

В. И. БОБРОВСКИЙ, А. И. КОЛЕСНИК, А. С. ДОРОШ (Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна)

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПЛАНА ПУТЕВОГО РАЗВИТИЯ ГОРОЧНЫХ ГОРЛОВИН

В даній статті запропонована методика, що дозволяє визначити найбільш раціональні параметри з'єднувальних кривих на коліях сортувального парку. При цьому критерієм оптимальності є мінімізація відстані від пучкового стрілочного переводу до уповільнювачів паркової гальмівної позиції. Такий підхід дозволяє скоротити довжину гіркової горловини і тим самим збільшити корисну довжину сортувальних колій. Викладена методика може бути використана під час реконструкції чи проектування плану колійного розвитку гіркових горловин.

В настоящей статье предложена методика, позволяющая определить наиболее рациональные параметры сопрягающих кривых на путях сортировочного парка. При этом критерием оптимальности является минимизация расстояния от пучкового стрелочного перевода до замедлителей парковой тормозной позиции. Такой подход позволяет сократить длину горочной горловины и тем самым увеличить полезную длину сортировочных путей. Изложенная методика может применяться при реконструкции и проектировании плана путевого развития горочных горловин.

The method permits to determine the most efficient parameters of connecting curves on sorting tracks is developed. The optimization criterion is minimization of distance from the first bunch switch to the seating of park car retarders. Such method of attack permits to reduce the necks length and increase the usable length of sorting tracks. This method can be applied during plan of the sorting tracks reconstruction and designing.

Перерабатывающая способность горки и пропускная способность сортировочной станции в целом, а также безопасность функционирования систем переработки вагонов во многом определяется конструкцией плана путевого развития горочной горловины. Следовательно, построение рационального плана горочной горловины является одной из важных задач при проектировании и реконструкции сортировочных горок.

Горочная горловина представляет собой систему взаимосвязанных прямолинейных и криволинейных участков. Кроме того, все элементы плана можно условно разделить на постоянные, параметры которых невозможно изменить в процессе проектирования (длина изолированных участков, угол и радиус поворотов в стрелочных переводах и др.), и те, параметры которых при расчетах могут варьироваться (величина углов поворотов на спускной части горловины, радиусы круговых кривых и др.). Поэтому при одинаковых исходных данных (количестве сортировочных и обходных путей, типе замедлителей) существует возможность построения множества вариантов горочных горловин, которые соответствуют требованиям [1]. При этом следует определить критерий оптимальности плана путевого развития горочной горловины и, изменяя в допустимых пределах параметры элементов плана, найти наиболее приемлемый вариант. Таким об-

разом, построение плана горочной горловины является достаточно сложной и трудоемкой задачей. Несмотря на важность существующей проблемы, в настоящее время отсутствует методология, которая позволяет определить наиболее рациональную конструкцию горловины по какому-либо критерию.

При расчете плана путевого развития горочных горловин существенные трудности возникают при выборе величин углов поворотов на спускной части горки. Если на маршруте скачивания размещается две и более кривые с неизвестными углами поворотов, однозначное определение их величин невозможно. При этом существует ряд подходов к построению плана путевого развития горочных горловин. Наиболее сложным является графический метод [2], который предполагает изначальное расположение пучков путей, с последующим аналитическим расчетом неизвестных углов поворотов на спускной части. В случае если осуществить сопряжение элементов при полученных величинах углов невозможно, производится смещение пучков относительно оси горловины и снова рассчитываются неизвестные углы.

Использование ЭВМ для расчета неизвестных параметров горловины позволяет ускорить и упростить проектирование. При этом в [3] предложено представление модели горловины в

виде ориентированного бинарного дерева, что позволяет рассчитать величину одного неизвестного угла по маршруту скатывания отцепов. Иным подходом является применение для масштабного проектирования горловин программного комплекса AutoCAD с функциональным языком программирования AutoLISP [4]. Несмотря на значительное ускорение проектирования горловин, проблема выбора рациональных значений неизвестных углов остается нерешенной.

Формализация задачи выбора значений неизвестных углов была сделана в [5], где предложена методика оптимизации проектирования трассы расчетного пути по критерию ее минимальной длины от вершины горки до расчетной точки. С использованием метода множителей Лагранжа 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 параметры элементов плана внутренних пучков горловины.

Кроме выбора величин углов неизвестных кривых на спускной части горки немаловажной проблемой является определение наилучших параметров сопрягающих кривых на сортировочных путях. От качества проектирования плана сортировочных путей зависит длина горловины, полезная длина путей, а также сопротивление движению скатывающихся отцепов. Для решения данной задачи в [6] 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. Установлено [6], что во многих случаях на сортировочных путях требуется предусматривать дополнительные сопрягающие кривые с различными параметрами и направлением поворота.

Отсутствие критерия и сложность формализации не позволяет до настоящего времени получить точное решение задачи выбора рациональных параметров сопрягающих кривых. В этой связи в [7] предложен интерактивный метод решения данной задачи, который позволяет с помощью ЭВМ осуществлять подбор допустимых параметров конструкции плана сортировочных путей.

Таким образом, в результате анализа научных работ в данной статье была поставлена задача разработки методики, которая позволит усовер-

шенствовать конструкцию плана горочной горловины путем оптимизации параметров сопрягающих кривых на сортировочных путях.

Сопряжение элементов плана спускной части и сортировочных путей может быть выполнено одним из трех способов: основная и дополнительная сопрягающие кривые направлены в разные стороны (*S*-образная кривая, рис. 1, а), в одну сторону (*U*-образная кривая, рис. 1, б), при отсутствии дополнительной сопрягающей кривой (рис. 1, в).

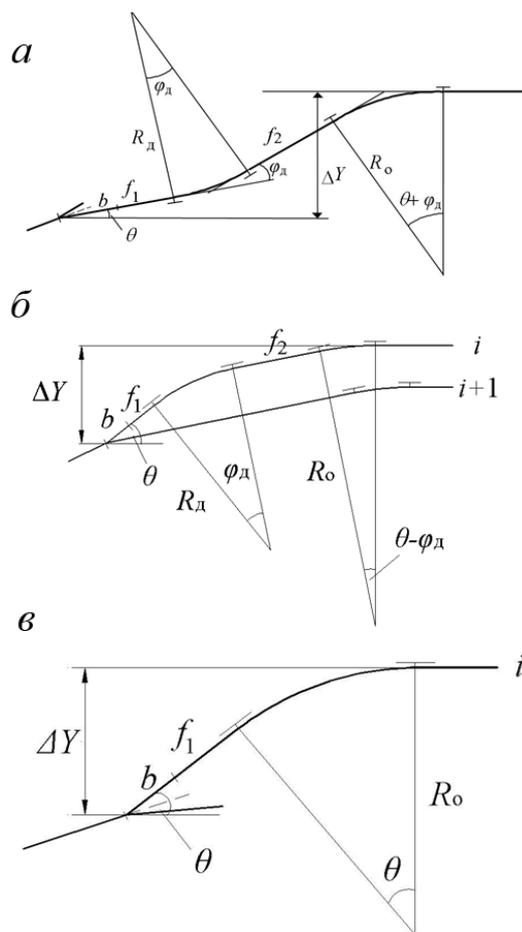


Рис. 1. Типы сопрягающих кривых: а) *S*-образная кривая; б) *U*-образная кривая; в) без дополнительной кривой

План участка сопряжения (см. рис. 1, а) 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 оси 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) принимаются 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.

Таким образом, при проектировании плана сопрягающих кривых возникает задача выбора рациональных значений параметров  $f_{1i}, \varphi_{di}, R_{oi}, R_{di}, i=1...M$ , 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. Для ликвидации указанного недостатка предложена методика оптимизации конструкции сопрягающих кривых на сортировочных путях.

Очевидно, что параметры сопрягающих кривых оказывают непосредственное влияние на размещение парковых тормозных позиций (ПТП). Особенно вопрос оптимизации сопрягающих кривых актуален при использовании замедлителей, которые допускается располагать в кривых (РНЗ-2) определенного радиуса.

Следовательно, возникает задача определения для каждого сортировочного пути вектора параметров  $\mathbf{w}_i = (f_{1i}, \varphi_{di}, R_{oi}, R_{di})$ , при которых ПТП размещаются на минимальном расстоянии от головных стрелочных переводов соответствующих пучков. Оптимизация по указанному критерию позволит сократить длину горловины тем самым увеличить полезную длину путей сортировочного парка.

Для решения данной задачи целесообразно ввести понятие точки возможной установки замедлителей  $P$ , от которой расстояния до осей двух смежных путей равны  $\frac{e_{\min}}{2}$ , где

$e_{\min}$  – минимально допустимое междупутье при определенном способе размещения замедлителей. На рис. 2 показаны схемы возможного расположения замедлителей парковых тормозных позиций в кривых и точки  $P$ .

В соответствии с [1] парковые тормозные позиции можно располагать «вразбежку» в месте, где междупутье составляет не менее

4,8 м (рис. 2 а) и в створе при  $e_{\min} = 5,1$  м (рис. 2 б). Таким образом, величина  $e_{\min}$  различна в зависимости от способа взаимного размещения замедлителей.

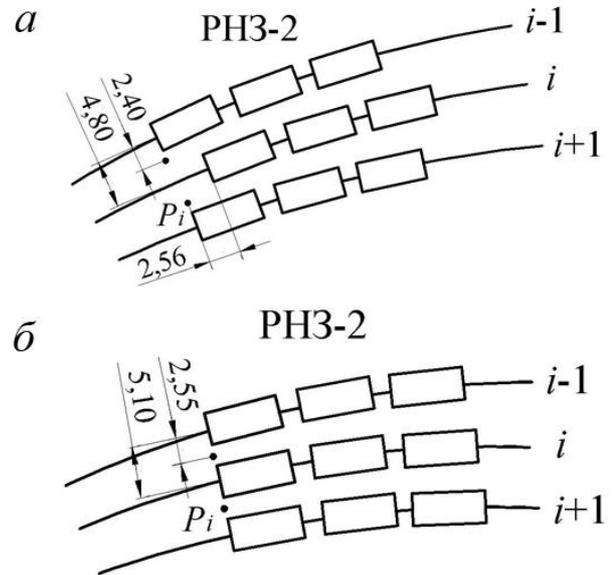


Рис. 2. Схемы расположения замедлителей парковой тормозной позиции: а) «вразбежку»; б) в створе

Указанные точки установки замедлителей  $P_i, i=1...m-1$ , где  $m$  – число путей в пучке, располагаются во всех междупутьях пучка на расстоянии  $L_i$  от его головной стрелки, которое зависит от вектора параметров  $\mathbf{w}_i$  путей  $(i, i+1)$ .

Учитывая требование о взаимном расположении замедлителей (см. рис. 2), парковые тормозные позиции в пучке будут располагаться на расстоянии от первого пучкового стрелочного перевода (точка  $S$ ) не меньшем, чем  $L_{ПТП}$ , которое соответствует наиболее удаленной точке  $P_i$ , т.е.  $L_{ПТП} \geq \max\{L_i\}, i=1...m-1$  (рис. 3).

В то же время, очевидно, существует некоторое сечение  $kk'$ , в котором расстояние между крайними путями пучка составляет  $e_{\min} \cdot (m-1)$ . Расстояние от пучковой стрелки до сечения  $kk'$  представляет собой нижнюю границу возможного размещения ПТП, которая в данном случае находится на минимальном расстоянии  $L_{\min}$  от головного стрелочного перевода пучка.

Таким образом, при данном значении вектора  $\mathbf{w}_i$  путей на каждом из них имеется участок  $\Delta L = L_{ПТП} - L_{\min}$ , который нерационально уве-

личивает длину горочной горловины. При этом развернутая длина «лишнего» участка в целом для пучка составляет  $m\Delta L$  м. Следовательно, возникает задача выбора такой совокупности

параметров  $\mathbf{w}_i$ , при которых величина  $L_{\text{ППП}}$  достигает минимума.

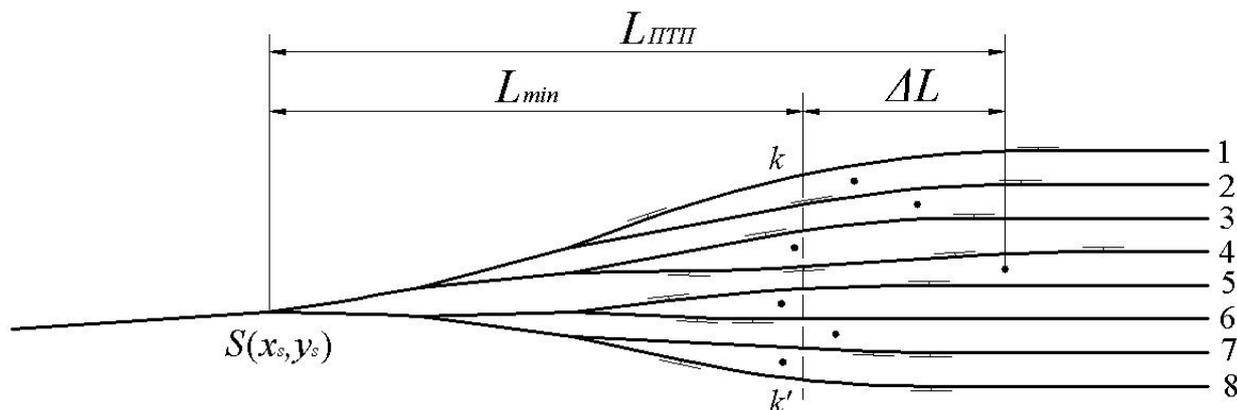


Рис. 3. План пучка путей горочной горловины

При решении поставленной задачи, в качестве частного критерия оптимизации конструкции сопрягающих кривых выбрана числовая функция, представляющая собой абсолютную величину разности  $\Delta L_i$  расстояний  $L_{i-1}$  и  $L_i$ , соответственно, между точками  $(S, P_{i-1})$ , а также  $(S, P_i)$ .

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

В связи с тем, 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  $L_{i-1} = f_{i-1}(\mathbf{w}_i)$ ,  $L_i = f_i(\mathbf{w}_i)$  параметров сопрягающей кривой  $i$ -го пути.

Указанные числовые функции  $\Delta L_i$ ,  $i = 2 \dots m-1$  образуют векторный критерий  $\mathbf{Z} = (\Delta L_2, \dots, \Delta L_{m-1})$ , принимающий значения в арифметическом критериальном пространстве  $\mathbb{R}^{m-2}$ ; при этом в векторе  $\mathbf{Z}$  составляющие частные критерии  $\Delta L_i$  должны быть упорядочены по убыванию.

Таким образом, задача оптимизации конструкции плана сопрягающих кривых на сортировочных путях пучка, которая содержит множество возможных решений  $\mathbf{X}$  и векторный критерий  $\mathbf{Z}$ , является многокритериальной задачей.

Оптимальным решением поставленной задачи является некоторое значение  $\mathbf{W}^*$  вектора параметров путей пучка  $\mathbf{W} = (\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_m)$ ,

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  $\mathbf{W}$ :

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

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

где  $\mathbf{R}$  – множество допустимых значений радиусов кривых на сортировочных путях в соответствии с правилами проектирования сортировочных устройств [1].

При решении сформулированной задачи оптимизации применяется итеративная схема расчета. 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  $P_i$ . Следует заметить, что оптимизация расположения точек возможной установки замедлителей осуществляется при некоторых фиксированных значениях углов поворотов кривых на спускной части. Как показали исследования, при разных величинах указанных углов расстояние  $L_{\text{ППП}}$  может существенно изменяться.

Точка  $P_i$  определяется путем пересечения эквидистант двух смежных путей с номерами  $(i, i+1)$ , построенных для каждого из этих путей в их общем междупутье (рис. 4). Под эквидистантой понимается геометрическое место точек, удаленных от данной кривой на расстоя-

ние  $\frac{e_{\min}}{2}$ . Таким образом, кривые  $a$  и  $b$  являются эквидистантами соответственно  $i$ -го и  $i+1$  путей.

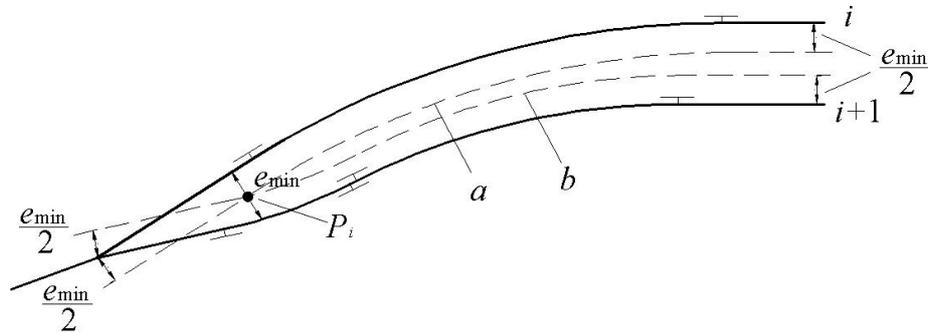


Рис. 4. Схема определения точки  $P_i$  с использованием эквидистант

Построение эквидистант и поиск точки их пересечения возможен с помощью метода вычислительной геометрии. Его основным недостатком является сложность расчетов, что существенно затрудняет 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.

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

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

Каждый элемент  $j$  эквидистанты 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  $P_i$  и решить уравнение  $S_a(x) - S_b(x) = 0$ .

После определения координат точек пересечения эквидистант выполняется расчет расстояний  $L_i$  от пучкового стрелочного перевода до всех точек  $P_i$  пучка.

$$L_i = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2}, \quad (4)$$

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

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

При этом 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  $\mathbf{Z}$ , которые упорядочивают по убыванию. После этого выбирают путь с номером  $j$ , у которого разность  $\Delta L_i$  является максимальной (первая компонента текущего значения вектора  $\mathbf{Z}$ ), и для данного пути решают задачу оптимизации конструкции сопрягающей кривой с использованием частного критерия  $\Delta L_j$ ; в результате величина  $\Delta L_j$  достигает минимума.

Выбор направления поворота дополнительной сопрягающей кривой с углом  $\varphi_{di}$  определяется 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 равенство  $L_{j-1} = L_j$ , осуществляется методом дихотомии.

Возможна ситуация, при которой, вследствие особенностей конструкции пучка, невозможно достичь равенства  $L_{j-1} = L_j$  для  $j$ -го пути. Тогда на очередном шаге итерации в качестве расчетного выбирается следующий путь, имеющий меньшее значение  $\Delta L$ .

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

С целью определения рациональных значений параметров ( $f_{li}, R_{oi}, R_{di}$ ) в процессе оптимизации углов  $\varphi_{ди}$  были выполнены исследования их влияния на конструкцию горловины. Установлено, что, при достаточно больших значениях  $R_d$  вследствие увеличения длины дополнительной сопрягающей кривой, возможны случаи, когда не обеспечивается размещение основной сопрягающей кривой даже с минимальным радиусом. В то же время радиус дополнительной сопрягающей кривой  $R_{di}$  незначительно влияет на величину расстояний  $L_{i-1}$  и  $L_i$ , однако увеличение  $R_{di}$  ведет к увеличению угла  $\varphi_{ди}$  (при условии  $L_{i-1} = L_i$ ), что увеличивает сопротивление движению скатывающихся отцепов. В этой связи при решении задачи оптимизации принято  $R_d = 200$  м, что соответствует минимально допустимому радиусу круговых кривых на спускной части горочной горловины [1].

Радиус основной сопрягающей кривой  $R_0$  изначально принимается равным минимально допустимому ( $R_0 = 180$  м). При достижении условия  $L_{i-1} = L_i$  величина  $R_0$  увеличивается до максимально возможного, если это не приводит к изменению координат точек  $P_{i-1}$  и  $P_i$ .

Установлено, что увеличение прямой вставки  $f_1$  при наличии дополнительной сопрягающей кривой ухудшает конструкцию плана сортировочного пути и всей горочной горловины. На рис. 5 для одного из путей горловины показано влияние длины вставки  $f_1$  на угол дополнительной сопрягающей кривой  $\varphi_d$  при разных

величинах  $R_d$  и  $R_0$ , при условии  $L_{i-1} = L_i$ . При этом, график *a* соответствует условию  $R_d = 220$  м,  $R_0 = 220$  м, *б* –  $R_d = 180$  м,  $R_0 = 200$  м, *в* –  $R_d = 220$  м,  $R_0 = 180$  м и *г* –  $R_d = 180$  м,  $R_0 = 180$  м.

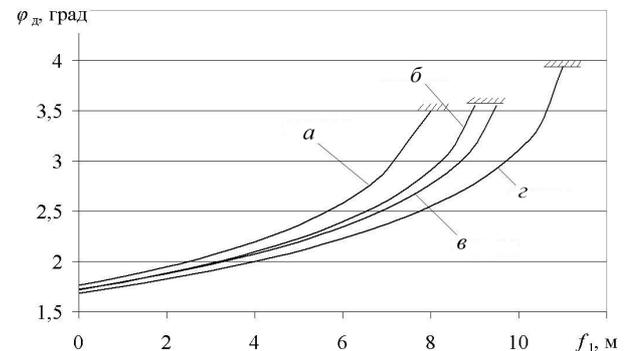


Рис. 5. Графики зависимости угла дополнительной сопрягающей кривой от длины вставки  $f_1$

Все графики сверху имеют ограничение, поскольку очевидно существует некоторая предельная длина вставки  $f_1$ , при которой условие  $L_{i-1} = L_i$  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. Как видно из графиков, с увеличением  $f_1$  возрастает угол  $\varphi_d$ , что ухудшает условия скатывания отцепа на данный путь; при этом интенсивность роста величины угла  $\varphi_d$  существенно возрастает с увеличением длины вставки  $f_1$ . Подобная зависимость  $\varphi_d(f_1)$  характерна как для *S*-образных, так и *U*-образных кривых.

Поэтому, в случае необходимости устройства дополнительной кривой  $\varphi_d$  в процессе оптимизации 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  $\varphi_{ди}$ .

При проектировании крайних путей пучков необходимо учитывать дополнительные ограничения их параметров  $\mathbf{w}$ , связанные с необходимостью обеспечения минимального междупутья  $e_{\min}$  между смежными пучками. Как показали исследования, на величину указанного междупутья главным образом оказывают влияние параметры кривых спускной части горочной горловины. Поэтому после определения допустимых зна-

чений векторов  $w$  для крайних путей пучков они фиксируются и дальнейшего участия в оптимизации не принимают.

После окончания оптимизации проверяется возможность увеличения радиусов основных сопрягающих кривых, если это не приводит к изменению координат точек  $P_{i-1}$  и  $P_i$ .

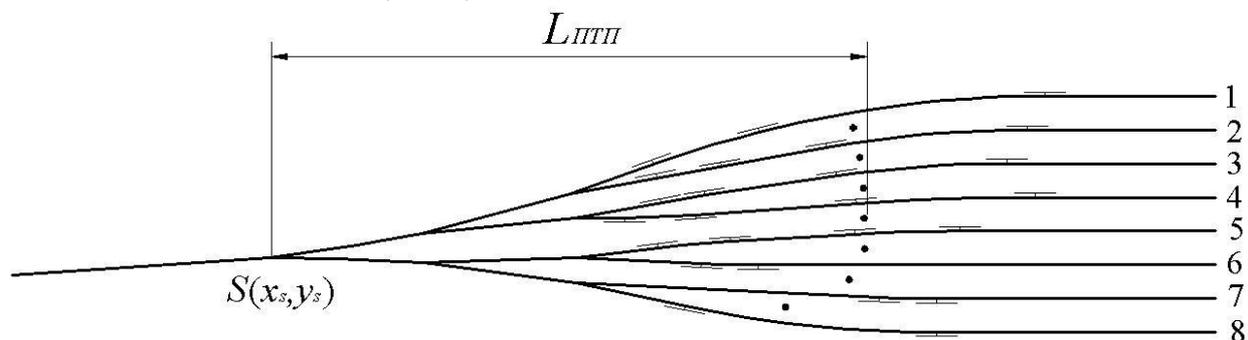


Рис. 6. План пучка путей горочной горловины после оптимизации

Как показали выполненные исследования, разработанная методика позволяет сократить длину горочной горловины на 20...30 м. При этом увеличивается полезная длина путей сортировочного парка и снижаются эксплуатационные расходы на расформирование составов, что свидетельствует о более качественном проектировании горочной горловины по сравнению с исходным вариантом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР. ВСН 207-89 [Текст]. – М.: Транспорт, 1992. – 104 с.
2. Бузанов, С. П. Проектирование механизированных и автоматизированных сортировочных устройств [Текст] / С. П. Бузанов, А. М. Карпов, М. А. Рыцарев. – М.: Транспорт, 1965. – 232 с.
3. 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.
4. Чернов, В. Н. Автоматизация масштабного проектирования и расчета сортировочных горок

На рис. 6 показан план пучка путей горочной горловины (см. рис. 3) после оптимизации. Как видно из рисунка, на всех путях пучка, за исключением 7 пути, выполняется требование  $\Delta L \leq \epsilon$ .

[Текст] / В. Н. Чернов // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ., 2004, № 4. – С. 83–87.

5. 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. научн. тр. ЛИИЖТа. - Вып. 314. - Л.: Транспорт, 1971. – с. 148-155.

6. 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. научн. тр. – Д.: ДИИТ, 1986. – с. 42–49.

7. Бобровский, В. И. Модели, методы и алгоритмы автоматизированного проектирования железнодорожных станций [Текст]: монография // В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин. – Д.: Изд-во Маковецкий, 2010. – 156 с.

Поступила в редколлегию 11.02.2011.

Принята к печати 18.02.2011.