

казывает, что в такое множество входят достаточно сложные требования, которые в полном объеме реализовать в базовой модели не удастся, поэтому рассматривается возможность их разделения и упрощения исходной стратегии по определенным выделенным подмножествам регулятивной модели. Состав данных подмножеств должен определяться дальнейшими исследованиями.

Получено 11.12.2015.

ISBN 978-985-554-707-6. Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. Гомель, 2017

УДК 656.212.5:656.22.05

И. С. ДЗЮБА

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВАГОНОВ ПРИ РОСПУСКЕ С СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

Выполнен анализ традиционной методики определения скоростей отцепов и спускной части сортировочной горки и предложен альтернативный метод расчёта.

Расчёт параметров сортировочной горки базируется на двух законах физики: гравитации (свободного падения) и сохранения энергии. При скатывании вагонов с горки изменение потенциальной энергии отцепа $\Delta E_{\text{п}}$ преобразуется в механическую работу по преодолению сил сопротивления A и приращение кинетической энергии движения $\Delta E_{\text{к}}$:

$$\Delta E_{\text{п}} = A + \Delta E_{\text{к}} \text{ или } \Delta E_{\text{п}} = mg(\Delta h + \Delta h_1); \quad (1)$$

$$A = mg\Delta h_1 = l mg \sum w_i; \quad (2)$$

$$E_{\text{к}} = mg\Delta h = m\Delta v^2 / 2,$$

где m – масса отцепа, кг; g – ускорение силы тяжести (физическая константа), м/с^2 ; Δh , Δh_1 – энергетическая высота, м эн. в.; l – расстояние между расчётными точками маршрута, м; $\sum w_i$ – удельные силы сопротивления Н/(кг·м) ; Δv – приращение линейной скорости отцепа, м/с .

Так как часть потенциальной энергии затрачивается на раскручивание колёс вагона, то при расчёте линейной скорости отцепа вводят эмпирический коэффициент, понижающий запас потенциальной энергии,

$$k = 1 / (1 + 0,42n / m), \quad (3)$$

где n – число осей в отцепе.

Таким образом, из уравнения (2) следует, что приращение квадрата линейной скорости

$$\Delta v^2 = 2kg\Delta h. \quad (4)$$

Произведение kg заменяют условной величиной g' ,

$$g' = kg = g / (1 + 0,42n / m),$$

тогда выражение (4) приобретает классический вид

$$\Delta v^2 = 2g'\Delta h, \quad (5)$$

где g' — эмпирическая величина, условно заменяющая ускорение силы тяжести.

При расчёте параметров горок все силы, действующие на отцеп, приводятся в сопоставимые единицы через энергетическую высоту.

Удельные силы сопротивления имеют размерность Н/кН. В этих единицах выражаются:

- постоянно действующие силы, приходящиеся на 1 м прямого пути (основное удельное сопротивление, сопротивление при раскесании воздушной среды, ветра, от снега и инея);

- периодически действующие силы, которые учитываются только на определённых отрезках маршрута (при вписывании в кривые участки пути, проходе стрелочных переводов).

Уклоны профиля — это высота спуска (подъёма), приходящаяся на один километр пути, $i = [м]/[км]$, выражаются в промилле.

Движущие удельные силы f , действующие параллельно наклонной плоскости, рассчитываются в аналогичных единицах Н/кН, т.е. промилле. Таким образом, силы сопротивления, уклоны и движущие силы выступают как равнозначные безразмерные величины и могут при необходимости складываться или вычитаться.

Важнейшим параметром горок является скорость скатывания отцепов. От правильного и точного её определения зависят все остальные характеристики, показатели, параметры. Как правило, проектировщики стремятся к получению наибольшей (максимально возможной) скорости скатывания, так как это напрямую влияет на перерабатывающую способность сортировочной горки. В то же время высокие скорости движения отцепов на спускной части горки ограничиваются техническими возможностями горочных устройств (временем срабатывания устройств автоматики, стрелочных переводов, вагонных замедлителей и т.д.). Чем выше скорость, тем меньше интервал между отцепами и тем выше вероятность брака. По расчётным скоростям и интервалам устанавливаются расстояния между разделительными элементами горки. Поэтому определению скоростей отцепов на различных участках спускной части горки уделяется повышенное внимание проектировщиков и исследователей.

$$v_B^2 = v_0^2 + 2g'l_1(i_1 - w_{AB}) \cdot 10^{-3}.$$

Если скорость отцепа в точке Б v_B оказывается меньше скорости надвига v_0 (отрыв не произошёл), то в соответствии с рекомендациями считается всё же, что отцеп оторвался от состава в точке Б, а его скорость в момент отрыва принимается $v_B = v_0$. Далее рассчитывается скорость отцепа в точке В через рекуррентное уравнение

$$v_B^2 = v_B^2 + 2g'l_2(i_2 - w_{БВ}) \cdot 10^{-3}. \quad (6)$$

Столь сложный алгоритм, на наш взгляд, не совсем оправдан. Замена криволинейного участка профиля ломаной линией продиктована необходимостью поиска точки отрыва отцепа от состава. До определённого момента (точки отрыва) отцеп движется по вертикальной кривой за счёт силы тяги локомотива, сохраняя скорость надвига v_0 . При этом будет потеряна некоторая профильная высота и меньше энергии останется на разгон отцепа. Именно для этого и проверяется скорость в конце первого отрезка АБ. Однако точка отрыва отцепа от состава остаётся не установленной.

В работе [3] предпринята попытка определения точки отрыва отцепа. Авторы отмечают, что «...ввиду отсутствия методики аналитических зависимостей, в расчётах заменяют криволинейные участки профиля горки ломаными линиями, что приводит к значительным погрешностям. ...при расчёте расстояния от вершины горки до первой разделительной стрелки, где недопустима значительная погрешность в определении точек отрыва, метод замены криволинейных участков профиля ломаной линией неприемлем».

Далее справедливо указывается, что отрыв отцепа от надвигаемого состава происходит в точке, где уклон пола вагона i_0 сравнивается с суммарной удельной силой сопротивления Σw_i , $i_0 = \Sigma w_i$. Здесь же приведена графическая зависимость между расстоянием от вершины горки x_j и величиной уклона пола вагона i_0 . Для получения этой зависимости рассмотрен конкретный пример с разделительной площадкой: $R_B = 350$ м, $i_{СК} = 40...55$ ‰ (с шагом 5 ‰) и длиной жесткой базы вагона $FB = 10$ м, при этом выделяются три участка (рисунок 2).

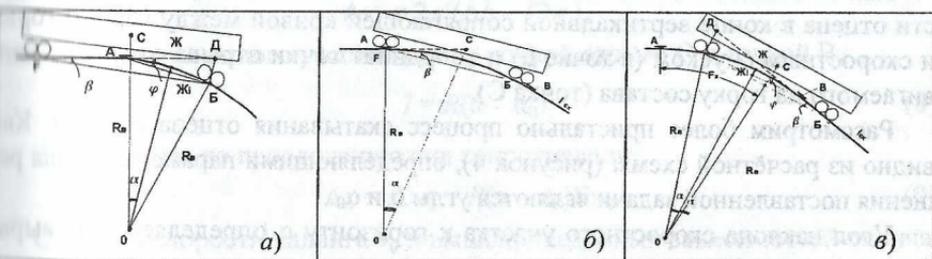


Рисунок 2 – Расчётная схема уклона пола вагона при различных положениях отцепа на криволинейном участке:

a – в начале, $б$ – на участке; $в$ – в конце

Для определения зависимости i_0 от величины x (расстояния от вершины горки до центра тяжести отцепа) используется график (рисунок 3).

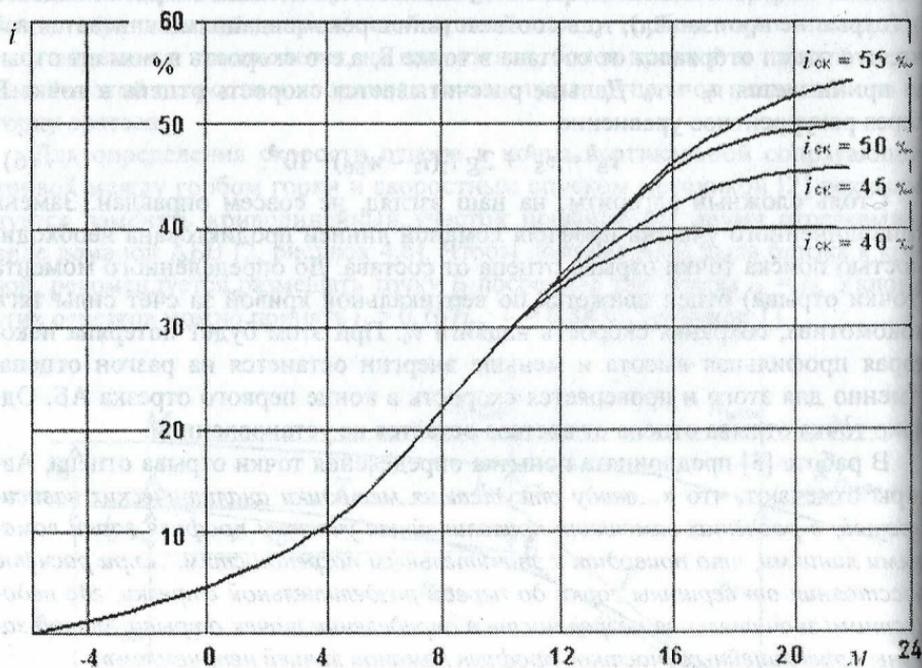


Рисунок 3 – График зависимости текущего уклона от места нахождения вагона

Однако неясно, как можно его использовать, если радиус вертикальной кривой не равен 350 м или скоростной уклон окажется меньше 40 %, отсутствуют рекомендации по использованию на практике полученных графических зависимостей, Скорость отцепа, координаты точки отрыва, потерянная энергетическая высота из графика не определяются.

Как отмечалось выше, целью исследования является определение скорости отцепа в конце вертикальной сопрягающей кривой между горбом горки и скоростным спуском (в точке Б) и координат точки отрыва отцепа от надвигаемого на горку состава (точка С).

Рассмотрим более пристально процесс скатывания отцепа с горки. Как видно из расчётной схемы (рисунок 4), определяющими параметрами для решения поставленной задачи являются углы α и α_0 .

Угол наклона скоростного участка к горизонту α определяется из выражения $\alpha = \arctg(i_{ск})$.

Отрыв отцепа от надвигаемого состава происходит в точке С, где силы сопротивления движению $Q\Sigma W_i$ сравниваются с движущей силой скатываю-

щегося отцепа $Q \sin \alpha_0$, т. е. в точке, где $Q \Sigma w_i = Q \sin \alpha_0$, откуда угол наклона пола вагона в точке отрыва $\alpha_0 = \arcsin(\Sigma w_i)$.

По известному углу α_0 из расчётной схемы определяются координаты точки отрыва: отметка $h_C = R \cos \alpha_0$, расстояние по дуге $l_{AC} = R \alpha_0$.

Отметка точки В (конец круговой кривой) $h_B = R \cos \alpha$. Разность отметок точек С и В

$$\Delta h = R(\cos \alpha_0 - \cos \alpha). \quad (7)$$

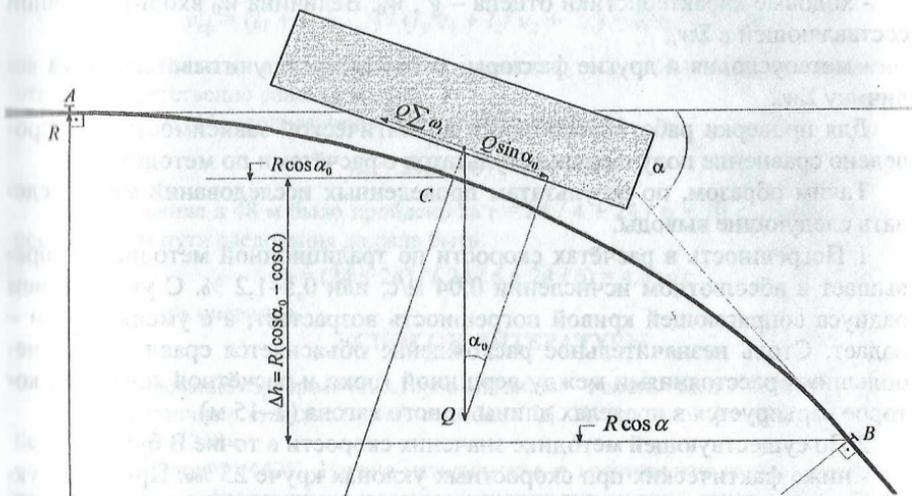


Рисунок 4 – Расчётная схема скатывания отцепов с сортировочной горки

Потенциальная энергия отцепа Δh переходит в кинетическую энергию движения $mv^2/2$ и расходуется на работу сил сопротивления $A_w = mg' l \Sigma w_i$, т. е.

$$mg' \Delta h = m \Delta v^2 / 2 + mg' l \Sigma w_i,$$

откуда приращение квадрата скорости в расчётной точке В

$$\Delta v^2 = 2g'(\Delta h - l \Sigma w_i),$$

где l – длина разгонного участка между точкой отрыва С и точкой В,

$$l = R(\alpha - \alpha_0). \quad (8)$$

Тогда работа по преодолению сил сопротивления

$$A_w = l \Sigma w_i = R(\alpha - \alpha_0) \Sigma w_i. \quad (9)$$

С учётом скорости надвига v_0 и вышеприведенных зависимостей окончательно имеем

$$v_B^2 = v_0^2 + 2g'R [\cos \alpha_0 - \cos \alpha - (\alpha - \alpha_0) \Sigma w_i]. \quad (10)$$

Отметим, что здесь величины углов α и α_0 выражаются в радианах.

Таким образом, удалось получить математически точную аналитическую зависимость для определения скорости скатывающегося с сортировочной горки отцепа в конце вертикальной сопрягающей кривой между горбом горки и скоростным спуском без каких-либо условностей и промежуточных расчётов. В полученной зависимости учитываются все основные факторы:

- скорость надвига – v_0 ;
- конструктивные параметры горки – R, α ;
- ходовые характеристики отцепа – g', w_0 . Величина w_0 входит основной составляющей в Σw_i ;
- метеоусловия и другие факторы, которые могут учитываться через величину Σw_i .

Для проверки работоспособности аналитической зависимости (10) проведено сравнение получаемых результатов с расчётами по методике [1].

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1 Погрешность в расчётах скорости по традиционной методике не превышает в абсолютном исчислении 0,04 м/с, или 0,5–1,2 %. С увеличением радиуса сопрягающей кривой погрешность возрастает, а с уменьшением – падает. Столь незначительное расхождение объясняется сравнительно небольшими расстояниями между вершиной горки и расчётной точкой В, которое варьируется в пределах длины одного вагона (7–15 м).

2 По существующей методике значения скорости в точке В будут:

- ниже фактических при скоростных уклонах круче 25 %. При таких уклонах отрыв отцепа происходит раньше, чем заканчивается отрезок АВ. На отрезке АВ потеря энергетической высоты Δh изменяется прямолинейно, но из-за криволинейного профиля величина Δh будет нарастать с ускорением. Поэтому фактическая скорость в точке Б (и, как следствие, в точке В) окажется несколько выше, чем рассчитанная по действующей методике;

- выше фактических скоростей при пологих скоростных уклонах (< 25 %).

В этом случае отрыв в точке Б не происходит из-за малого значения энергетической высоты Δh_{AB} . Но поскольку считается, что отрыв произошёл в точке Б, энергетическая высота разгонного участка Δh получается большей, что и приводит к завышению скорости в точке В. Практическое совпадение результатов по действующей и предлагаемой методике получается при скоростном уклоне 25 %.

3 Предлагаемый способ определения скорости скатывающихся отцепов в конце вертикальной сопрягающей кривой, позволяет сделать методику понятной, простой, более точной. Затраты времени на расчёты по новому методу по сравнению с действующей методикой сокращаются в 3,5–4 раза.

В действующей методике имеется ещё одно замечание. Среднюю скорость отцепа по заданным скоростям на отдельных участках спускной части горки предлагают определять по формуле [1, с. 43]

$$v_{cp} = (v_1 l_1 + v_2 l_2 + \dots) / (l_1 + l_2 + \dots) = \Sigma v_i l_i / \Sigma l_i. \quad (11)$$

Известно, что средневзвешенная скорость должна рассчитываться как отношение всего пройденного пути Σl_i к затраченному времени Σt_i :

$$v_{cp} = \Sigma l_i / \Sigma t_i.$$

Так как на отдельном i -м участке пути время хода $t_i = l_i / v_i$, то средневзвешенная скорость рассчитывается из выражения

$$v_{cp} = (l_1 + l_2 + \dots) / (l_1/v_1 + l_2/v_2 + \dots) = \Sigma l_i / \Sigma(l_i / v_i).$$

Пример. Пусть на двух одинаковых отрезках $l_1 = l_2 = 24$ м скорости движения отцепы соответственно равны 4 и 6 м/с.

По формуле (11) средневзвешенная скорость составит

$$v_{cp} = 24(4 + 6) / 48 = 5 \text{ м/с.}$$

Но расстояние в 48 м было пройдено за $t = 24 / 4 + 24 / 6 = 10$ с, и средняя скорость на всём пути следования должна быть

$$v_{cp} = (24 + 24) / (24 / 4 + 24 / 6) = 4,8 \text{ м/с.}$$

Погрешность очевидна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Проектирование сортировочных горок : пособие. – Гомель : БелГУТ, 2005. – 170 с.
- 2 Сортировочные станции : учеб. пособие / М. Н. Луговцов [и др.]. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 248 с.
- 3 НИР №Д/ю 951(4401). Научно-методические и практические задачи расчётов и проектирования инфраструктуры железнодорожного транспорта : отчет о НИР № Д/ю 951(4401), разд. 1 / Белорус. гос. ун-т трансп. ; рук. В. Я. Негрей; исп. М. Н. Луговцов. – Гомель : БелГУТ, 2007. – С. 151–156.

Получено 17.08.2016.

ISBN 978-985-554-707-6. Проблемы перспективного развития железнодорожных станций и узлов. Гомель, 2017

УДК 656.224(-214)

А. В. КОЛИН, А. А. СИДРАКОВ, М. Ю. САВЕЛЬЕВ, Д. В. ГОНЧАРОВ
Российский университет транспорта (МИИТ)

УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПРИГОРОДНЫХ УЧАСТКОВ ЗА СЧЕТ МОДЕРНИЗАЦИИ ГОРЛОВИН ТУПИКОВЫХ ПАССАЖИРСКИХ СТАНЦИЙ

Ограничивающим элементом пропускной способности участков часто является нерациональное путевое развитие головных тупиковых пассажирских станций. В