

УДК 629.4.017

П. К. РУДОВ, А. В. ВОРОЖУН

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь***СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОРМОЗНОГО ПУТИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОЕЗДА ПО ПЕРЕМЕННОМУ ПРОФИЛЮ**

Рассматривается процесс торможения поезда на участках пути с переменным профилем. Выполнена оценка длины тормозного пути пассажирского поезда, полученного путем суммирования по интервалам времени и скорости, западноевропейской методике и на основе модели поезда как системы твердых тел – вагонов, взаимодействующих между собой.

Ключевые слова: экстренное торможение, модель поезда, тормозной путь, переменный уклон.

Наличие высокоэффективных тормозов поезда является определяющим фактором для обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте. Одним из показателей их качества является длина тормозного пути, то есть расстояние, проходимое поездом до полной его остановки с момента перевода ручки крана машиниста в тормозное положение. Время торможения поезда в соответствии с [1–3] условно разбивается на два интервала: подготовки тормозов к действию (считают, что в это время тормозные силы не действуют) и собственно торможения (при полной силе нажатия тормозных колодок на колесные пары). Для организации движения поездов требуется знать длину тормозного пути, которая может быть обеспечена существующим тормозным оборудованием поезда на рассматриваемом участке пути.

Тормозные расчеты, принятые на железных дорогах СНГ, основаны на применении уравнения движения поезда для тормозного режима

$$a = \frac{dv}{dt} = -\frac{\zeta}{1+\gamma}(b_{\tau} + w_0 \pm w_i + w_r), \quad (1)$$

где a – ускорение поезда, m/c^2 ; ζ – ускорение (замедление) поезда, m/c^2 , при действии удельной силы, равной 1 Н/т; γ – коэффициент, который учитывает инерцию вращающихся масс, для локомотива $\gamma_{\text{л}} = 0,115$, для пассажирских вагонов – $\gamma_{\text{в}} = 0,042$ [4, 5]; b_{τ} – удельная тормозная сила, Н/т; w_0 , w_i , w_r – удельные силы сопротивления: основного, от уклона и кривизны пути, Н/т.

Знак «+» как перед силой сопротивления от уклона, так и перед уклоном i принимается в случае движения поезда на подъём, «–» – на спуск.

Поезд при расчетах по формуле (1) принимается за материальную точку. При этом вычисления проводятся путем рассмотрения интервалов времени или скорости [3, 6].

Расчет тормозного пути по интервалам времени. В этом случае время торможения поезда условно разбивается на интервалы времени Δt . Изменение скорости Δv за этот промежуток времени определяется выражением

$$\Delta v = -\frac{\zeta}{1+\gamma}(b_r + w_o \pm w_i)\Delta t.$$

Если в начале интервала скорость равна v_n , то путь, пройденный за время Δt ,

$$\Delta s = (v_n + 0,5\Delta v)\Delta t.$$

Данный подход позволяет легко учесть нарастание тормозной силы за период наполнения тормозных цилиндров, для чего используются эмпирические формулы, приведенные в [1, 2].

Расчет тормозного пути по интервалам скорости. Он выполняется путем преобразования уравнения (1) к виду

$$v dv = -\frac{\zeta}{1+\gamma}(b_r + w_o \pm w_i + w_r) ds,$$

где ds – приращение пути, м.

Тормозной путь определяют численным интегрированием по формуле

$$s_d = \frac{0,5}{\zeta_1} \sum_{n=1}^N \frac{v_n^2 - v_{n+1}^2}{b_r + w_r \pm w_i + w_r}.$$

Здесь ζ_1 – ускорение при действии единичной тормозной силы, определенное с учетом инерции вращающихся масс; N – число интервалов скорости.

Чтобы получить достаточную точность расчета, рекомендуется принимать интервалы изменения скорости $(v_n - v_{n+1}) = 2 \dots 3$ м/с.

Расчет по методике, применяемой в Западной Европе. На западноевропейских железных дорогах эффективность тормозов определяется так называемой тормозной массой, выраженной в тоннах, значение которой для используемого режима торможения указывается на щитках рукоятки режимного переключателя [7, с. 132; 8]. Длина тормозного пути пассажирских поездов в таком случае определяется по формуле

$$s = \frac{\varphi v^2}{1,09375 \cdot \lambda + 0,127 - 0,235 \cdot i \cdot \varphi},$$

где φ – эмпирический коэффициент, который зависит от скорости и типа тормоза; λ – коэффициент, учитывающий режим торможения в соответствии с процентом тормозной массы поезда; i – расчетная величина уклона пути, которая зависит как от фактического уклона пути, так и от скорости [9, 10].

Поезд при торможении может находиться на участках с различным уклоном (рисунок 1). В таких случаях для упрощения расчетов длины тормозного пути профиль спрямляют, а уклон спрямленного участка [3]

$$i_c = (\sum i_{nj} l_{nj}) / l,$$

где i_{nj} , l_{nj} – соответственно уклон и длина j -го элемента профиля, входящего в спрямленный участок пути; l – длина спрямленного участка.

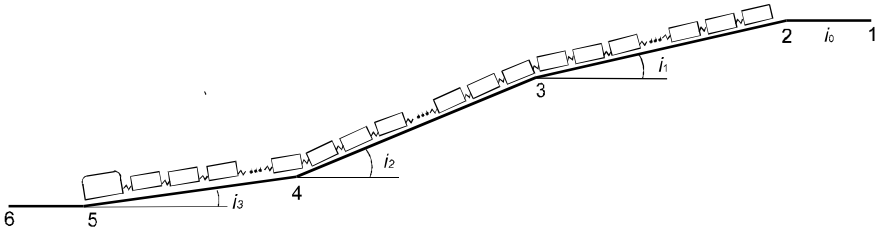


Рисунок 1 – Схема расположения поезда на пути с заданным профилем

Авторами работы [4] поезд также рассматривается в виде непрерывного и нерастяжимого гибкого стержня с сосредоточенными массами, движущийся по участку пути с переменным профилем. В работах [11, 12] анализируется процесс торможения поезда, модель которого представляет собой систему твердых тел, соединенных в продольном направлении упругими связями.

Целью представленной работы является сравнение результатов определения тормозного пути с помощью представленных выше традиционных подходов и на основе моделирования поезда системой твердых тел.

Модель поезда, как механической системы со многими степенями свободы. Система дифференциальных уравнений, отражающая движение локомотива и n вагонов поезда (см. рисунок 1) вдоль направляющего пути имеет вид

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{л}} \ddot{x}_{\text{л}} - R_{\text{л}} + B_{\text{л}} + W_{\text{ол}} + W_{\text{ил}} &= 0; \\ m_{\text{в}_1} \ddot{x}_{\text{в}_1} + R_{\text{л}} - R_{\text{в}_1} + B_{\text{в}_1} + W_{\text{ов}_1} + W_{\text{ив}_1} &= 0; \\ \dots & \\ m_{\text{в}_j} \ddot{x}_{\text{в}_j} - R_{\text{в}_j} + R_{\text{в}_{j+1}} + B_{\text{в}_j} + W_{\text{ов}_j} + W_{\text{ив}_j} &= 0; \\ \dots & \\ m_{\text{в}_n} \ddot{x}_{\text{в}_n} + R_{\text{в}_n} + B_{\text{в}_n} + W_{\text{ов}_n} + W_{\text{ив}_n} &= 0, \end{aligned} \right\}$$

где $m_{\text{л}}$, $m_{\text{в}_j}$ – масса; $\ddot{x}_{\text{л}}$, $\ddot{x}_{\text{в}_j}$ – продольное ускорение; $R_{\text{л}}$, $R_{\text{в}_j}$ – силы в междувагонных связях локомотива и хвоста j -го вагона; $B_{\text{л}}$, $B_{\text{в}_j}$ – сила торможения; $W_{\text{ол}}$, $W_{\text{ов}_j}$ – сила основного сопротивления движению; $W_{\text{ил}}$, $W_{\text{ив}_j}$ – силы от уклона пути. Индекс «л» относится к локомотиву, «в j » – j -му вагону.

Сила торможения определяется выражением

$$B = zP\varphi_{\text{кр}},$$

где z – число тормозных осей локомотива (вагона); P – расчетное нажатие тормозных колодок на ось, которое для локомотива принимается 120 кН, а

для пассажирских вагонов зависит от массы тары и составляет 80–100 кН [4] (его увеличивают на 30 % в случае применения композиционных колодок при скоростях до 160 км/ч); $\varphi_{кр}$ – расчетный коэффициент трения, который для чугунных тормозных колодок определяется выражением

$$\varphi_{кр} = 0,27 \frac{v + 100}{5v + 100} .$$

Здесь скорость движения v в км/ч.

Сила основного сопротивления движению локомотива (вагона):

$$W = mgw ,$$

где m – масса, т; g – ускорение свободного падения, м/с²; w – удельная сила сопротивления движению локомотива (вагона), Н/т, которую принимают:

– для локомотива на холостом ходу

$$w = 24 + 0,11v + 0,0035v^2 ;$$

– для пассажирских вагонов

$$w = 12 + 0,12v + 0,002v^2 .$$

Сила локомотива (вагона) от уклона пути

$$W_i = mgi ,$$

Если процесс торможения поезда начинается на участке с изменяющимся уклоном $i(x)$ (см. рисунок 1), то логическое выражение, определяющее его зависимость от пройденного пути, имеет вид

$$i(x) = \text{if} \left[x < l_{1-2}, i_1, \text{if} \left[x < (l_{1-2} + l_{2-3}), i_2, \text{if} \left[x < (l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4}), i_3, \text{if} \left[x < (l_{1-2} + l_{2-3} + l_{3-4} + l_{4-5}), i_4, i_5 \right] \right] \right] \right],$$

где $l_{1-2}, l_{2-3}, \dots, l_{4-5}$ – длина соответствующего участка пути; i_1, i_2, \dots, i_5 – его уклон.

Пример расчета. Рассмотрено экстренное торможение поезда на тепловозной тяге, включающего 20 четырехосных пассажирских вагонов. Исползованы следующие исходные данные: $m_{л} = 136$ т; $m_{в1} = \dots = m_{в12} = 58$ т; $m_{в13} = \dots = m_{в14} = 57$ т; $m_{в15} = \dots = m_{в18} = 55$ т; $m_{в19} = m_{в20} = 60$ т; $i_0 = 0$; $i_1 = 0,006$; $i_2 = 0,010$; $i_3 = 0,002$; $l_{1-2} = l_{2-3} = l_{3-4} = l_{4-5} = 2$ км; начальная скорость $v_0 = 160$ км/ч.

Результаты определения тормозного пути поезда рассмотренными выше способами в пределах участков с постоянным уклоном представлены в таблице 1. Они показывают, что значения, полученные с применением модели поезда как системы твердых тел незначительно отличаются от результатов расчетов по методам интервалов времени ($\Delta t = 1$ с) и интервалов скорости ($\Delta v = 10$ км/ч). В то же время тормозной путь, найденный по западноевропейской методике, оказался значительно меньшим. Самое значительное различие (почти 6 %) проявилось при наибольшем уклоне пути.

Таблица 1 – Длина тормозного пути поезда

Уча- сток пути	Длина участка, м	Уклон	Тормозной путь, м			
			по интервалам времени	по интервалам скорости	по модели системы тел	по западно- европейской методике
1 – 2	2000	0	1321	1315	1316	1292
2 – 3	2000	0,006	1429	1423	1424	1391
3 – 4	2000	0,010	1512	1506	1506	1422
4 – 5	2000	0,002	1355	1349	1350	1326
5 – 6	2000	0	1321	1315	1316	1292

Отметим, что при экстренном торможении со скорости 160 км/ч на уклоне до $-0,006$ по нормативам тормозной путь должен составлять не более 1600 м.

Результаты расчетов показали, что на длину тормозного пути поезда оказывает существенное влияние расстояние L от головы локомотива до точек 3, 4, 5 в момент начала торможения. Соответствующие графики представлены на рисунке 2. Наиболее существенно это влияние при значительном изменении уклона пути (кривые a и b). На участках с малыми уклонами (кривая $в$) такое изменение не столь велико.

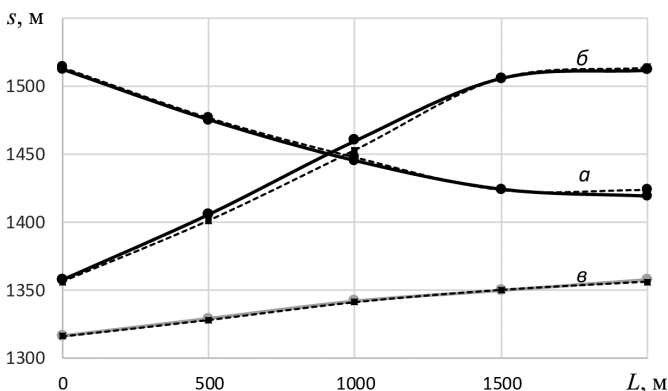


Рисунок 2 – Зависимости тормозного пути s от расстояния L до места изменения профиля пути:

a – торможение осуществляется перед точкой 3; b – перед точкой 4; $в$ – перед точкой 5

Таким образом, результаты определения тормозного пути поезда, рассчитанные по интервалам скорости и времени при использовании спрямления профиля участков дороги, а также методом, предполагающим рассмотрение поезда как системы твердых тел, оказались примерно одинаковыми. Расхождение значений, как правило, не превышает 10 м. При необходимости получения результатов с высокой точностью целесообразно вести расчет, рассматривая поезд как систему твердых тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Методические указания по выполнению тяговых расчетов. – Введ. 11.11.2021, приказ № 949НЗ. – Минск : Белорусская железная дорога, 2021. – 265 с.

2 **Гребенюк, П. Т.** Правила тормозных расчетов / П. Т. Гребенюк. – М. : Интекст, 2004. – 112 с.

3 **Галай, Э. И.** Тормозные системы железнодорожного транспорта. Расчет пневматических тормозов / Э. И. Галай, Е. Э. Галай, П. К. Рудов. – Гомель : БелГУТ, 2014. – 271 с.

4 **Вершинский, С. В.** Динамика вагонов / С. В. Вершинский, В. Н. Данилов, В. Д. Хусидов. – М. : Транспорт, 1991. – 360 с.

5 ГОСТ 33597–2015. Тормозные системы железнодорожного подвижного состава. Методы испытаний. – Введ. 2016–09–01. – Изд. офиц. – М. : Стандартиформ, 2019. – 28 с.

6 **Рудов, П. К.** Расчет тормозов вагонов : уч.- метод. пособие по курсовому проектированию / П. К. Рудов. – Гомель : БелГУТ, 2010. – 90 с.

7 **Гребенюк, П. Т.** Тяговые расчеты: справочник / П. Т. Гребенюк, А. Н. Долганов, А. И. Скворцова. – М. : Транспорт, 1987. – 272 с.

8 **Галай, Е. Э.** Анализ метода оценки обеспеченности грузового поезда тормозами на западноевропейских железных дорогах / Е. Э. Галай // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2020. – № 2. – С. 49–51.

9 **Bureika, G.** Research on the compatibility of the calculation methods of rolling-stock brakes / G. Bureika, S. Mikalunas // Transport. – 2008. – Vol. 23, is. 4. – P. 351–355.

10 **Mickoski, H.** Estimation and analysis of various influential factors in the braking process of rail vehicles / H. Mickoski, M. Djidrov, I. Mickoski // Vehicle System Dynamics. – 2021. – Vol. 59, is. 1. – P. 1–16.

11 **Ворожун, И. А.** Моделирование взаимодействия ярусов груза и платформы при торможении поезда / И. А. Ворожун, А. В. Шилович // Горная механика и машиностроение. – 2018. – № 2. – С. 52–58.

12 **Varazhun, I.** Determination of Longitudinal Forces in the Cars Automatic Couplers at Train Electrodynamic Braking / I. Varazhun, A. Shimanovsky, A. Zavarotny // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 134. – P. 415–421.

13 **Shimanovsky, A. O.** Research of the modern absorbing apparatus power characteristics influence on the freight train inter-car forces / A. O. Shimanovsky, P. A. Sakharau, M. G. Kuzniatsova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 985. – Article 012027. – 7 p.

P. K. RUDAU, A. U. VARAZHUN

Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

COMPARISON OF METHODS FOR THE BRAKE DISTANCE DETERMINING AT TRAIN MOVEMENT ALONG A VARIABLE PROFILE

The process of train braking on the track sections with a variable profile is considered. There is estimated the braking distance length for a passenger train, obtained by summing up over time and speed intervals, using the Western European method and based on the model of the train as a system of solid bodies – cars interacting with each other.

Keywords: emergency braking, train model, stopping distance, variable slope.

Получено 15.09.2022