

*Бобровский В.И., д.т.н., проф., зав. каф. «Станции и узлы» (ДНУЖТ)*

*Колесник А.И., аспирант каф. «Станции и узлы» (ДНУЖТ)*

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ПЛАНА ГОРОЧНЫХ ГОРЛОВИН**

**Введение.** Определение рациональной конструкции плана путевого развития горочной горловины представляет собой одну из наиболее сложных задач при проектировании сортировочной горки. Специфика проблемы состоит в необходимости увязки всех требований к размещению устройств механизации и автоматики с элементами плана и профиля. Кроме того, при проектировании нужно учитывать множество ограничений, которые накладываются на конструкцию горки; при этом параметры ряда элементов плана не могут быть определены однозначно.

К указанным элементам следует, в первую очередь, отнести дополнительные кривые на спускной части горки, которые обеспечивают допустимое междупутье между пучками и позволяют существенно сократить длину горочной горловины. Следует отметить, что при двух и более кривых с неизвестными углами поворота по маршруту скатывания отцепов, существует множество вариантов выбора их значений. При этом, необходимо учитывать, что при определенных величинах углов данных кривых конструкция горловины перестает отвечать нормативным требованиям. Таким образом, определение рациональных углов поворота дополнительных кривых является достаточно сложной пробле-

мой, возникающей при расчете плана путевого развития горочной горловины.

**Постановка задачи.** Одним из наиболее сложных и трудоемких способов определения неизвестных углов на спускной части горочной горловины является графический метод [1]. Суть данного метода заключается в предварительном графическом выборе положения пучков путей с последующим аналитическим расчетом углов поворота соединительных кривых. При этом, в тех случаях, когда выполнить сопряжение элементов плана при полученных величинах углов невозможно, производится смещение пучков относительно оси горловины и расчет повторяется. Существенным недостатком графического метода является неопределенность выбора параметров конструкции горловины, а также отсутствие критерия, позволяющего оценить качество проектируемой горловины.

Для ликвидации указанного недостатка в [2] предложена методика, которая позволяет с помощью метода множителей Лагранжа определить величины неизвестных углов на трассе расчетного пути. При этом критерием оптимальности является минимум длины маршрута от вершины горки до предельного столбика последнего разделительного стрелочного перевода. Однако данный подход не учитывает влияние углов расчетного пути на параметры элементов плана остальных путей горловины, вследствие чего он не получил широкого распространения.

С целью упрощения процедуры поиска неизвестных углов на спускной части в [3] предложено определять угол поворота кривых, расположенных перед противошерстной стрелкой, исходя из длины предстрелочного участка. Данный подход имеет существенные недостатки, поскольку из-за малого отклонения приходится увеличивать длину горочной горловины. Кроме того, велика вероятность невозможности сопряжения элементов плана на внутренних сортировочных путях.

Одним из основных требований к плану горочных горловин является обеспечение минимального междупутья между смежными пучками. В связи с этим,

в [4] неизвестные углы поворота определяются исходя из минимального расстояния между пучками. При этом проектирование выполняется, начиная с внутренних пучков, к которым постепенно присоединяют внешние. Следует отметить, что данный подход не учитывает изменения угла наклона осей пучков к оси горловины (базису) в процессе проектирования, что может привести к невозможности вписывания сопрягающих кривых на некоторых сортировочных путях. Кроме того, изложенную методику можно применять только для симметричных горочных горловин.

Таким образом, как показал анализ существующих способов определения дополнительных углов поворота кривых на спускной части, их величины определяются либо подбором, либо без учета влияния на другие элементы конструкции горловины. Очевидно, что при таком подходе невозможно оценить качество проектирования горочной горловины и выбрать наиболее рациональный вариант. Следовательно, возникает необходимость разработки метода, который позволит выявить и всесторонне оценить все возможные значения углов поворотов кривых спускной части горочных горловин.

***Построение области допустимых углов кривых спускной части горочной горловины.*** В данной работе представлен метод, который дает возможность на основе системного подхода определить в комплексе все множество неизвестных углов поворота на спускной части, что позволяет ускорить процесс и улучшить качество проектирования плана путевого развития горочной горловины.

В типовых конструкциях горочных горловин углы поворота кривых в пучках известны и определяются длиной стандартных конструктивных вставок между стрелочными переводами при определенном радиусе круговой кривой. Следовательно, неизвестными являются углы поворота, расположенные между вершиной горки и пучковыми стрелочными переводами. При этом на большинстве горок средней и большой мощности на каждом маршруте скатывания от-

цепов число таких кривых не превышает двух с величинами углов, соответственно,  $\beta_1$  и  $\beta_2$ .

Как показывает анализ, существует достаточно большое число допустимых решений задачи выбора значений пары углов  $(\beta_1, \beta_2)$ , при которых обеспечивается выполнение всех конструктивных требований к горловине. В этой связи возникает задача поиска области допустимых углов (ОДУ) на координатной плоскости  $\beta_1\beta_2$ , каждая точка  $(\beta_1, \beta_2)$  которой обеспечивает допустимую конструкцию горочной горловины. В дальнейшем ОДУ должна использоваться для решения задачи оптимизации конструкции горочной горловины.

Для разработки метода построения ОДУ вначале были выполнены исследования влияния величин углов  $\beta_1, \beta_2$  на конструкцию пучков горловины и отдельных сортировочных путей. С этой целью трасса каждого сортировочного пути была представлена в виде ломаной линии, для чего предварительно кривые были заменены их тангенсами (рис. 1).

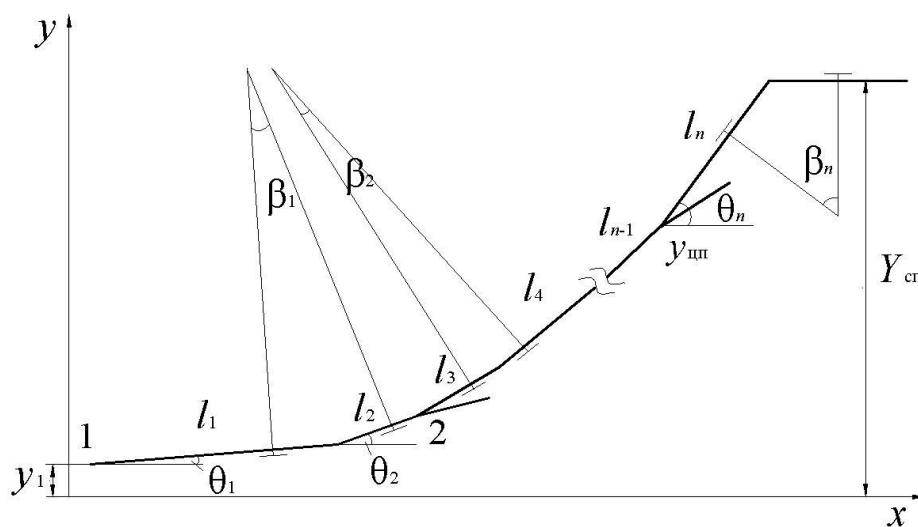


Рисунок 1 – Схема трассы сортировочного пути

При этом неизвестные углы  $\beta_1, \beta_2$  можно рассматривать как независимые переменные уравнений, в которых ордината каждого сортировочного пути  $Y_{сп}$  представляется как сумма проекций отрезков его трассы на ось  $OY$  [5]

$$Y_{\text{сп}} = y_1 + \sum_{i=1}^n l_i \sin \theta_i, \quad (1)$$

где  $y_1$  – ордината первого разделительного стрелочного перевода;

$l_i$  – длина  $i$ -го элемента трассы;

$\theta_i$  – угол наклона  $i$ -го элемента к базису;

$n$  – число элементов трассы.

Длина последнего элемента трассы  $l_n$  представляется суммой (рис. 2)

$$l_n = b + f + T_{\beta n}, \quad (2)$$

где  $b$  – расстояние от центра стрелочного перевода до торца крестовины;

$f$  – длина прямой вставки между торцом крестовины последнего стрелочного перевода и началом сопрягающей кривой;

$T_{\beta n}$  – величина тангенса сопрягающей кривой.

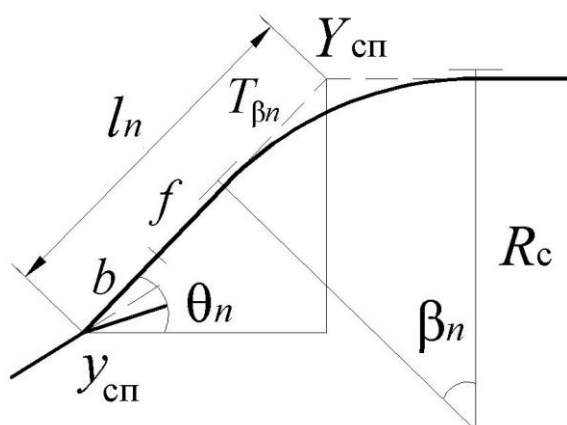


Рисунок 2 – Схема определения прямой вставки  $f$  на сортировочном пути

При этом, как видно из рис. 2, длину указанного элемента  $l_n$  (2) можно определить по разности ординат сортировочного пути  $Y_{\text{сп}}$  и центра последнего стрелочного перевода  $y_{\text{цп}}$

$$l_n = \frac{Y_{\text{сп}} - y_{\text{цп}}}{\sin \theta_n} \quad (3)$$

Тогда величина прямой вставки  $f$  между торцом крестовины последней стрелки и началом сопрягающей кривой определяется как

$$f = \frac{Y_{\text{сп}} - y_{\text{шп}}}{\sin \theta_n} - (b + T_{\beta n}), \quad T_{\beta n} = R \operatorname{tg} \frac{\theta_n}{2}, \quad \theta_n = \beta_n \quad (4)$$

Величина угла  $\theta_n$  может быть определена как алгебраическая сумма углов  $\alpha_i$  стрелочных переводов и углов  $\beta_j$  поворота дополнительных кривых на трассе сортировочного пути

$$\theta_n = \sum_{i=1}^m \alpha_i + \sum_{j=1}^p \beta_j; \quad (5)$$

очевидно, что в состав  $\theta_n$  входят и неизвестные углы  $\beta_1, \beta_2$ .

Таким образом, вставку  $f$  можно рассматривать как функцию двух независимых переменных  $f = F(\beta_1, \beta_2)$ , поскольку от величин углов  $\beta_1, \beta_2$  зависят как ордината  $y$ , так и угол  $\theta_n$ .

Основным требованием, которому должны удовлетворять углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , является обеспечение сопряжения последних разделительных стрелочных переводов пучков с сортировочными путями кривыми допустимого радиуса. Для определения области допустимых значений указанных углов необходимо установить множество их предельных комбинаций, при которых вставка  $f = 0$  при минимальном допустимом радиусе сопрягающей кривой  $\min\{R_c\}$ , принимаемом в соответствии с нормативами [6]. Для решения поставленной задачи необходимо исследовать взаимосвязь величин углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  с использованием неявной функции  $F(\beta_1, \beta_2) = 0$ , поскольку выражение (4) не представляется возможным разрешить относительно одного из углов  $\beta$  и получить явную функцию аналитическими методами.

В этой связи для получения зависимости  $\beta_2 = \varphi(\beta_1)$  в работе использованы вычислительные методы. В частности, для расчетного сортировочного пути была рассмотрена некоторая совокупность значений угла  $\beta_1$ , для которых рассчитывалась величина  $\beta_2$  при вставке  $f = 0$  и минимальном радиусе сопрягающей кривой  $R_c = 180$  м. Учитывая сложность аналитического решения уравнения (1),

для определения неизвестного угла  $\beta_2$  разработано программное обеспечение, которое позволяет решить данную задачу, используя итерационный метод [7].

Практически для решения поставленной задачи угол  $\beta_1$  варьировался с шагом  $\Delta\beta = 1^\circ$  и для каждого из этих значений рассчитывался неизвестный угол  $\beta_2$  для заданного сортировочного пути. Как показали исследования, между данными углами существует функциональная зависимость  $\beta_2 = \varphi(\beta_1)$ , графиком которой является прямая линия (рис. 3).

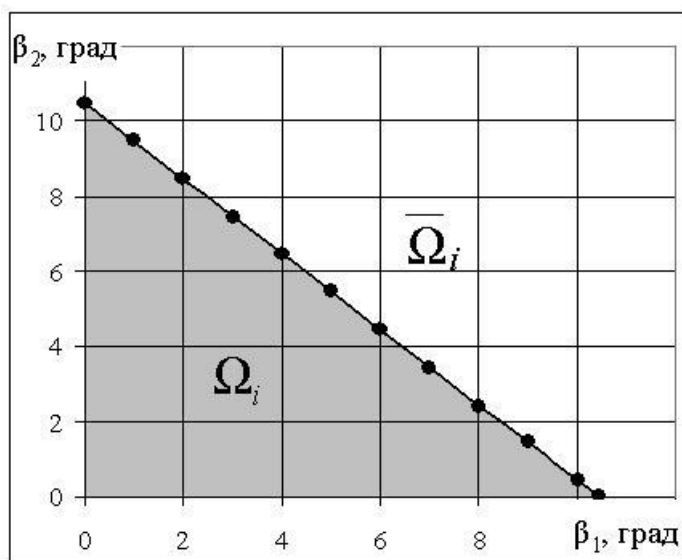


Рисунок 3 – Схема определения допустимой полуплоскости  $\Omega_i$

Как видно из рисунка, график функции  $\beta_2 = \varphi(\beta_1)$  делит координатную плоскость  $\beta_1\beta_2$  на две полуплоскости  $\Omega_i$  и  $\overline{\Omega_i}$ , в одной из которых ( $\Omega_i$ ) вставка  $f > 0$ , а в другой –  $f < 0$ ; на линии  $\beta_2 = \varphi(\beta_1)$  вставка  $f = 0$ . Таким образом, установлено, что углы поворота, соответствующие координатам произвольной точки  $P(\beta_1; \beta_2)$  полуплоскости  $\Omega_i$ , позволяют выполнить проектирование сопрягающей кривой на данном пути допустимым радиусом ( $R_c \geq R_{\min}$ ). Напротив, все точки, которые принадлежат другой полуплоскости  $\overline{\Omega_i}$ , соответствуют недопустимым комбинациям значений углов  $(\beta_1, \beta_2)$ .

С целью нахождения ОДУ для горловины необходимо найти множество допустимых полуплоскостей  $\{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m\}$  для всех  $m$  сортировочных путей, и определить область  $\Omega$ , которая принадлежит всем  $m$  полуплоскостям, т.е. найти их пересечение  $\Omega = \Omega_1 \cap \Omega_2 \cap \dots \cap \Omega_m$ .

Для определенности рассмотрим предложенный метод построения ОДУ для конкретной горловины, представленной на рис. 4. Данная горловина симметрична и состоит из 30 путей, сгруппированных в четыре пучка, из которых крайние пучки неполные.

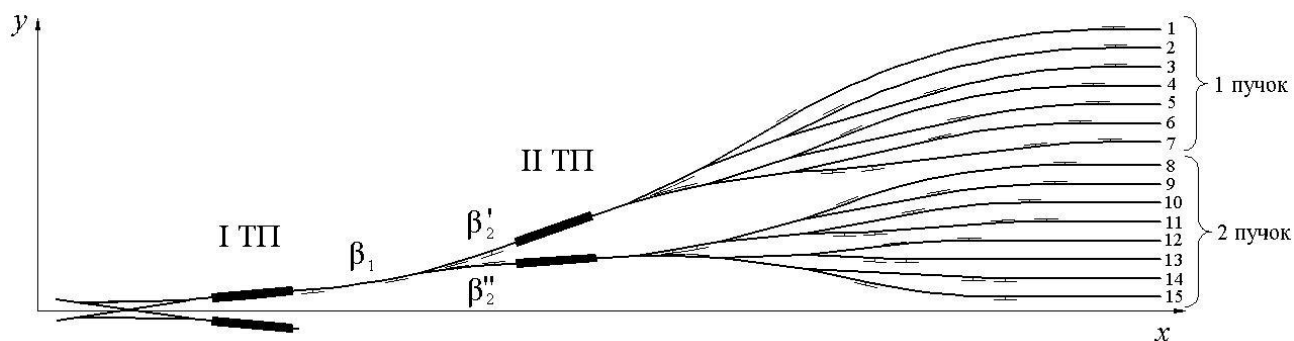


Рисунок 4 – План симметричной горочной горловины на 30 путей

Как видно из рисунка, на трассе каждого сортировочного пути расположены две дополнительные кривые с неизвестными углами:  $\beta_1, \beta'_2$  для путей первого пучка и  $\beta_1, \beta''_2$  – для путей второго пучка. В соответствии с [5] вагонные замедлители II ТП, которые расположены перед пучковыми стрелками, следует располагать в створе, где междупутье не меньше нормативной величины  $e_{\min}$ . Для выполнения указанного требования целесообразно, чтобы углы  $\beta'_2$  и  $\beta''_2$  были одинаковы. Тогда по маршруту скатывания отцепа на любой из сортировочных путей располагаются две кривые с углами поворота  $\beta_1$  и  $\beta_2$ .

Первоначально были получены зависимости  $\beta_2 = \varphi(\beta_1)$  (см. рис. 3) для всех сортировочных путей внешнего пучка горочной горловины. Установлено, что угловые коэффициенты  $k$  всех полученных прямых отрицательны (для всех путей пучка абсолютная величина коэффициента составляет 1,004-1,005).



Следует отметить, что значение коэффициента  $k$  зависит от расстояния между кривыми  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . Так, в случае расположения ВТП за кривой  $\beta_1$ , абсолютная величина  $k$  для путей первого пучка составляет 1,144 – 1,186; при этом, с увеличением расстояния между кривыми наблюдается рост коэффициента  $k$ .

Допустимые полуплоскости  $\{\Omega_1 \cap \Omega_2 \cap \dots \cap \Omega_7\}$  всех путей пучка ограничены графиками  $\beta_2 = \varphi(\beta_1)$  справа (рис. 5); цифрами обозначены номера путей, для которых построены соответствующие прямые.

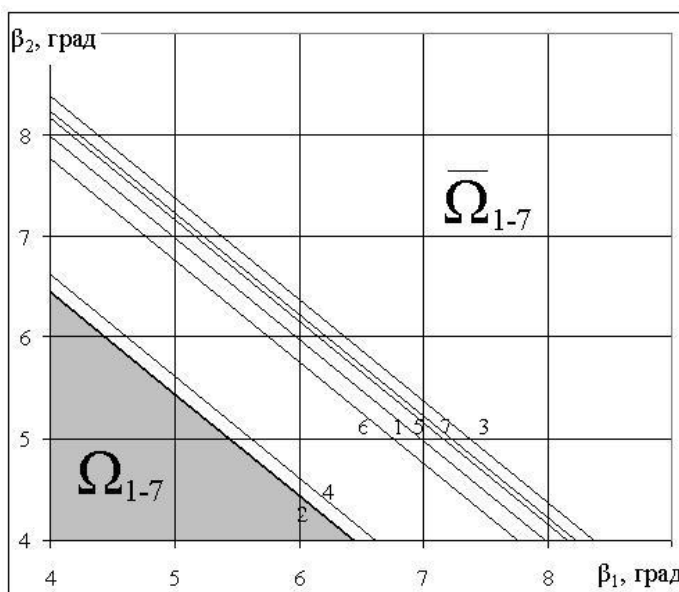


Рисунок 5 – ОДУ для путей верхнего пучка

Таким образом, областью допустимых углов  $\beta_1, \beta_2$  для путей 1 пучка является область  $\Omega_{\text{д.в.}} = \Omega_1 \cap \Omega_2 \cap \dots \cap \Omega_7$ . Как видно из рис. 5, ограничивающим полуплоскость  $\Omega_{\text{д.в.}}$  является 2-й путь, который, таким образом, является наиболее трудным по условию вписывания сопрягающих кривых на путях пучка.

Аналогично были построены графики  $\beta_2 = \varphi(\beta_1)$  для путей второго пучка. В отличие от первого пучка, угловые коэффициенты  $k$  указанных графиков положительны и в достаточной степени отличаются друг от друга. При этом, аналогично с путями 1 пучка, с увеличением расстояния между кривыми  $\beta_1$  и  $\beta_2$  величина углового коэффициента  $k$  возрастает. Характерной особенностью ОДУ

второго пучка является расположение области  $\Omega_{8-15}$  между графиками  $\beta_2 = \varphi(\beta_1)$  соответствующих путей (рис. 6). Так, для рассматриваемой горловины ОДУ 2 пучка ограничена графиками  $\beta_2 = \varphi(\beta_1)$  для 8 пути справа и для 13 пути слева.

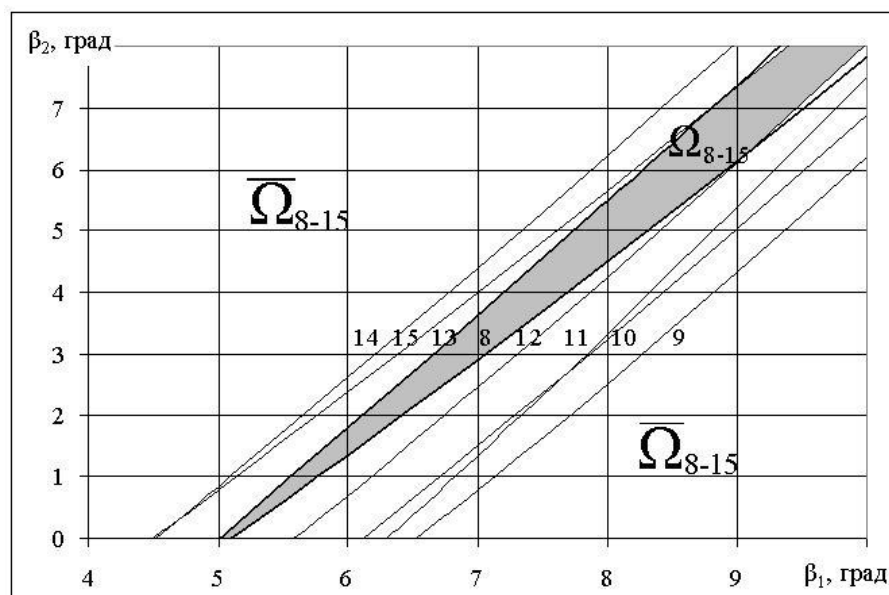


Рисунок 6 – ОДУ для путей внутреннего пучка

Как показали исследования, знак углового коэффициента  $k$  и расположение соответствующей допустимой полуплоскости  $\Omega_i$  зависят от направления поворота кривых с углами  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  и  $\beta_n$  на трассе данного пути (см. рис. 1). Так, знак углового коэффициента зависимости  $\beta_2 = \varphi(\beta_1)$  определяется направлением поворота кривых с углами  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . В частности, в случае поворота указанных кривых в одну и ту же сторону (трассы путей первого пучка) угловой коэффициент отрицательный; это означает, что увеличение одного из углов требует соответственного уменьшения другого угла. При повороте кривых в разные стороны (трассы путей второго пучка) угловой коэффициент положительный, поскольку в этом случае увеличение одного из углов требует соответственного увеличения другого угла. Такое согласованное изменение углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  позволяет сохранять положение пучков путей горловины при их варьировании.

На расположение допустимой полуплоскости  $\Omega_i$  влияет направление поворота сопрягающей кривой  $\beta_n$  на сортировочном пути, которое определяется соотношением ординат центра последнего разделительного стрелочного перевода  $y_{цп}$  и оси пути  $Y_{сп}$ . Так, в случае  $y_{цп} < Y_{сп}$  (пути 1–12, см. рис.4) поворот кривой осуществляется по часовой стрелке и допустимая полуплоскость  $\Omega_i$  ограничена графиком  $\beta_2 = \varphi(\beta_1)$  справа; в случае  $y_{цп} > Y_{сп}$  (пути 13–15) – поворот кривой осуществляется против часовой стрелки и допустимая полуплоскость  $\Omega_i$  ограничена графиком  $\beta_2 = \varphi(\beta_1)$  слева.

Таким образом, для рассматриваемой горловины на координатной плоскости  $\beta_2 \text{--} \beta_1$ , найдена область  $\Omega = (\Omega_1 \cap \Omega_2 \cap \dots \cap \Omega_7) \cap (\Omega_8 \cap \Omega_9 \cap \dots \cap \Omega_{15})$ , все точки которой принадлежат допустимым полуплоскостям  $\Omega_{1-15}$  всех сортировочных путей горловины (рис. 7).

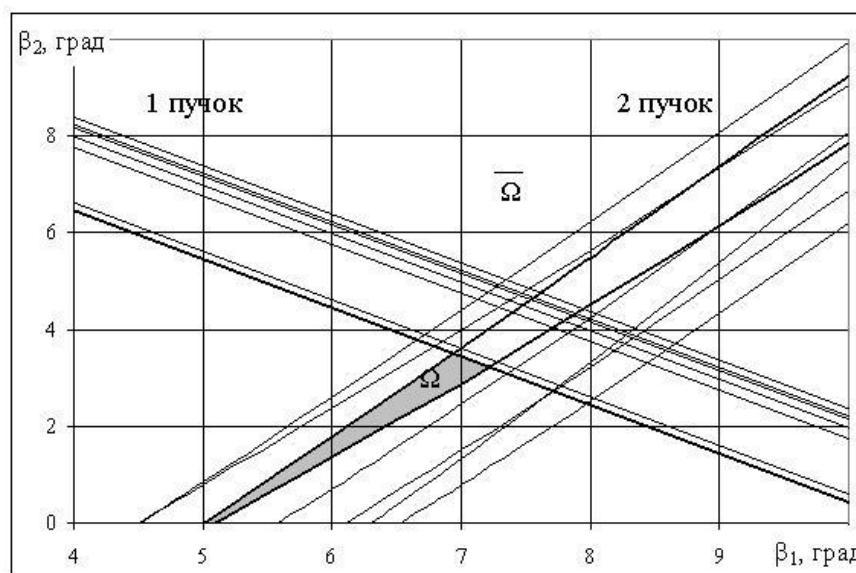


Рисунок 7 – Определение ОДУ для всех путей горловины

Дополнительное ограничение полученной ОДУ связано с необходимостью обеспечения минимального расстояния между смежными пучками. Установлено, что величина междупутья между пучками зависит только от величины угла  $\beta_2$ , который в этой связи не может быть меньше определенного значения  $\beta_{2min}$ , обеспечивающего минимальное нормативное расстояние между ними  $e_{min}$ . Сле-

довательно, графиком указанного ограничения является прямая, параллельная оси абсцисс, которая ограничивает ОДУ снизу (прямая  $\beta_{2\min}$ , рис. 8). Таким образом, для представленной горловины область допустимых углов  $\Omega$  представляет собой выпуклый многоугольник ABCD, который образован графиками  $\beta_2 = \varphi(\beta_1)$  2-го, 8-го и 13-го путей и линией  $\beta_2 = \beta_{2\min}$  (рис. 8).

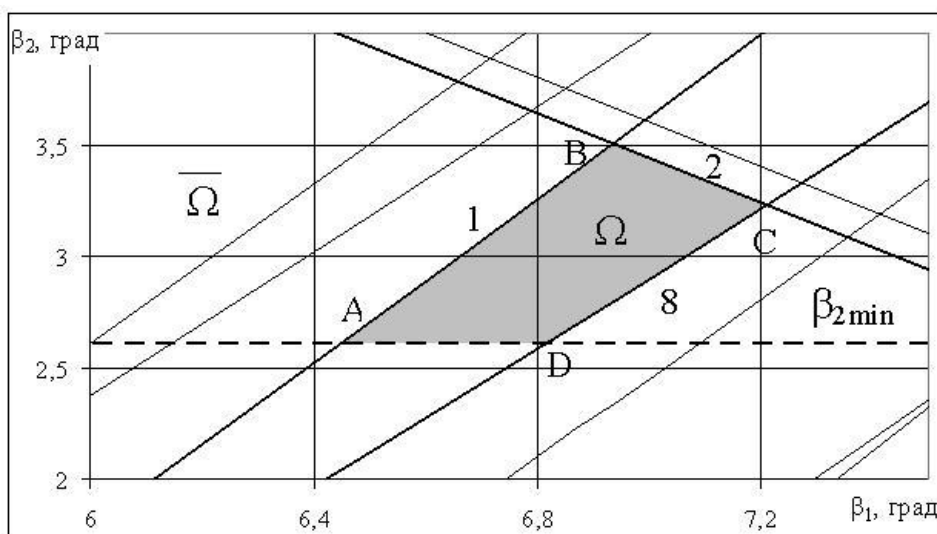


Рисунок 8 – Область допустимых углов горловины

При построении ОДУ горловины следует учитывать необходимость обеспечения минимального междупутья  $e_{3\min}$  между замедлителями II ТП, величина которого зависит от типа применяемых замедлителей. При этом необходимо учитывать, что при достаточно больших углах поворота кривых  $\beta_2$  необходимое междупутье  $e_3$  образуется за счет длин этих кривых ( $e_3 \geq e_{3\min}$ ). В то же время при малых значениях угла  $\beta_2$  следует предусматривать дополнительную прямую вставку  $L$  между концом кривой и началом тормозной позиции, которая позволит обеспечить минимальную величину  $e_{3\min}$  (рис. 9). Установлено, что между величинами  $\beta_2$  и  $L$  существует обратная зависимость  $L = \varphi(\beta_2)$ , которая, в свою очередь, оказывает влияние на взаимосвязь величин углов  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . Это приводит к некоторой нелинейности графиков  $\beta_2 = \varphi(\beta_1)$  в зоне малых углов  $\beta_2$ , что необходимо учитывать при построении и анализе ОДУ горловины.

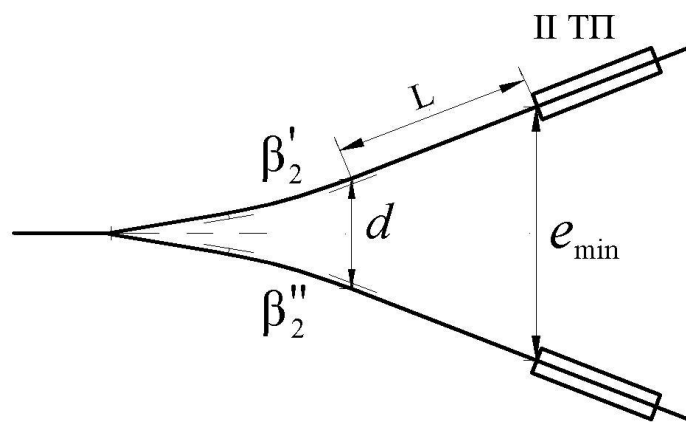


Рисунок 9 – Схема определения вставки  $L$  для обеспечения междупутья  $e_{\min}$

На основе выполненных исследований было разработано программное обеспечение, которое позволяет автоматизировать процесс построения ОДУ для заданной конструкции горловины. Программный продукт представляет собой усовершенствование геометрической модели плана горочной горловины в виде ориентированного бинарного дерева  $D=(V, E)$  [7]. Он позволяет получить совокупность функциональных зависимостей  $\beta_2 = \varphi(\beta_1)$  между углами поворота кривых на спускной части горки для всех сортировочных путей, и на их основе построить графическое изображение ОДУ с использованием методов вычислительной геометрии.

**Выводы.** Таким образом, разработанный метод построения ОДУ позволяет существенно упростить и ускорить процесс синтеза планов горочных горловин. Наличие ОДУ дает возможность перейти от применявшегося ранее метода подбора допустимой конструкции горочной горловины к ее обоснованному выбору. При этом, анализ ОДУ позволяет учесть существенное влияние величин углов поворота кривых горочной горловины на высоту и продольный профиль горки и за счет этого повысить качество проектирования сортировочных горок.

### Список литературы

1. Проектирование механизированных и автоматизированных сортировочных устройств / С.П. Бузанов, А.М. Карпов, М.А. Рыцарев. – М.: Транспорт,

1965. – 232 с.

2. Павлов В.Е. Элементы оптимального проектирования плана горловины автоматизированной сортировочной горки / Павлов В.Е. // Железнодорожные системы автоматики и телемеханики с применением бесконтактных элементов: Сб. научн. тр. ЛИИЖТа. - Вып. 314. - Л.: Транспорт, 1971. - с. 148 – 155.

3. Проектирование сортировочных устройств (горок повышенной, большой и средней мощности) / В.И. Апатцев, В.Я. Болотный, А.Н. Сухопяткин // Учебное пособие – М.: РГОТУПС, 2004. – 136 с.

4. Проектирование сортировочных горок / Л.Н. Иванкова, А.Н. Иванков // Учебное пособие. – Иркутск: ИрГУПС, 2005. – 137 с.

5. Проектирование механизированных и автоматизированных сортировочных горок / Б.А. Родимов, В.Е. Павлов, В.Д. Прокинова. – М.: Транспорт, 1980. – 96 с.

6. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР. ВСН 207-89. – М.: Транспорт, 1992. – 104 с.

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