

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ ТОРМОЖЕНИЯ ОТЦЕПОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ

Виконані дослідження характеристик ділянки допустимих режимів гальмування відчепа та їх залежностей від параметрів відчепа та умов скочування. Встановлений взаємозв'язок режимів гальмування із витратами електроенергії на їх реалізацію.

Выполнены исследования характеристик области допустимых режимов торможения отцепа и их зависимостей от параметров отцепа и условий скатывания. Установлена взаимосвязь режимов торможения с расходами электроэнергии на их реализацию.

The article provides the research of the characteristics of the permissible scope of braking modes in uncoupling and their relations to the uncoupling parameters of cut and the rollback conditions. The interrelations have been established of the braking modes with the energy costs involved.

В современных условиях одним из основных направлений повышения эффективности функционирования сортировочных горок является сокращение затрат энергоресурсов на расформирование составов. В настоящее время поиск путей решения данной проблемы ведется по нескольким направлениям: создание новых и модернизация существующих вагонных замедлителей; совершенствование управления тормозными позициями; улучшение конструкции плана и профиля сортировочных горок; замена маневровых тепловозов электровозами при надвиге расформируемых составов и др.

Как показывает анализ, около 80 % всех расходов на расформирование составов составляют расходы электроэнергии на торможение вагонов горочными замедлителями. Указанные цифры свидетельствуют о необходимости исследований и оптимизации процесса торможения отцепов при роспуске составов на горках. Решение этой задачи позволит минимизировать непосредственные затраты энергоресурсов на торможение отцепов, а также сократить объем маневровой работы, связанной с ликвидацией окон на сортировочных путях и повторной сортировкой вагонов вследствие неразделения отдельных отцепов на стрелках.

Выполненный анализ современных научных работ по рассматриваемой проблеме [1–5] показал, что существующие в настоящее время методы управления процессом роспуска составов развиты недостаточно. Они не ставят целью сокращение расходов энергии на торможение вагонов замедлителями и в то же время не обеспечивают необходимое качество интервального и прицельного регулирования скорости скатывающихся отцепов. Не решена задача теоретической оценки минимальных затрат энергии, необходимой для роспуска

составов, указанная оценка необходима для определения потенциальных возможностей сортировочных горок. Существующие методы оптимизации режимов роспуска составов не ориентированы на реализацию энергосберегающих технологий.

Исследования работы замедлителей в процессе расформирования составов [6] показывают, что энергозатраты на торможение вагонов непосредственно связаны с числом включений замедлителей, которое зависит от параметров отцепов и условий роспуска. Анализ различных алгоритмов интервального регулирования [7] свидетельствует о зависимости расхода электроэнергии от технологии регулирования скорости движения отцепов на спускной части горки. Результаты данных исследований позволяют сделать вывод о возможности разработки энергосберегающих алгоритмов выбора режимов торможения отцепов и управления замедлителями в процессе роспуска составов.

Для решения указанной задачи необходимо предварительно установить взаимосвязь режимов торможения отцепов с показателями интервального и прицельного регулирования скорости их скатывания, а также с соответствующими затратами энергоресурсов. Исследования влияния режимов торможения на процесс управляемого скатывания отцепов с использованием имитационного моделирования были выполнены в [8]. Установлено, что для каждого отцепа существует область допустимых режимов торможения (ОДР), конфигурация и площадь которой существенно зависят от его параметров и условий скатывания.

В настоящей статье поставлена задача дальнейшего совершенствования модели управляемого скатывания отцепов с горки [8]. С этой целью выполнен анализ возможных ограничений режи-

мов торможения, связанных с мощностью замедлителей, условиями скатывания отцепов на спускной части горки, а также требованиями прицельного регулирования их скорости.

В работе приведены исследования зависимостей параметров ОДР от сопротивления движению отцепов, их длины и потребной дальности скатывания в различных условиях. Для оценки эффективности управления процессом роспуска и определения энергетических расходов, связанных с торможением отцепов, установлена взаимосвязь между режимами торможения и затратами электроэнергии, необходимыми для их реализации.

На трехпозиционных горках режим торможения скатывающегося отцепа можно представить вектором  $h = (h', h'', h''')$  энергетических высот, погашаемых на верхней (ВТП), средней (СТП) и парковой (ППП) тормозных позициях. При этом из трех компонент вектора  $h$  только две являются независимыми, так как третья может быть определена из условия обеспечения заданной скорости отцепа в точке прицеливания. В этой связи ОДР  $\Omega$  может быть представлена выпуклым многоугольником на плоскости  $h'O'h''$ , а некоторый режим  $h \in \Omega$  – вектором  $h = h', h''$ .

Ограничения, образующие ОДР, определяются тремя группами факторов:

- номинальной мощностью замедлителей тормозных позиций;
- режимом скатывания отцепа на спускной части горки;
- требованиями прицельного регулирования скорости отцепа.

На рис. 1 показаны ограничения режимов торможения первых двух типов для очень хорошего бегуна (ОХ), скатывающегося в неблагоприятных зимних условиях при встречном ветре на горке с тремя тормозными позициями.

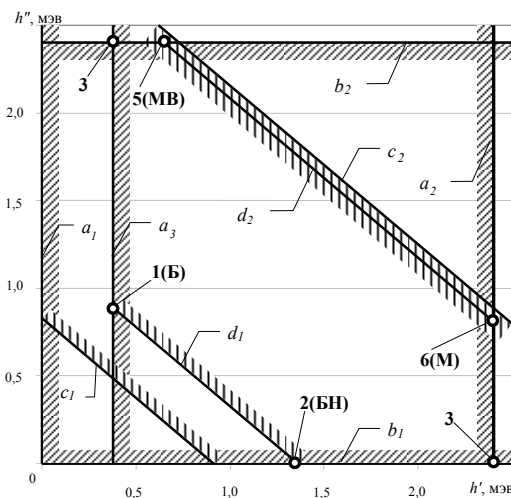


Рис. 1. Ограничения режимов торможения ОХ на тормозных позициях спускной части горки

**Первую группу** ограничений (ограничения по тормозной мощности замедлителей) можно представить как:

$$0 \leq h' \leq H';$$

$$0 \leq h'' \leq H'',$$

где  $H'$ ,  $H''$  – суммарная номинальная тормозная мощность замедлителей соответственно ВТП и СТП.

Графически указанные ограничения представляются прямоугольником, который образуют оси координат  $h'$  и  $h''$ , а также линии, соответствующие мощности замедлителей ВТП ( $H'$ ) и СТП ( $H''$ ); в дальнейшем указанный прямоугольник будем называть областью возможных режимов торможения (см. рис. 1, линии  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ).

**Вторая группа** ограничений связана с режимом скатывания отцепа на спускной части горки. Всего таких ограничений четыре и определяются они минимальной и максимальной скоростями выхода отцепа из ВТП ( $u'_{\min}$ ,  $u'_{\max}$ ) и СТП ( $u''_{\min}$ ,  $u''_{\max}$ ). Указанные скорости определяют предельные значения энергетической высоты, которая может быть погашена на ВТП ( $h' \in [h'_{\min}, h'_{\max}]$ ) и СТП ( $h'' \in [h''_{\min}, h''_{\max}]$ ).

Максимальная скорость выхода отцепа из  $i$ -й ТП  $u_{\max}^{(i)}$  и соответственно минимальная погашаемая высота  $h_{\min}^{(i)}$  определяются из условия обеспечения допустимой скорости  $v_d^{(i+1)}$  входа этого отцепа на следующую  $(i+1)$  ТП:

$$h_{\min}^{(i)} = \min \left\{ h^{(i)} \mid v^{(i+1)}(h^{(i)}) \leq v_d^{(i+1)} \right\}. \quad (1)$$

Минимальная скорость выхода из  $i$ -й ТП  $u_{\min}^{(i)}$  устанавливается так, чтобы не произошло остановки отцепа на позиции (принято  $u_{\min}^{(i)} = 0,05$  м/с); при этом максимальная погашаемая высота  $h_{\max}^{(i)}$  определяется как:

$$h_{\max}^{(i)} = \max \left\{ h^{(i)} \mid u^{(i)}(h^{(i)}) > u_{\min}^{(i)} \right\}. \quad (2)$$

Указанные ограничения для ВТП ( $i=1$ ) представляют собой определенные числовые значения  $h'_{\min}$ ,  $h'_{\max}$ , которые графически изображаются вертикальными линиями. В приведенном примере (см. рис. 1 линия  $a_3$ )  $h'_{\min} = 0,38$  м эн. в., при которой скорость входа отцепа на СТП  $v_d'' = 7,0$  м/с.

Энергетическая высота, при которой скорость выхода отцепа ОХ из ВТП минимальна, составляет  $h'_{\max} = 2,88$  м эн. в. (см. рис. 1, линия  $a_4$ ). Данное значение превышает номинальную мощность ВТП  $H' = H'' = 2,4$  м эн. в., и поэтому в данном случае на ВТП  $u'_{\min} > 0,05$ . Напротив, при избыточной мощности ВТП величина  $h'_{\max}$  может быть меньше  $H'$  даже для отцепа ОХ при благоприятных условиях скатывания. В таких случаях тормозная мощность  $H'$  не может быть реализована из-за остановки отцепа на ВТП и соответственно на рис. 1 линия  $a_4$  будет расположена слева от  $a_3$ .

На СТП ( $i = 2$ ) погашаемая высота  $h''$ , при которой реализуется заданная скорость выхода отцепа  $u''$ , зависит от его торможения на ВТП. Поэтому предельные значения погашаемой высоты здесь представляются функциями

$$h''_{\min} = f_1(h'), \quad h''_{\max} = f_2(h'),$$

которые, как показали исследования [8], линейны:

$$h''_{\min} = k_1 h' + b_1, \quad (3)$$

$$h''_{\max} = k_2 h' + b_2. \quad (4)$$

При этом угловые коэффициенты в (3) и (4) практически одинаковы ( $k_1 = k_2 = k$ ), так что соответствующие участки границы ОДР параллельны. В примере на рис. 1 показаны ограничения  $h''_{\min} = -0,908h' + 1,449$  (линия  $c_1$ ) и  $h''_{\max} = -0,905h' + 3,023$  (линия  $c_2$ ).

Следует подчеркнуть, что при каждом режиме торможения, принадлежащем линии  $h''_{\min} = f_1(h')$ , реализуется одна и та же скорость выхода отцепа из СТП  $u''_{\max} = 5,54$  м/с, при которой обеспечивается максимальная допустимая скорость его входа на ПТП. При реализации же любого режима торможения, находящегося на линии  $h''_{\max} = f_2(h')$ , отцеп выходит из СТП с установленной минимальной скоростью  $u''_{\min} = 0,05$  м/с.

Коэффициент  $k$  в (3), (4) является отрицательным, а по абсолютной величине несколько меньше единицы ( $|k| < 1$ ); Это означает, что для обеспечения одной и той же скорости  $u''$  выхода отцепа из СТП при торможении его только на ВТП потребуется погасить большую энергетическую высоту, чем при торможении только на СТП. Данный факт

объясняется зависимостью сопротивления движению отцепа от его скорости, среднее значение которой при торможении только на ВТП будет ниже. Данную закономерность необходимо учитывать при определении режимов торможения отцепов с целью сокращения энергетических расходов, связанных с регулированием их скорости. Численное значение  $k$  зависит от параметров отцепа и условий его скатывания (величина  $|k|$  минимальна для очень плохих бегунов (ОП), скатывающихся в неблагоприятных зимних условиях).

**Третья группа** ограничений режимов торможения отцепов на ВТП и СТП определяется требованиями прицельного регулирования скорости. Для их выполнения необходимо, чтобы любой режим, принадлежащий ОДР ( $h \in \Omega$ ), обеспечивал докатывание отцепа до точки прицеливания  $s_{\text{п}}$  с допустимой при соударении скоростью  $v_{\text{п}}$  ( $0 \leq v_{\text{п}} \leq v_{\text{п.д}}$ ); при этом торможение на ПТП должно осуществляться в пределах ее номинальной мощности ( $0 \leq h''' \leq H'''$ ). Указанными ограничениями определяются минимальная  $u''_{\text{п.мин}}$  и максимальная  $u''_{\text{п.макс}}$  скорости выхода отцепа из СТП по условиям прицельного регулирования. При этом минимальная скорость  $u''_{\text{п.мин}}$  должна обеспечить докатывание отцепа до точки прицеливания со скоростью  $v_{\text{п}} = 0$  без торможения на ПТП ( $h''' = 0$ ). Максимальная скорость  $u''_{\text{п.макс}}$  соответствует такому режиму скатывания, при котором полностью используется мощность ПТП ( $h''' = H'''$ ), а скорость отцепа в точке прицеливания равна допустимой ( $v_{\text{п}} = v_{\text{п.д}}$ ). Соответствующие предельные режимы торможения можно представить как:

$$h_{\text{п.мин}} = \{h'' | h''' = H''', v_{\text{п}} = v_{\text{п.д}}\}, \quad (5)$$

$$h_{\text{п.макс}} = \{h'' | h''' = 0, v_{\text{п}} = 0\}. \quad (6)$$

Величины  $h''_{\text{п.мин}}$  и  $h''_{\text{п.макс}}$  представляются линейными зависимостями, аналогичными (3) и (4), с тем же значением коэффициента  $k$ . В рассмотренном на рис. 1 примере указанные зависимости при  $s_{\text{п}} = 720$  м показаны линиями  $d_1 [h''_{\text{п.мин}} = f_1(h')]$  и  $d_2 [h''_{\text{п.макс}} = f_2(h')]$ .

Таким образом, выполненный анализ показал, что каждая из переменных  $h'$ ,  $h''$  может иметь несколько ограничений разного характера. Эти ограничения представляются параллельными

прямыми, и поэтому только одно из них может быть активным. В этой связи был разработан алгоритм построения ОДР, позволяющий идентифицировать и исключить неактивные ограничения до начала решения задачи оптимизации с учетом конструкции горки, параметров отцепа и условий скатывания. При этом была усовершенствована методика построения ОДР, изложенная в [8], в результате чего число узловых точек для определения ОДР было сокращено до четырех.

В рассматриваемом примере ОДР представляет собой шестиугольник с вершинами 1-2-4-6-5-3 (см. рис. 1). Из всех вершин ОДР необходимо выделить две критические точки: точку 1, определяющую режим быстрого скатывания (Б) и точку 6 – режим медленного скатывания (М), при которых время скатывания отцепа соответствен-

но минимально и максимально. Очевидно, что для построения ОДР достаточно идентифицировать еще две точки – точку 2 (БН), расположенную на нижнем конце линии  $h''_{\min}(h')$ , и точку 5 (МВ) на верхнем конце линии  $h''_{\max}(h')$ .

На рис. 2 показаны графики скорости скатывания отцепа ОХ при предельных режимах торможения, соответствующих четырем указанным вершинам ОДР. На данном рисунке заштрихованы области возможных режимов движения ОХ на участке от входа на ВТП до выхода из СТП, которые соответствуют режимам торможения, находящимся на границе ОДР (область  $a$  – режимы линии  $h''_{\max}(h')$ , область  $b$  – режимы линии  $h''_{\min}(h')$ ).

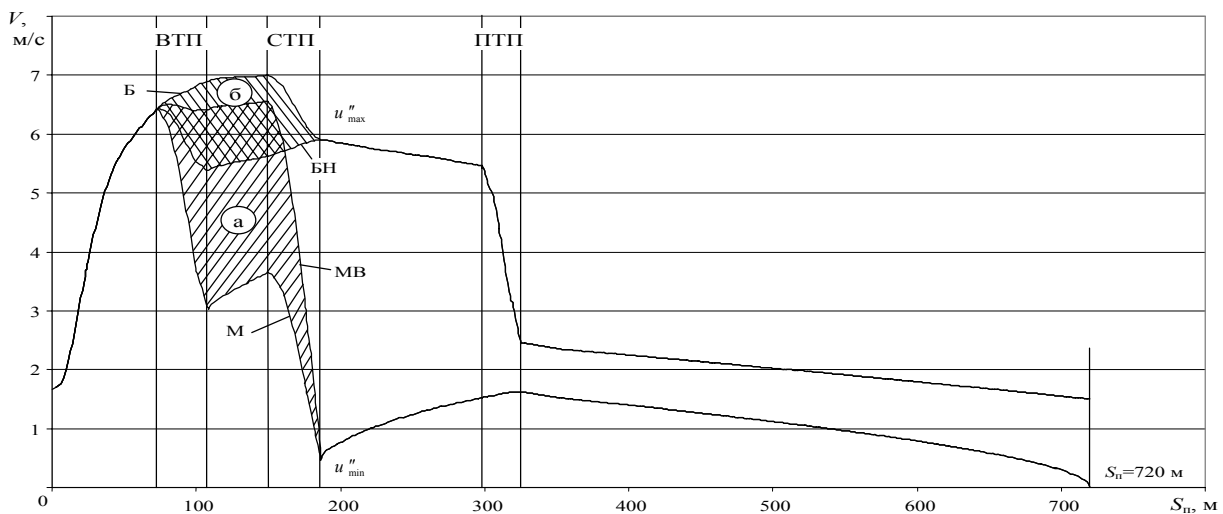


Рис. 2. Эпюры скорости скатывания ОХ при режимах торможения, соответствующих узлам ОДР

Как видно из приведенного рисунка, режим движения отцепа, определяемый скоростью  $u''$  выхода его из СТП, а следовательно, и условия его разделения со смежными отцепами существенно зависят от степени участия ПТП в процессе регулирования скорости отцепа. С другой стороны, очевидно, что ПТП непосредственно определяет и условия прицельного регулирования скорости отцепа. В этой связи для выбора оптимального распределения работы между ТП горки необходимо предварительно установить возможные режимы торможения отцепов на ПТП, соответствующие каждой точке ОДР.

Очевидно, что любой скорости  $u''_i$  выхода отцепа из СТП, принадлежащей диапазону ее возможных значений  $u''_{\min} < u''_i < u''_{\max}$  (см. рис. 2), соответствует определенный диапазон значений энергетической высоты  $h'''$ , погашаемой на ПТП ( $h''' \in [h'''_{\min}, h'''_{\max}]$ ). При этом  $h'''_{\min}, h'''_{\max}$

определяются предельными значениями скорости отцепа в точке прицеливания

$$v_{\Pi}(h'''_{\min} = \{h'''_i | v_{\Pi} = v_{\Pi, \text{д}}\}),$$

$$h'''_{i, \text{max}} = \{h'''_i | v_{\Pi} = 0\}.$$

Характер изменения в ОДР допустимых режимов торможения  $h'''$  и соответствующих значений скорости  $v_{\Pi}$  показан на рис. 3. Для иллюстрации в ОДР (см. рис. 3, а) выбрана некоторая линия 1–4, для всех режимов  $h$  которой выполняется равенство  $h' = h''$ . Для указанной линии построены графики зависимостей предельных режимов торможения ПТП  $h'''_{\min}(h)$  и  $h'''_{\max}(h)$  (см. рис. 3, б) и соответствующих скоростей в точке прицеливания  $v_{\Pi, \text{max}}(h)$  и  $v_{\Pi, \text{min}}(h)$  (см. рис. 3, в).

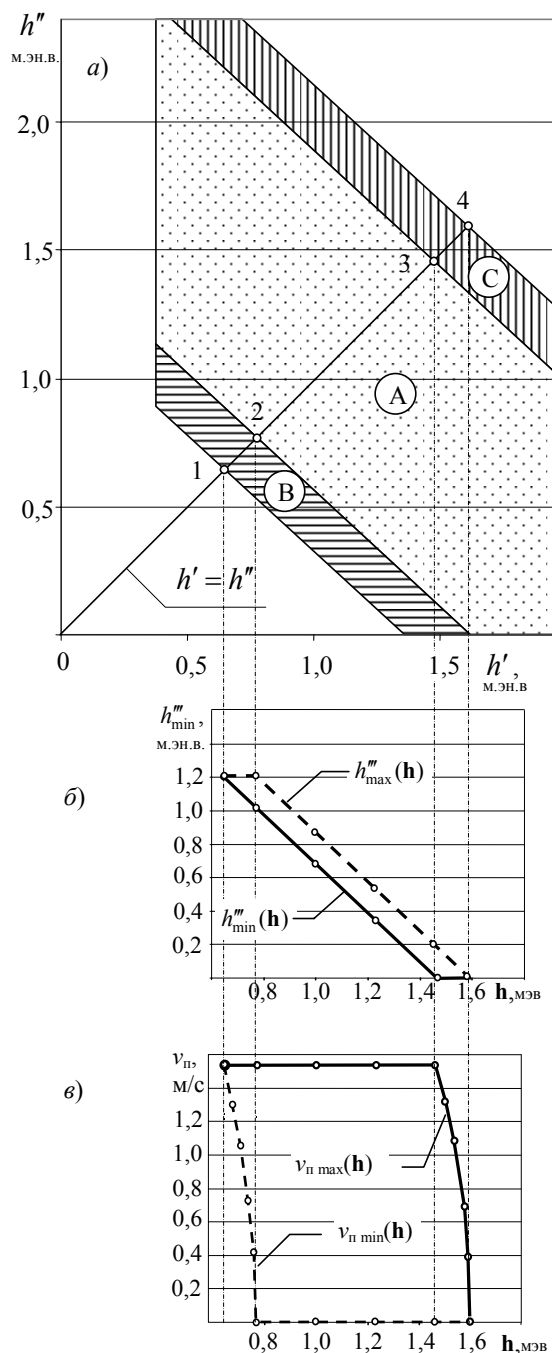


Рис. 3. Анализ режимов торможения отцепов на ПТП:  
 а – зоны ОДР; б – предельные значения  $h'''$ ;  
 в – область изменения скорости  $v_{п}$

Как показывает анализ графиков, вся ОДР может быть разделена на три зоны – А, В и С, по характеру возможного варьирования величины  $h'''$ . В зоне А значения  $h'''_{\min}$  и  $h'''_{\max}$  линейно уменьшаются от точки 2 к точке 3; при этом в точке 2  $h'''_{\max} = H'''$ , в точке 3  $h'''_{\min} = 0$ , а разность  $\Delta h''' = h'''_{\max} - h'''_{\min}$  остается постоянной во всей зоне А (см. рис. 3, б). В пограничных зонах В и С разность  $\Delta h'''$  линейно уменьшается от своего максимального значения (точки 2, 3) до нуля (точки 1, 4).

Соответственно режимам  $h'''$  меняются и значения скорости  $v_{п}$  в точке прицеливания. Максимальный диапазон изменения скорости  $v_{п}$  – в зоне А ( $0 \leq v_{п} \leq v_{п,д}$ ); в зонах В и С его ширина резко уменьшается от величины  $v_{п,д}$  в точках 2, 3 до нуля в точках 1 и 4 (см. рис. 3, в).

Для решения задачи оптимизации режимов торможения отцепа необходимо установить взаимосвязь размеров ОДР и ее положения в системе координат  $h'O'h''$  с параметрами отцепа и условиями его скатывания. С этой целью были выполнены исследования влияния различных факторов на параметры ОДР. В качестве контролируемых факторов рассматривались вес  $Q_{в}$  и число вагонов  $n_{отц}$  в отцепе, сопротивление движению  $w_0$ , скорость  $v_{вет}$  и направление ветра  $\beta$ , температура воздуха  $t$  °С, а также дальность скатывания отцепа  $s_{п}$ . Исследования проводились на основе имитационного моделирования скатывания отцепов с заданными параметрами и условиями роспуска. В результате моделирования для каждого отцепа были определены режимы торможения, соответствующие четырем узловым точкам ОДР – Б, БН, М, МВ, которые использовались для построения ОДР и расчета ее параметров.

В качестве основных параметров ОДР, характеризующих ее размеры и положение были приняты расстояния от начала координат до линий  $h'''_{\min}(h')$  и  $h'''_{\max}(h')$  (соответственно  $R_{\min}$  и  $R_{\max}$ ), а также ширина ОДР  $E = R_{\max} - R_{\min}$ .

Установлено, что ширина ОДР  $E$  пропорциональна разности квадратов предельных скоростей выхода отцепа из СТП

$$E = k_E \left[ (u''_{\max})^2 - (u''_{\min})^2 \right]. \quad (7)$$

С другой стороны, величина указанной разности в соответствии с законом сохранения энергии может быть определена как:

$$(u''_{\max})^2 - (u''_{\min})^2 = 2g'(H''' + \Delta h_w + h_{п}), \quad (8)$$

где  $\Delta h_w$  – изменение удельной работы всех сил сопротивления движению отцепа на участке от СТП до точки прицеливания при изменении скорости его движения;  $h_{п}$  – удельная энергия, соответствующая скорости отцепа  $v_{п}$  в точке прицеливания. Тогда, исходя из (7) и (8), ширину ОДР можно представить как:

$$E = 2k_E g'(H''' + \Delta h_w + h_{п}). \quad (9)$$

Как показали исследования, изменение параметров отцепов ( $Q_B$ ,  $w_0$ ) и условий скатывания ( $v_{вет}$ ) приводит к существенным изменениям предельных скоростей выхода из СТП  $u_{max}$ , и, особенно,  $u_{min}$ . При этом указанные скорости возрастают с увеличением сопротивления движению отцепов и дальности их скатывания. Ширина ОДР  $E$  также зависит от указанных параметров, однако, в значительно меньшей степени. Действительно, в (9) все величины, кроме  $\Delta h_w$ , являются практически постоянными, а вариация удельной работы сил сопротивления  $\Delta h_w = h(u_{max}'' ) - h(u_{min}'' )$  незначительна.

В то же время сопротивление движению отцепа существенно влияет на положение ОДР в области возможных режимов торможения  $h' \in [0, H']$   $h'' \in [0, H'']$ . Очевидно, что с увеличением сопротивления движению отцепа уменьшается его торможение на ВТП и СТП, что соответствует смещению ОДР к началу координат. Установлено, что характер указанного изменения существенно зависит от скорости и направления ветра.

Для иллюстрации на рис. 4, а показаны графики зависимости величин  $R_{min}$  и  $E$  от сопротивления движению отцепа  $w_0$  при встречном ветре.

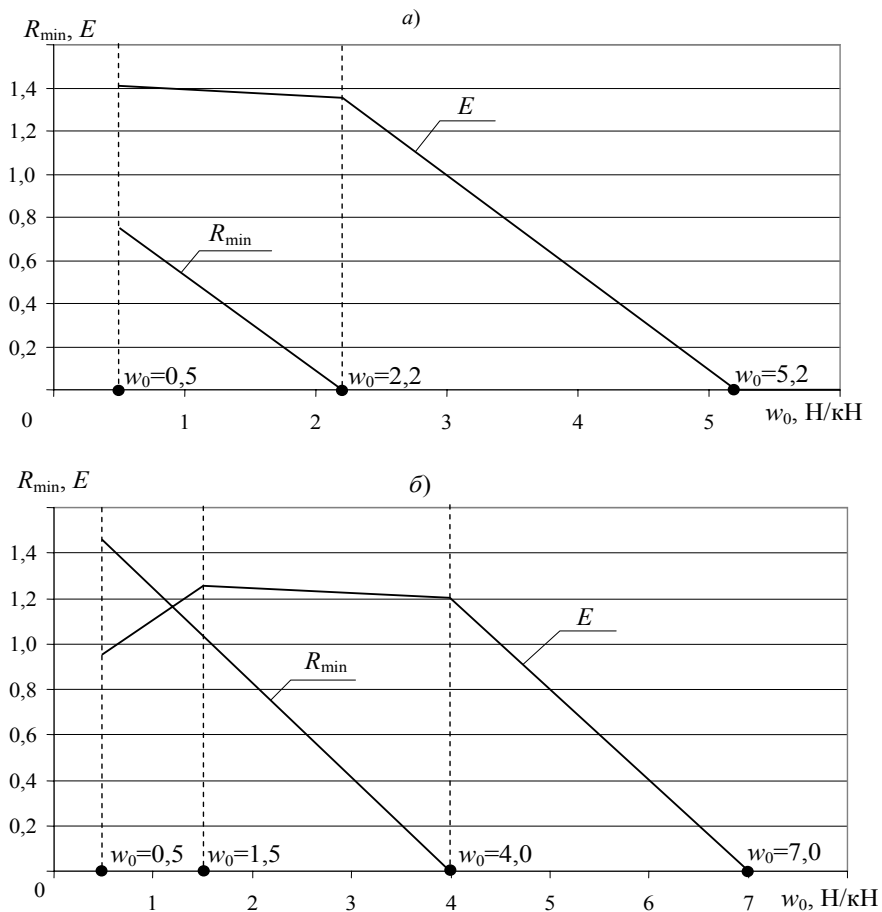


Рис. 4. Зависимости параметров ОДР от основного сопротивления движению отцепа: а – при встречном ветре; б – при попутном ветре

Как видно, при увеличении  $w_0$  до 2,2 Н/кН расстояние  $R_{min}$  линейно уменьшается до 0. Одновременно с этим изменяется и форма ОДР – число ее вершин постепенно уменьшается 6...3; при этом ширина ОДР  $E$  уменьшается весьма незначительно.

При  $w_0 = 2,2$  Н/кН величина  $R_{min}$  уменьшается до 0, а ОДР превращается в треугольник. При дальнейшем росте сопротивления ши-

рина ОДР  $E$  резко уменьшается (см. рис. 4, а) и достигает нуля при  $w_0 = 5,2$  Н/кН; при этом ОДР вырождается в точку в начале координат. Такой отцеп докатывается до точки прицеливания со скоростью  $v_{п} = 0$  только при отсутствии торможения на всех ТП; если же сопротивление отцепа превысит величину  $w_0 = 5,2$  Н/кН, то он вообще не докатится до заданной точки прицеливания.

При достаточно сильном попутном ветре характер изменения ширины ОДР для хороших бегунов несколько изменяется (см. рис. 4, б). В этих условиях ОДР для ОХ имеет достаточно малую ширину; с ростом  $w_0$  величина  $E$  не только не уменьшается, а достаточно интенсивно растет и достигает максимума при  $w_0 = 1,5$  Н/кН, после чего характер изменения ширины ОДР полностью соответствует условиям встречного ветра (см. рис. 4, а и б).

Расстояние ОДР от начала координат  $R_{\min}$  при попутном ветре уменьшается с ростом  $w_0$  точно так же, как и при встречном. При этом значение  $R_{\min}$  значительно выше, чем при встречном, что объясняется необходимостью увеличения степени торможения отцепов в пер-

вом случае. Уменьшение ширины ОДР для хороших бегунов ( $w_0 \geq 1,1$  Н/кН) при попутном ветре вызвано ограничением (2) по минимальной скорости выхода отцепа из СТП. При этом избыточная энергетическая высота, которую невозможно в этих условиях погасить на СТП для обеспечения скорости отцепа  $v_{\text{п}} = 0$  в точке прицеливания, должна быть погашена на ПТП. Для отцепов, у которых  $w_0 < 1,1$  Н/кН, указанную энергетическую высоту невозможно погасить и на ПТП из-за остановки отцепа, поэтому у таких отцепов скорость в точке прицеливания будет выше заданной  $v_{\text{п}} = 0$ .

Аналогичный характер имеют зависимости параметров ОДР и от требуемой дальности скатывания отцепов (рис. 5).

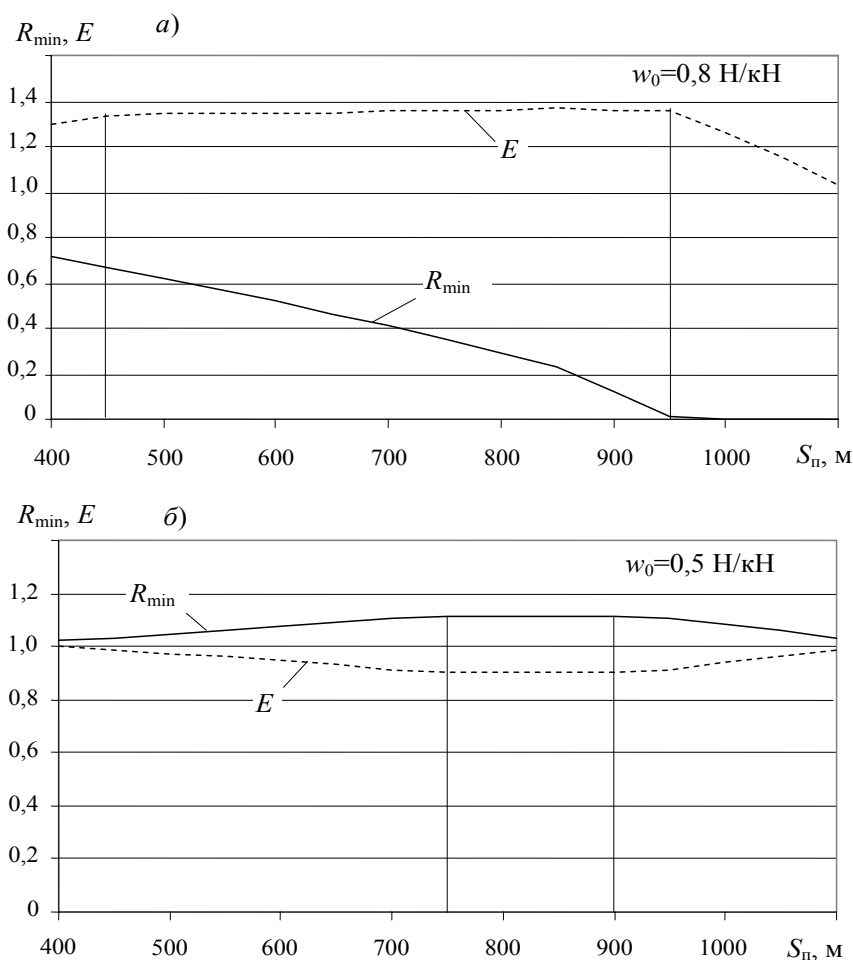


Рис. 5. Зависимости параметров ОДР от дальности скатывания отцепа:  
а – при встречном ветре; б – при попутном ветре

Отцепы из нескольких вагонов в основном подчиняются тем же закономерностям, что и одиночные вагоны. При этом различия заключаются в том, что такие отцепы при одной и той же скорости ветра имеют несколько меньшее удельное сопротивление движению от среды и ветра.

В результате у таких отцепов при тех же условиях ограничение ширины ОДР по скорости  $u''_{\min}$  несколько меньше, чем у одиночных вагонов, однако, действует оно на более дальнем расстоянии. Одновременно с этим несколько медленнее уменьшается расстояние  $R_{\min}$ .

Характер изменения параметров ОДР существенно зависит и от уклона сортировочного пути. При ускоряющем уклоне ОДР может вообще не существовать; это означает, что не существует режимов торможения, при которых скорость отцепа в точке прицеливания не превысит допустимую величину.

Параметры отцепов и условия скатывания оказывают существенное влияние и на общую энергетическую высоту  $H_T$ , погашаемую всеми тормозными позициями по пути скатывания отцепа. При этом для каждого отцепа и условий его скатывания существует два значения  $H_T$  – минимальное  $H_{T.min}$  и максимальное  $H_{T.max}$ , соответствующие двум крайним режимам торможения этого отцепа – быстрого ( $H_{T.min}$ ) и медленного ( $H_{T.max}$ ) скатывания.

Как показывает анализ результатов имитационного моделирования, в большинстве случаев с ростом дальности скатывания величины  $H_{T.min}$  и  $H_{T.max}$  уменьшаются, причем тем быстрее, чем больше сопротивление движению отцепа. Исключение составляет отцеп ОХ, скатывающийся при достаточно сильном попутном ветре ( $v_{вет} = -5$  м/с). Для указанного отцепа величина  $H_T$  с ростом дальности скатывания незначительно увеличивается.

Сравнение значений  $H_{T.min}$  и  $H_{T.max}$  показывает, что выбор режима торможения весьма существенно влияет на величину суммарной погашаемой высоты  $H_T$ , особенно с увеличением сопротивления движению и дальности скатывания. Так, при встречном ветре сокращение погашаемой высоты при переходе от медленного к быстрому режиму скатывания составляет в среднем 30...40 %, а в отдельных случаях достигает до 70 %. При попутном ветре, а также для отцепов из нескольких вагонов указанное сокращение несколько меньше (15...30 %), хотя иногда достигает 40 и более процентов.

Указанные величины, однако, не могут служить непосредственной оценкой затрат энергии на торможение отцепа, которые зависят в основном от числа включений замедлителей при регулировании скорости скатывания отцепа [6]. В то же время погашаемая высота зависит, главным образом, от суммарной длины участка торможения отцепа замедлителями.

Оценку энергоемкости отдельных режимов торможения, принадлежащих ОДР, может дать диаграмма распределения числа замедлителей, использование которых необходимо для реализации этих режимов.

Каждый режим  $h$ , принадлежащий ОДР, может быть реализован при использовании вполне определенного числа замедлителей  $K_{и.з}^j$  на  $j$ -й тормозной позиции,

$$j = 1 \dots K_{т.п},$$

где  $K_{т.п}$  – общее число тормозных позиций по маршруту скатывания отцепа ( $K_{и.з}^{(j)} \subset [0, K_3^{(j)}]$ ),

где  $K_3^{(j)}$  – общее число замедлителей на  $j$ -й ТП). В этой связи ОДР  $\Omega$  может быть разделена на непересекающиеся области (подмножества режимов)  $\omega_1 \cup \omega_2 \dots \cup \omega_n = \Omega$ ; при этом каждое подмножество  $\omega_i$  характеризуется списком  $\{K_{и.з}^{(j)} = 0, j = 1 \dots K_{т.п}\}$  значений числа используемых замедлителей и соответствующей величиной  $E_{отц}$  расхода энергии на торможение отцепа. Число возможных областей  $n$  зависит от размеров и положения ОДР в области возможных режимов торможения.

Для примера на рис. 6 показана подобная диаграмма для отцепа ОХ, скатывающегося в неблагоприятных зимних условиях на расстояние  $s_{п} = 400$  м. На данной диаграмме ОДР разделена на  $n = 15$  областей, для реализации режимов торможения каждой из которых используется определенное число замедлителей ВТП, СТП и ПТП, что требует соответствующих затрат электроэнергии (таблица). Как видно из приведенных данных, наименьший расход электроэнергии для реализации режимов торможения, принадлежащих ОДР, имеет место в областях 6 и 15 и составляет 0,28 кВт·ч. Следует заметить, что для реализации режимов торможения двух указанных областей используются разные замедлители горки, что приводит к существенным различиям в скорости и времени скатывания отцепа.

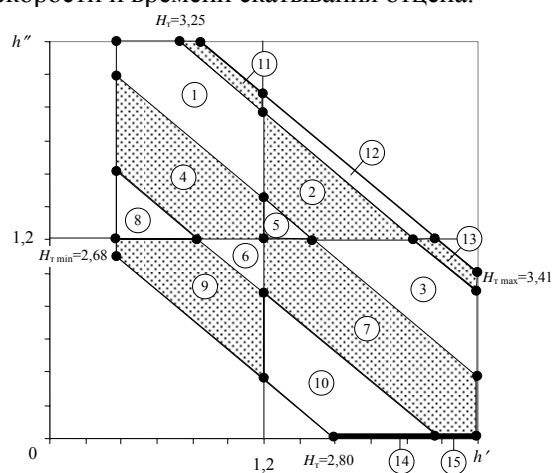


Рис. 6. Диаграмма распределения используемых замедлителей в ОДР отцепа ОХ в зимних условиях



Таблица

**Расход электроэнергии  
для реализации режимов торможения ОДР  
отцепов ОХ в зимних условиях**

Номер области $i$	Число используемых замедлителей			Расход электроэнергии $E_{опт}$ , кВт·ч
	ВТП	СТП	ППП	
1	1	2	1	0,388
2	2	2	1	0,512
3	2	1	1	0,388
4	2	2	2	0,405
5	2	2	2	0,529
6	1	1	2	0,281
7	2	1	2	0,405
8	1	2	3	0,422
9	1	1	3	0,298
10	2	1	3	0,422
11	1	2	0	0,371
12	2	2	0	0,495
13	2	1	0	0,371
14	2	0	3	0,298
15	2	0	2	0,281

Максимальные затраты электроэнергии соответствуют режимам торможения, находящимся в области 5 и составляют 0,53 кВт·ч (см. табл. 1), что почти в два раза выше минимального значения.

Нужно заметить, что выбор режима торможения нельзя производить только по условиям минимизации расходов электроэнергии из-за необходимости обеспечения условий разделения отцепов на стрелках. Следовательно, выбор оптимальных режимов торможения отцепов состава представляет собой сложную неоднозначную задачу, для решения которой необходимо учитывать большое число взаимосвязанных факторов, влияющих на качество сортировочного процесса.

Таким образом, выполненные исследования позволяют однозначно определить область допустимых режимов торможения каждого отцепов

в зависимости от его параметров, условий скачивания и конструкции сортировочной горки.

Установлено также, что ОДР делится на участки с различным числом используемых замедлителей и величиной расхода электроэнергии, необходимой для реализации соответствующих режимов торможения. Полученные новые результаты необходимы для решения задачи оптимизации управления роспуском составов на сортировочных горках.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лебединская Е. Н. Разработка адаптивной автоматической системы управления работой сортировочной горки / Е. Н. Лебединская, Н. Н. Новгородов, Л. В. Пальчик и др. // Вестник ВНИИЖТ, – 1999. – № 3 – С. 32–34.
2. Жуковицкий И. В. Управление замедлителями тормозной позиции сортировочной горки. Ч. 1. Модель системы / И. В. Жуковицкий, Г. И. Загарий, Н. И. Луханин // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте, – 2000. – № 5 – С. 10–15.
3. Жуковицкий И. В. Управление замедлителями тормозной позиции сортировочной горки. Ч. 2. // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте, – 2002. – № 4 – С. 17–20.
4. Шелухин В. И. Универсальный модуль управления тормозными позициями / В. И. Шелухин, И. Н. Малышев // Автоматика, связь, информатика, – 2000. – № 5. – С. 12–14.
5. Бобровский В. И. Многошаговый двухэтапный метод оптимизации режимов роспуска составов на горках // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2004. – № 2. – С. 8–14.
6. В. П. Шейкин. Снижение расхода энергоресурсов для торможения вагонов на сортировочных горках // Вестник ВНИИЖТ, 1996. № 3, – С. 24–27.
7. Нагорный Е. В. Решение задачи по энергосбережению при торможении отцепов на сортировочных горках / Е. В. Нагорный, А. Я. Шейнин // Залізничний транспорт України, – 1998. – № 1 (4–5) – С. 70–72.
8. Бобровский В. И. Математическая модель для оптимизации интервального регулирования скорости отцепов на горках / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, – 2003. – № 3. – С. 3–8.

Поступила в редколлегию 09.09.2005.