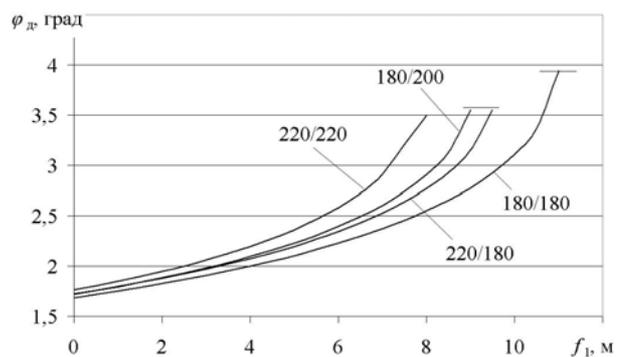


Рис. 6. Зависимость угла дополнительной кривой от длины вставки  $f_1$

В этой связи при необходимости устройства дополнительной кривой  $\varphi_d$  прямая вставка  $f_1$  не устраивается ( $f_1 = 0$ ). Таким образом, при решении задачи оптимизации для достижения

условия  $L_{i-1} = L_i$  достаточно варьировать только величину угла дополнительной сопрягающей кривой  $\varphi_{дi}$ .

При проектировании крайних путей пучков (кроме крайних путей горловины) необходимо учитывать дополнительные ограничения их параметров  $w$ , связанные с необходимостью обеспечения минимального междупутья  $e_{\min}$  между смежными пучками. Установлено, что на величину указанного междупутья основное влияние оказывают параметры кривых спускной части горочной горловины. Поэтому после определения допустимых значений векторов  $w$  для крайних путей пучков они фиксируются и дальнейшего участия в оптимизации не принимают.

Крайние пути горловины не имеют дополнительных сопрягающих кривых и их параметры при оптимизации также не варьируются.

После окончания оптимизации проверяется возможность увеличения радиусов основных сопрягающих кривых.

Если на  $i$ -м пути точки установки замедлителей  $P_{i-1}$  и  $P_i$  расположены за пределами данной кривой (рис. 7), то  $R_{oi}$  можно увеличивать с некоторым шагом  $\Delta R$ , пока разность координат  $x$  начала кривой и любой из точек не станет меньше величины  $\Delta R \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta + \varphi_{д}}{2}$ . При этом начинать увеличение  $R_o$  следует поочередно, начиная с путей, расположенных ближе к оси горловины. Это связано с тем, что  $R_o$  внутренних путей значительно больше внешних и нарушение указанного требования, при условии  $R_{oi-1} > R_{oi}$ , может привести к появлению новой точки  $P$ , расположенной значительно дальше от пучкового стрелочного перевода.

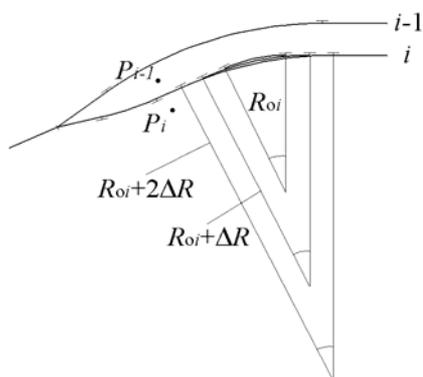


Рис. 7. Увеличение радиуса основной сопрягающей кривой

На рис. 8 показан план пучка путей горочной горловины (см. рис. 3) после оптимизации.

Как видно из рисунка, на всех путях пучка, за исключением 2 пути, выполняется требование  $\Delta L \leq \varepsilon$ .

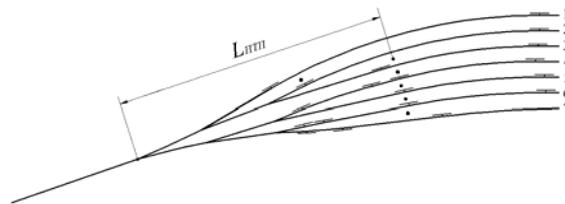


Рис. 8. План пучка путей горочной горловины после оптимизации

Выполненные исследования показали, что разработанная методика позволяет уменьшить длину горочной горловины на 20...30 м, и, таким образом, повысить качество проектирования сортировочных горок, снизив как капитальные затраты при их сооружении, так и эксплуатационные расходы при расформировании составов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бузанов, С. П. Проектирование механизированных и автоматизированных сортировочных устройств [Текст] / С. П. Бузанов, А. М. Карпов, М. А. Рыцарев. – М.: Транспорт, 1965. – 232 с.
2. Муха, Ю. А. Использование ЭВМ при расчете плана горочной горловины сортировочного парка [Текст] / Ю. А. Муха, В. И. Бобровский // Применение вычислительной техники в учебном процессе: Тр. вузов МПС. – Вып. 591. – М.: МИИТ, 1977. – С. 140-147.
3. Павлов, В. Е. Элементы оптимального проектирования плана горловины автоматизированной сортировочной горки [Текст] / В. Е. Павлов // Железнодорожные системы автоматики и телемеханики с применением бесконтактных элементов: Сб. науч. тр. ЛИИЖТа. – Вып. 314. – Л.: Транспорт, 1971. – С. 148-155.
4. Бобровский, В. И. Автоматизация проектирования стрелочных горловин сортировочных парков [Текст] / В. И. Бобровский // Совершенствование технических устройств и технологии управления процессом расформирования составов на сортировочных горках: Межвуз. сб. науч. тр. – Д.: ДИИТ, 1986. – С. 42-49.
5. Модели, методы и алгоритмы автоматизированного проектирования железнодорожных станций [Текст]: монография / В. И. Бобровский [и др.] – Д.: Изд-во Маковецкий, 2010. – 156 с.
6. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР. ВСН 207-89 [Текст]. – М.: Транспорт, 1992. – 104 с.

Поступила в редколлегию 01.12.2010.  
Принята к печати 06.12.2010.