

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

В даній статті розроблено метод комплексного розрахунку висоти та поздовжнього профілю сортувальної гірки. Отримана конструкція профілю забезпечує докочування відцепів до розрахункової точки при мінімальній висоті гірки. Використання запропонованого методу під час проектування сортувальних гірок дозволить зменшити експлуатаційні витрати на розформування составів та підвищити якість сортувального процесу.

Ключеві слова: сортувальна гірка, коефіцієнт увігнутості, профіль, розформування, розрахункова точка.

В данной статье разработан метод комплексного расчета высоты и продольного профиля сортировочной горки. Полученная конструкция профиля обеспечивает докатывание отцепов до расчетной точки при минимальной высоте горки. Использование предложенного метода при проектировании сортировочных горок позволит снизить эксплуатационные расходы на расформирование составов и повысит качество сортировочного процесса.

Ключевые слова: сортировочная горка, коэффициент вогнутости, профиль, расформирование, расчетная точка.

The method of the complex calculation of a height and a longitudinal profile of a sorting hump is given in this article. The received construction of the profile is ensuring the roll cuts to the target point with the minimum height of the hump. Using of this method during design of the sorting humps allow to reduce the operating costs to breaking up of trains and to increase the quality of the sorting process.

Key words: sorting hump, concavity factor, profile, breaking, target point.

Расформирование составов является одним из наиболее важных технологических процессов сортировочных станций, который требует значительных энергетических затрат. Существенное влияние на качество сортировочного процесса оказывает продольный профиль сортировочной горки. Совместно с установленными режимами торможения, параметры профиля определяют динамику скатывания вагонов, влияют на величину интервалов между отцепами, скорость их соударения, а также степень заполнения сортировочных путей. В этой связи оптимизация параметров продольного профиля горки, с целью минимизации эксплуатационных расходов, представляет собой весьма важную задачу, которую необходимо решать при проектировании сортировочных горок. Сложность расчета продольного профиля заключается в выборе критерия его оптимальности, а также необходимости учета всего комплекса технико-технологических требований, которым должна соответствовать конструкция горки. Как показал анализ научных публикаций, существует ряд критериев оптимизации параметров профиля сортировочной горки.

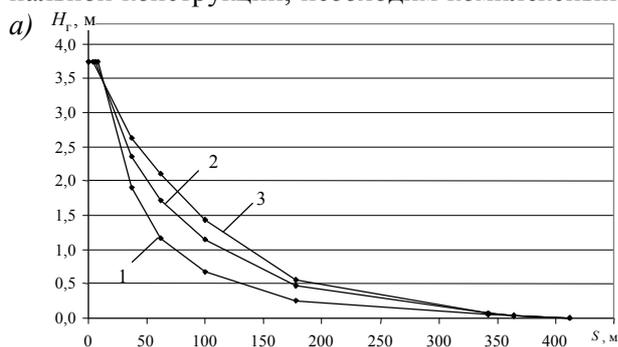
В [1] наиболее рациональной считается конструкция профиля, которая обеспечивает максимальную скорость роспуска составов V_{\max} .

Такой подход позволяет сократить горочный технологический интервал и увеличить перерабатывающую способность горки. Однако, в связи с применением ручной расцепки вагонов на вершине горки, максимальная скорость роспуска ограничивается требованиями охраны труда и не может превышать установленной величины V'_{\max} . Следовательно, выбор скорости роспуска в качестве критерия оптимальности конструкции продольного профиля не является рациональным.

На показатели качества сортировочного процесса существенное влияние оказывает прицельное регулирование скорости отцепов парковыми тормозными позициями, от эффективности которых зависят скорость соударения отцепов и величина окон между ними на сортировочных путях. В этой связи в работе [2] в качестве критерия оптимизации профиля горки используется потребная мощность парковой тормозной позиции, которую предложено минимизировать. Однако уменьшение мощности парковых позиций приводит к необходимости увеличения торможения отцепов на спускной части горки, что может отрицательно сказаться на условиях разделения отцепов на разделительных элементах.

С целью получения наибольших интервалов на разделительных элементах в работе [3] продольный профиль сортировочных горок рекомендуется проектировать в виде брахистохроны. Однако подобный профиль горки обеспечивает минимальное время движения только при свободном скатывании отцепов. В то же время, как показано в [4], применение на спускной части горки тормозных средств, необходимых для регулирования интервалов между отцепами с разными ходовыми свойствами, не позволяет на горках с профилем циклоидальной формы обеспечить минимальное время скатывания отцепов.

Как показал анализ научных работ, общим недостатком существующих методов оптимизации продольного профиля сортировочных горок является то, что поиск рациональных значений уклонов элементов профиля выполняется при фиксированной высоте горки. В то же время, на динамику скатывания отцепов оказывает влияние, как параметры профиля, так и высота сортировочной горки, которая определяет потенциальную энергию отцепа на вершине горки. Следовательно, для получения рациональной конструкции, необходим комплексный



расчет высоты и продольного профиля сортировочной горки.

Целью настоящей работы является разработка методики определения параметров продольного профиля, который обеспечивает минимальную высоту сортировочной горки при условии докатывания плохого бегуна до расчетной точки и обеспечения необходимых интервалов между отцепами на разделительных элементах. Минимизация высоты сортировочной горки позволит сократить эксплуатационные расходы на надвиг и роспуск составов, снизить потребляемую мощность замедлителей спускной части горки, а также уменьшить расходы на вытягивание группы отцепов из сортировочного парка в случае необходимости их повторной сортировки.

Пользуясь методом имитационного моделирования, установлена зависимость скорости скатывания отцепов от конструкции продольного профиля горки. Так, на рис. 1 показаны варианты продольного профиля при одинаковой высоте сортировочной горки (рис. 1, а), а также графики скорости свободного скатывания плохого бегуна при данных профилях (рис. 1, б).

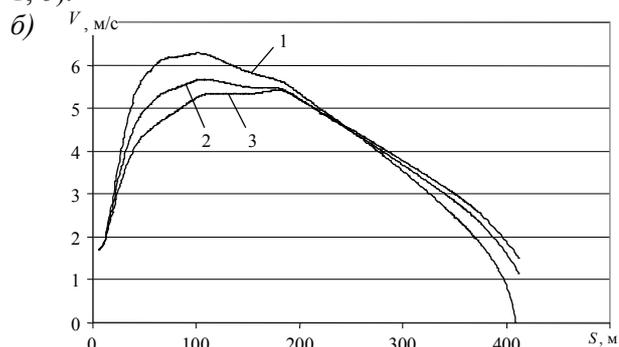


Рис. 1. Влияние конструкции горки на динамику скатывания отцепов:
а – варианты продольного профиля; б – графики $V = f(S)$ плохого бегуна

Как видно из рисунка, при одинаковой высоте горки H_g динамика скатывания отцепа ОП и его скорости в расчетной точке при разных профилях горки существенно отличаются. Указанное различие объясняется тем, что с увеличением скоростного уклона скорость отцепов на этом участке возрастает, что влечет за собой увеличение сил сопротивления движению и, как следствие, снижение скорости в расчетной точке. В то же время действующими Правилами проектирования сортировочных устройств [5] при расчете высоты горки установлена средняя скорость движения отцепа, которая не зависит параметров профиля. Так, например, для участка от ВГ до первой тормозной позиции ($S_{тп1} = 71,1$ м) средняя скорость движения

по профилям 1, 2 и 3 соответственно равна $\bar{V}_1 = 4,62$ м/с, $\bar{V}_2 = 4,08$ м/с и $\bar{V}_3 = 3,68$ м/с, при нормативной величине $\bar{V} = 4,2$ м/с. Следовательно, при проектировании сортировочных горок необходим комплексный подход к расчету их высоты и продольного профиля.

В соответствии с [5] высота горки должна обеспечивать докатывание отцепов до расчетной точки $S_{рт}$. В то же время, при профиле 1 (см. рис. 1, а) плохой бегун не докатывается до расчетной точки, тогда как при профиле 3 скорость отцепа ОП в точке $S_{рт}$ выше допустимой скорости соударения вагонов. Очевидно, что в первом случае высоту горки необходимо увеличить, тогда как во втором случае имеет место

избыток энергии отцепа в расчетной точке, вследствие чего высота горки может быть уменьшена. Таким образом, данный пример показывает, что для обеспечения докатывания отцепа до расчетной точки $S_{рт}$ высота горки $H_{г}$ должна соответствовать ее продольному профилю. Это означает, что при одних и тех же расчетных условиях высота горки может изменяться в зависимости от ее профиля. В этой связи в настоящей работе в качестве критерия оптимизации продольного профиля принята высота сортировочной горки, которую необходимо минимизировать. Такой подход позволит уменьшить расходы как на надвиг составов на горку, так и на торможение скатывающихся отцепов.

При определении рациональной конструкции горки следует в комплексе рассматривать всю совокупность элементов ее продольного профиля на участке от вершины горки до расчетной точки. Параметром, характеризующим профиль горки в целом, может служить коэффициент вогнутости μ , который определяется как:

$$\mu = 1 - \frac{P}{P_{\max}}, \quad (1)$$

где P – площадь продольного сечения сортировочной горки при некотором профиле;

P_{\max} – максимально возможная площадь продольного сечения горки.

Площадь P (рис. 2) представляет собой сумму площадей трапеций, образованные линией продольного профиля и горизонтальной линией на уровне расчетной точки:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (2)$$

где n – число элементов профиля.

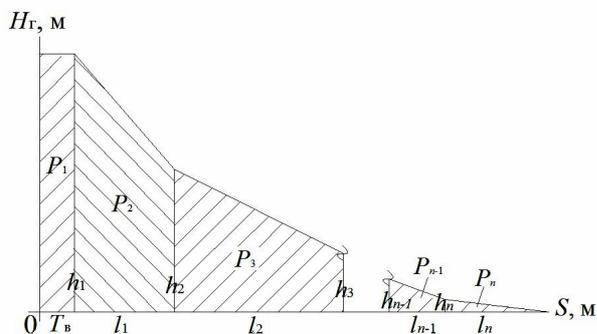


Рис. 2. Схема определения площади продольного сечения горки

Продольный профиль горки, которому соот-

ветствует величина P_{\max} , представляет собой однородный уклон от условной вершины горки до расчетной точки.

Тогда выражение для расчета коэффициента μ можно представить как

$$\mu = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{P_{\max}} = 1 - \frac{2 \left(T_{в} H_{г} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i + h_{i+1}}{2} \cdot l_i \right) \right)}{H_{г} \left(2T_{в} + \sum_{i=1}^n l_i \right)}, \quad (3)$$

где $H_{г}$ – высота сортировочной горки;

$T_{в}$ – тангенс вертикальной кривой на вершине горки;

h_i, h_{i+1} – высота точек перелома профиля, соответственно, в начале и конце i -го элемента профиля;

l_i – длина i -го элемента профиля.

Как показали исследования, при постоянной высоте горки между коэффициентом вогнутости профиля μ и скоростью отцепа ОП в расчетной точке $V_{рт}$ при его свободном скатывании существует функциональная связь $V_{рт} = f(\mu)$, график которой приведен на рис. 3.

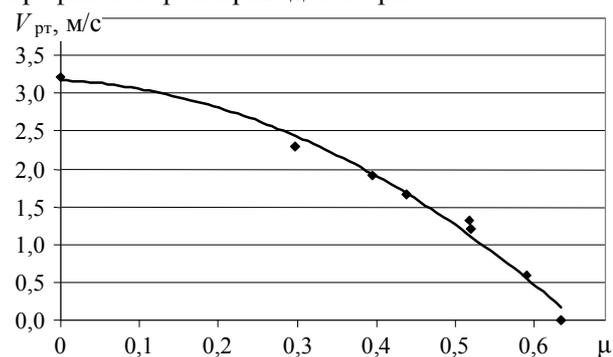


Рис. 3. График зависимости скорости $V_{рт}$ от коэффициента вогнутости μ .

Из рис. 3 видно, что с ростом величины коэффициента вогнутости наблюдается существенное снижение скорости отцепа в расчетной точке; значение коэффициента μ_0 , при котором скорость отцепа ОП в расчетной точке $V_{рт} = 0$, в дальнейшем именуется базовым.

При этом установлено, что скорость $V_{рт}$ практически не зависит от значений уклонов отдельных элементов профиля. В качестве примера на рис. 4 приведены различные варианты продольного профиля при фиксированной высоте горки, которые обеспечивают остановку отцепа ОП в расчетной точке ($V_{рт} = 0$).

Параметры показанных на рис. 4 профилей приведены в табл. 1.

Уклоны элементов продольного профиля сортировочной горки

№ профиля	$i_1, \%$	$i_2, \%$	$i_{П1}, \%$	$i_{пр}, \%$	$i_{П2}, \%$	$i_{сз}, \%$	$H_r, \text{ м}$	$S_{пр}, \text{ м}$	μ_0
1	40,0	39,0	27,2	2,1	2,1	1,5	3,75	412,0	0,662
2	50,0	44,0	12,0	4,0	4,0	1,8			0,664
3	60,0	33,0	12,0	4,7	4,7	1,8			0,665

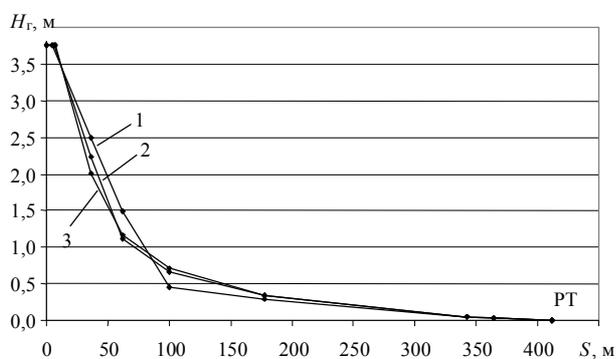
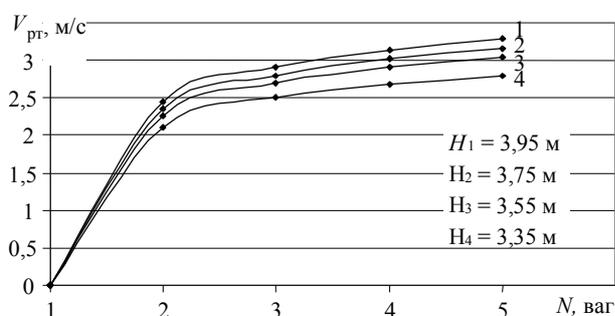


Рис. 4. Варианты профиля с одинаковым коэффициентом вогнутости.

Как видно, базовый коэффициент вогнутости μ_0 для всех рассмотренных вариантов профилей практически одинаков.

Установлено, что количество вагонов в отцепе также существенно влияет на его скорость $V_{рт}$ в расчетной точке. На рис. 5 приведены графики зависимости $V_{рт}$ от количества вагонов в отцепе для горок различной высоты с коэффициентом вогнутости μ_0 .

Рис. 5. Зависимость $V_{рт}$ от количества вагонов в отцепе.

Из рис.5 видно, что с увеличением числа вагонов в отцепе его скорость в расчетной точке существенно возрастает. Следовательно, при проектировании сортировочной горки, достаточно учитывать динамику движения только одновагонного отцепя.

Как показали исследования, между высотой горки H_r и базовым коэффициентом вогнутости μ_0 существует линейная зависимость. Для примера на рис. 6 приведены графики зависи-

мости $H_r = f(\mu_0)$ для горок с различной длиной горловины $S_{пр}$.

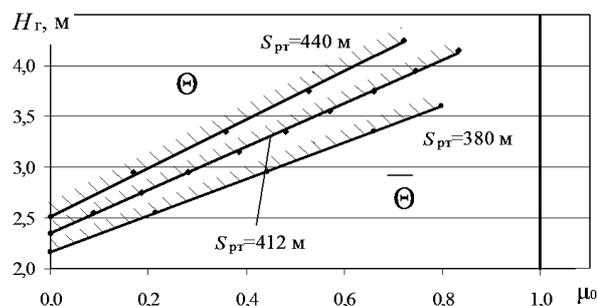


Рис. 6. Зависимость высоты горки от базового коэффициента вогнутости для горок с различной длиной горловины

Как видно из рисунка, с увеличением вогнутости профиля и, соответственно, коэффициента μ_0 требуемая высота горки, обеспечивающая докатывание отцепя ОП до расчетной точки, существенно возрастает.

Заметное влияние на высоту горки H_r оказывает также расчетная длина горочной горловины $S_{пр}$, с увеличением которой возрастает работа сил сопротивления движению отцепов и, следовательно, высота горки.

Для получения зависимостей $H_r = f(\mu_0)$ предварительно с помощью имитационного моделирования скатывания отцепя ОП на горке с определенной величиной $S_{пр}$ были получены отдельные пары значений (μ_0, H_r) . В дальнейшем с использованием регрессионного анализа были получены линейные уравнения $H_r = f(\mu_0)$. Так, например, для горки с длиной горловины $S_{пр}=412$ м, данная функция имеет вид

$$H_r = 2,3475 + 2,1356\mu_0 \quad (4)$$

График функции $H_r = f(\mu_0)$ делит координатную плоскость $\mu_0 0H_r$ на две полуплоскости Θ и $\bar{\Theta}$ (см. рис. 6). При этом точки (μ_0, H_r) , принадлежащие полуплоскости Θ , соответ-

вуют допустимым конструкциям горки с заданной длиной $S_{пр}$, которые обеспечивают докатывание отцепа ОП до расчетной точки со скоростью $V_{пр} \geq 0$. Напротив, точки (μ_0, H_r) , принадлежащие нижней полуплоскости $\bar{\Theta}$, соответствуют конструкциям, которые не обеспечивают докатывание отцепа ОП до расчетной точки. И, наконец, точки (μ_0, H_r) на линии $H_r = f(\mu_0)$ соответствуют таким конструкциям горки, при которых отцеп ОП докатывается до расчетной точки со скоростью $V_{пр}=0$. Таким образом, поиск рациональной конструкции горки должен осуществляться в верхней полуплоскости Θ .

Как следует из рис. 6, минимальная высота горки обеспечивается при $\mu_0=0$; при этом, как было указано выше, продольный профиль горки представляет собой однородный уклон от условной вершины горки до расчетной точки. Однако, такая конструкция горки не соответствует существующим требованиям к проектам сортировочных горок и поэтому возникает задача определения минимального значения μ_0 , при котором учитываются все действующие ограничения [5]. Для решения данной задачи разработана методика, позволяющая на основе системного подхода определить рациональную высоту и профиль сортировочной горки.

В данной методике на первом этапе определяются уклоны скоростного участка из условия обеспечения минимального интервала на первом разделительном элементе (стрелке и/или замедлителе ТП1) между отцепами ОП₁–ОХ₂ при максимальной скорости роспуска V'_{max} . Выбор минимального интервала на первой стрелке при ее расположении до ТП1 является допустимым, поскольку в данном случае возможные погрешности реализации режимов торможения отцепов не влияют на интервалы между ними.

Уклоны участков стрелочной зоны, парковой тормозной позиции и сортировочных путей принимаются в соответствии с Правилами проектирования сортировочных устройств [5].

Таким образом, неизвестными являются уклоны первой $i_{тп1}$, второй $i_{тп2}$ тормозных позиций и промежуточного элемента $i_{пр}$, которые могут быть представлены вектором $\mathbf{I} = (i_{тп1}, i_{пр}, i_{тп2})$. Задача определения наиболее рациональной конструкции профиля горки сводится к нахож-

дению такого вектора \mathbf{I}^* , при котором обеспечивается докатывание отцепа до расчетной точки при минимальной высоте сортировочной горки.

$$H_r \rightarrow \min, \text{ при } \mu \geq \mu_0 \quad (5)$$

При этом необходимо учитывать ограничения

$$\begin{cases} i_{тп1} \geq 12 \text{ ‰}, \\ i_{пр} \geq 7 \text{ ‰}, i_{тп2} \geq 7 \text{ ‰}, \\ i_1 \geq \dots \geq i_{тп1} \geq i_{пр} \geq i_{тп2} \geq \dots \geq i_n; \end{cases} \quad (6)$$

Для решения поставленной задачи предварительно выполнены исследования влияния параметров вектора \mathbf{I} на высоту горки и коэффициент вогнутости ее профиля, результаты которых приведены на рис. 7.

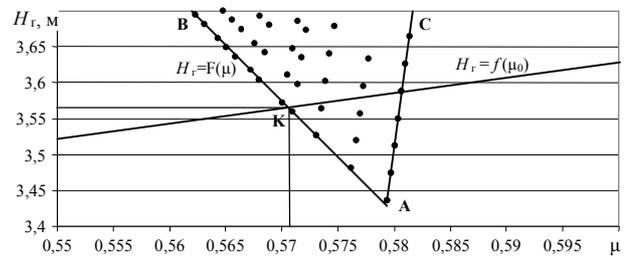


Рис. 7. Область возможных значений H_r и μ при допустимых параметрах вектора \mathbf{I} .

Как видно из рисунка, все множество возможных значений H_r и μ принадлежит области, ограниченной прямыми АВ и АС. Очевидно, что минимальная высота горки H_r соответствует точке А, с параметрами вектора $\mathbf{I} = (12, 7, 7)$. Однако данная точка принадлежит полуплоскости $\bar{\Theta}$ с недопустимыми значениями H_r и μ , вследствие чего проект горки указанной конструкции не может быть реализован. Из рисунка видно, что значения H_r , имеющие минимальную величину коэффициента μ , расположены на прямой АВ. Используя методы регрессионного анализа, данная прямая может быть представлена функцией $H_r = F(\mu)$.

Кроме того, как показал анализ, для всех горок, с параметрами (H_r, μ) , которые принадлежат прямой АВ, уклон первой тормозной позиции равен $i_{тп1} = 12 \text{ ‰}$. Таким образом, уклон $i_{тп1}$ целесообразно проектировать равным его минимальному значению.

Очевидно, что рациональная конструкция профиля горки минимальной высоты H_r с ко-

эффицентом вогнутости μ_0 , который обеспечивает докатывание отцепа до расчетной точки, соответствует точке К (μ_0, H_r) пересечения прямых $H_r = F(\mu)$ и $H_r = f(\mu_0)$. Координаты указанной точки могут быть получены в результате решения системы уравнений

$$\begin{cases} H_r = f(\mu_0) \\ H_r = F(\mu) \end{cases} \quad (7)$$

Уклоны i_{np} и $i_{тп2}$ принадлежат вектору **I**, соответствующему точке, ближайшей к найденной точке К. При необходимости промежуточный участок и ТП2 можно проектировать одним элементом профиля с уклоном

$$i_{cp} = \frac{H_r - \sum_{j=1}^m i_j l_j}{l_{np} + l_{тп2}}, \quad (8)$$

где m – количество элементов профиля с известными значениями уклонов;

$l_{np}, l_{тп2}$ – соответственно, и элемента второй тормозной позиции.

Как показали исследования, расчет продольного профиля с использованием предложенной методики позволяет снизить высоту горки на 7...10 % по сравнению с существующими подходами к проектированию сортировочных горок, что дает возможность умень-

шить энергетические затраты на переработку вагонов и повысить качество сортировочного процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пособие по применению Правил и норм проектирования сортировочных устройств [Текст] / под ред. Ю. А. Мухи. – М.: Транспорт, 1994. – 220 с.
2. Огарь, А. Н. Методика оптимизации значений уклонов элементов продольного профиля сортировочных горок [Текст] / А. Н. Огарь // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2001. – №3. – С. 18-22.
3. Павлов, В. Е. Брахиохрона применительно к сортировочной горке [Текст] / В. Е. Павлов // Применение современных математических методов в эксплуатации железных дорог // Сб. научн. тр. ЛИИЖТа. – Вып. 300. – Транспорт, Ленинград, 1969. – С. 138-146.
4. Правдин, Н. В., Анализ существующих методов расчета сортировочных горок [Текст] / Н. В. Правдин, С. А. Бессоненко // Транспорт: наука, техника, управление. – 2004. – №5. – С. 22-27.
5. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах Союза ССР. ВСН 207-89 [Текст]. – М.: Транспорт, 1992. – 104 с.

Поступила в редколлегию 15.11.2012.

Принята к печати 17.11.2012.