

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТОРМОЗНОГО ПУТИ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА С ДИСКОВЫМ ТОРМОЗОМ

*Представлены результаты анализа методик расчета тормозных путей. Показано, что расчетные значения тормозных путей в значительной степени зависят от методики расчета. Установлено, что метод численного интегрирования дифференциального уравнения дает большую погрешность в определении тормозного пути по сравнению с методом Рунге-Кутты.*

При проектировании тормозных систем пассажирских вагонов одной из важнейших характеристик является расчетный тормозной путь поезда на площадке и нормированных уклонах. При этом актуальными остаются задачи по выбору метода определения длины тормозного пути поезда, критерием которого является сопоставимость результатов расчетных исследований с экспериментальными, полученными при ходовых тормозных испытаниях.

Нелинейное дифференциальное уравнение движения поезда как единой массы при неустановившемся торможении имеет вид [1]:

$$\frac{dv}{dt} = -\zeta \cdot \{b_T[\delta_o(t), \varphi_{mp}] + w_{ox}(v) \pm i\}, \quad (1)$$

где  $\zeta$  – замедление поезда под действием удельной замедляющей силы, км·кН/(Н·ч<sup>2</sup>), (км·тс/(кг·ч<sup>2</sup>));

$w_{ox}(v)$  – удельное основное сопротивление движению, Н/кН (кгс/тс);

$\pm i$  – величина уклона пути, ‰;

$\delta_o(t)$  – действительный коэффициент силы нажатия накладок;

$\varphi_{mp}$  – коэффициенты трения соответственно колодок и накладок;

$b_T$  – удельная тормозная сила, кН/кН (тс/тс), определяемая по формуле [1]:

$$b_T = \delta \cdot \varphi_{mp}. \quad (2)$$

При решении тормозных задач вводится допущение, что коэффициент трения тормозных колодок за время наполнения цилиндров не изменяется [1]. Процесс возрастания тормозной силы поезда представляется в виде непрерывной интегрируемой в квадратурах функции или аппроксимируется кусочно-линейной функцией времени. Для определения тормозных путей применяют метод интегрирования дифференциального уравнения движения поезда при установившемся торможении [1].

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

В зависимости от решения конкретных задач при тормозных расчетах используются следующие методы решения дифференциальных уравнений движения:

- 1) аналитический метод расчета по интервалам скорости (метод суммирования);
- 2) аналитический метод расчета интегрированием уравнения движения поезда при установившемся торможении;
- 3) метод расчета численным интегрированием по интервалам времени;
- 4) графический метод;
- 5) метод расчета по номограммам;
- 6) численное интегрирование системы дифференциальных уравнений.

В практике расчетных исследований стран СНГ наибольшее распространение получил метод численного интегрирования уравнения движения поезда по интервалам скорости. При этом разрешающее уравнение имеет вид [2]:

$$S_T = \frac{V_0 \cdot t_{II}}{3,6} + \sum_1^k \frac{4,17 \cdot (v_n^2 - v_k^2)}{b_T + w_{ок} + i_c}, \quad (3)$$

где  $V_0$  – скорость в начальный момент торможения, км/ч;

$k$  – количество интервалов скоростей;

$v_n$  и  $v_k$  – начальная и конечная скорости поезда в принятом расчетном интервале скоростей, км/ч;

$t_{II}$  – время подготовки автотормозов к действию, с.

Для пассажирского поезда при пневматическом и электропневматическом торможениях время подготовки автотормозов к действию определяется по формулам [2]:

$$t_{II} = 4 - \frac{5 \cdot i_c}{b_T}, \quad (4)$$

$$t_{II} = 2 - \frac{3 \cdot i_c}{b_T}. \quad (5)$$

Заслуживающим внимания является предложение Сафронова А.М. определять тормозные пути одиночного пассажирского вагона на площадке путем решения уравнения (1) методом Рунге-Кутты четвертого порядка с учетом времени наполнения тормозных цилиндров сжатым воздухом [3]:

$$\frac{dv}{dt} = -\zeta \cdot \left( \frac{r_{mp} \cdot n_{pm} \cdot \eta_{км}}{R_k \cdot P} \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{F_n}{1000} \cdot \left( \begin{array}{l} H(-t_1) H(-t) [-0,00203 \cdot (t-t_1)^3 - \\ - 0,10338 \cdot (-t_1) + 1,19382 \cdot (-t_1) + \\ + P_{ном} \cdot H(-t_2)] \end{array} \right) \cdot K_{mp} \right) \cdot \Phi_{mp} + w_{ок}(v) \right), \quad (6)$$

где  $H(x)$  – функция Хевисайда – кусочно-постоянная функция, которая определяется формулой:

$$H(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 0 \\ 1 & \text{при } x \geq 0 \end{cases}, \quad (7)$$

$t_1$  – время от начала торможения до начала прижатия тормозных накладок к диску, обусловленное преодолением силы отпускной пружины, с;

$t_2$  – время от начала торможения до установившегося давления в тормозном цилиндре, с;

$r_{mp}$  – радиус трения тормозного диска, мм;

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

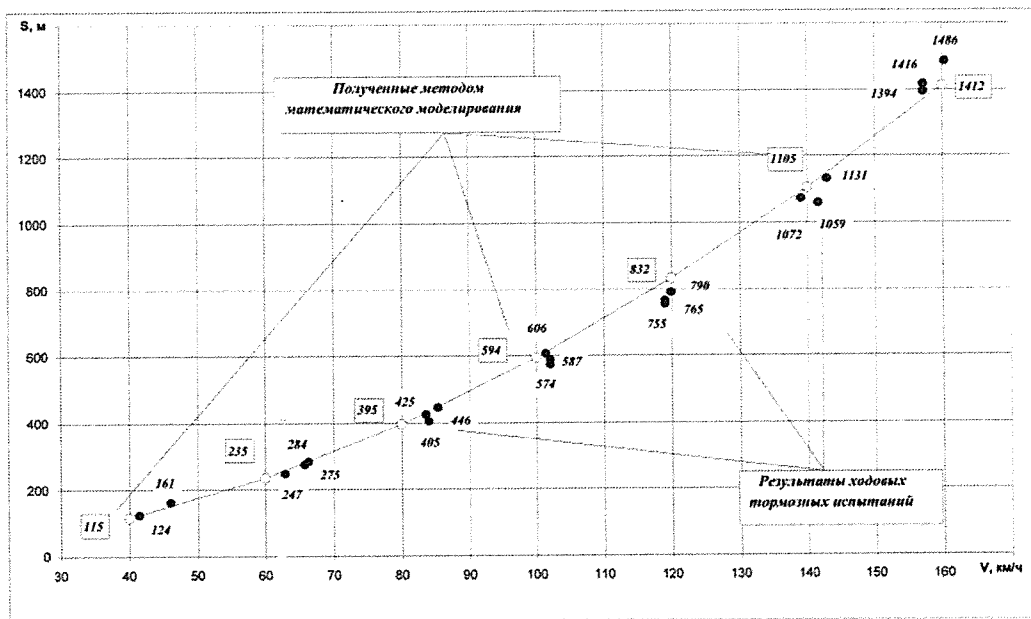
- $R_k$  – расчетный радиус колеса по кругу катания, мм;
- $p_{ном}$  – номинальное давление в тормозном цилиндре, кгс/см<sup>2</sup>;
- $n$  – количество дисков, установленных на вагоне;
- $i_{пр}$  – передаточное число рычажной передачи клещевых механизмов,;
- $\eta_{км}$  – КПД клещевого механизма;
- $K_{пр}$  – усилие возвратной пружины, кгс;
- $\varphi_{тр}$  – коэффициент трения накладки и диска;
- $P$  – вес вагона, тс;
- $F_{ч}$  – эффективная площадь тормозного цилиндра, см<sup>2</sup>.

Для определения тормозного пути поезда на площадке по результатам ходовых тормозных испытаний одиночного вагона методом «бросания» время подготовки тормозов к действию, учитывающее скорость распространения тормозной волны при пневматическом торможении, принимается равной половине времени, вычисляемого по формулам (4) или (5) без учета уклонов.

Сравнительный анализ тормозных путей, полученных при ходовых тормозных испытаниях одиночного вагона и по формуле (6), показал их хорошую сходимость (рис. 1).

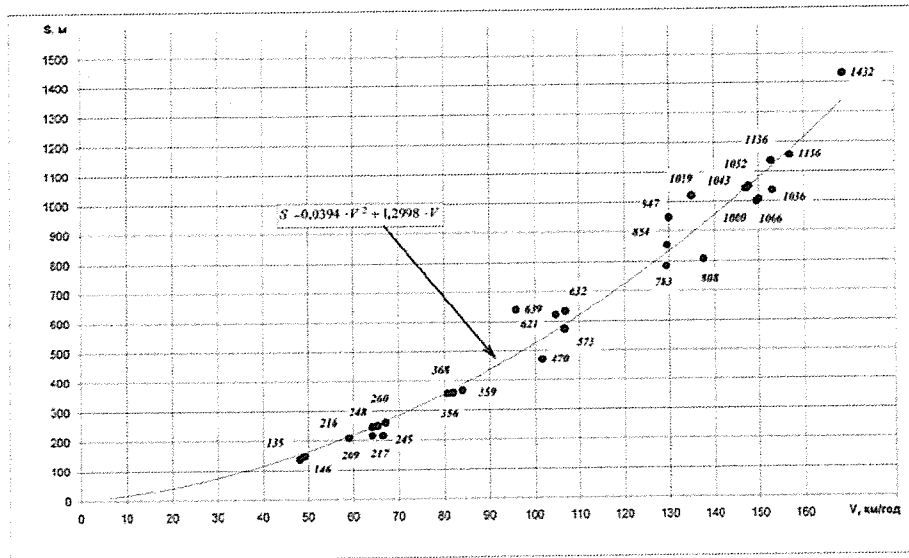
При проведении испытаний пассажирского поезда, состоящего из локомотива ЧС8 (вес 175 тс, восемь осей) и девяти порожних вагонов (с массой тары вагона – 55 т) была получена зависимость тормозного пути ( $S$ ) от скорости ( $V_0$ ) в начале торможения (рис. 2), описываемая уравнением:

$$S = 0,0394 \cdot V_0^2 + 1,2998 \cdot V_0, \quad (8)$$



**Рис. 1** Тормозные пути одиночного пассажирского вагона на площадке при экстренном пневматическом торможении

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД



**Рис.2** Тормозные пути пассажирского поезда в порожнем состоянии, полученные в процессе ходовых тормозных испытаний на участке «Полтава-Гребенка-Полтава», при экстренном пневматическом торможении

Теоретический расчет тормозного пути поезда по формулам (3) и (6) выполнялся при следующих характеристиках тормозной эффективности:

Локомотив:

- расчетная сила нажатия тормозных колодок на ось – 16 тс [4];
- расчетный коэффициент силы нажатия чугунных колодок на колеса:

$$\delta_{л} = \frac{16 \cdot 8}{175} = 0,731 ,$$

– действительный коэффициент силы нажатия в пересчете на дисковый тормоз определялся по номограмме (рис.3) и составил 0,189.

Для пассажирских вагонов действительный коэффициент силы нажатия накладок на диски составляет 0,289.

Действительный коэффициент силы нажатия накладок поезда определялся по формуле:

$$\delta_{д,поезд} = \frac{Q_{л} \cdot \delta_{л} + m \cdot T_{в} \cdot \delta_{в}}{Q_{л} + m \cdot T_{в}} , \quad (9)$$

где  $Q_{л}$  – вес экипированного локомотива,  $Q_{л} = 175$  тс;

$m$  – количество вагонов в составе пассажирского поезда,  $m = 9$ ;

$T_{в}$  – масса тары одного пассажирского вагона,  $T_{в} = 55$  т;

$\delta_{л}$  и  $\delta_{в}$  – действительные коэффициенты силы нажатия накладок на диск соответственно для локомотива и вагона.

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

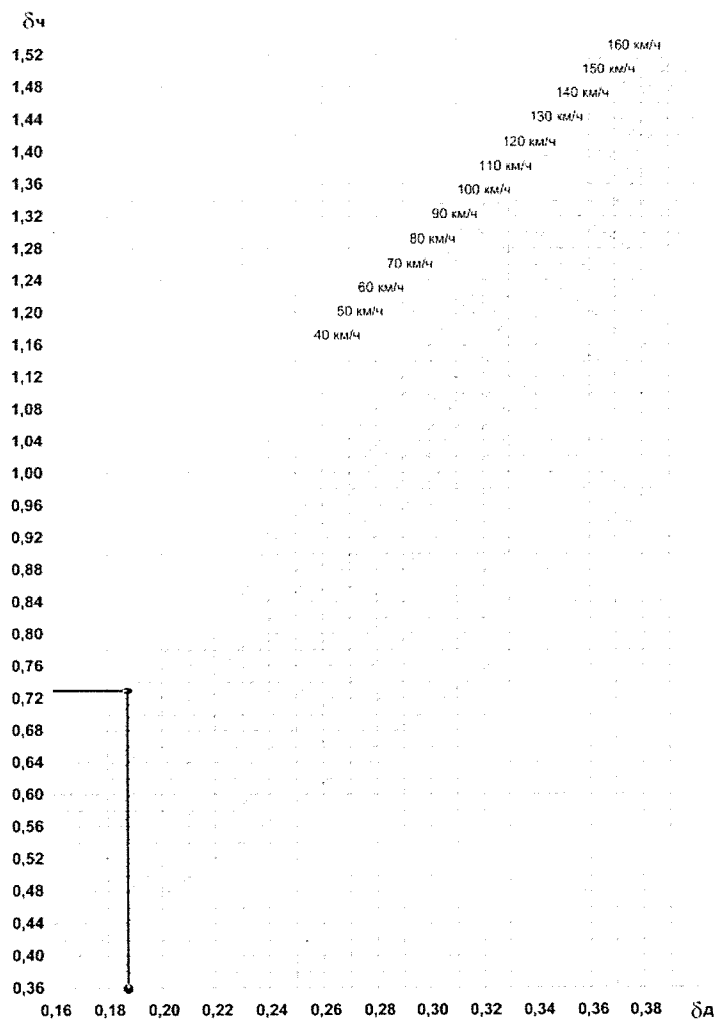
Таким образом,

$$\delta_{\text{о.мксн}} = \frac{175 \cdot 0,189 + 55 \cdot 0,289 \cdot 9}{175 + 55 \cdot 9} = 0,263$$

Средняя осевая нагрузка для поезда составляет:

$$q = \frac{Q_s + m \cdot T_g}{8 + 4 \cdot m} = \frac{175 + 55 \cdot 9}{44} = 15,23 \quad \text{тс.}$$

Расчетные значения тормозных путей пассажирского поезда, выполненные по двум методикам, показали, что наилучшее совпадение с экспериментальными данными получено методом непосредственного решения дифференциального уравнения Рунге-Кутты (рис. 4).



**Рис.3 Номограммы пересчета расчетного коэффициента силы нажатия чугунных колодок на действующий коэффициент силы нажатия накладок на диски**

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

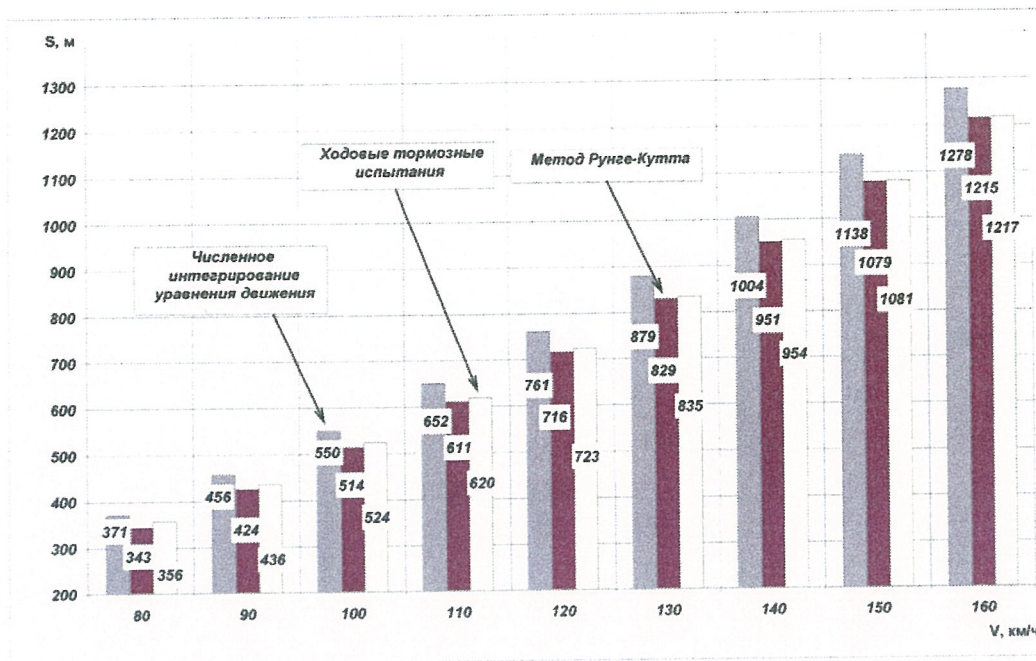


Рис. 4. Расчетные и фактические значения тормозных путей пассажирского поезда на площадке при экстренном пневматическом торможении

Максимальное расхождение расчетных и фактических значений тормозных путей составило более 5 % при использовании метода численного интегрирования, особенно методом Рунге-Кутты является уменьшение расхождений тормозных путей с увеличением скорости в начале торможения (рис. 5).

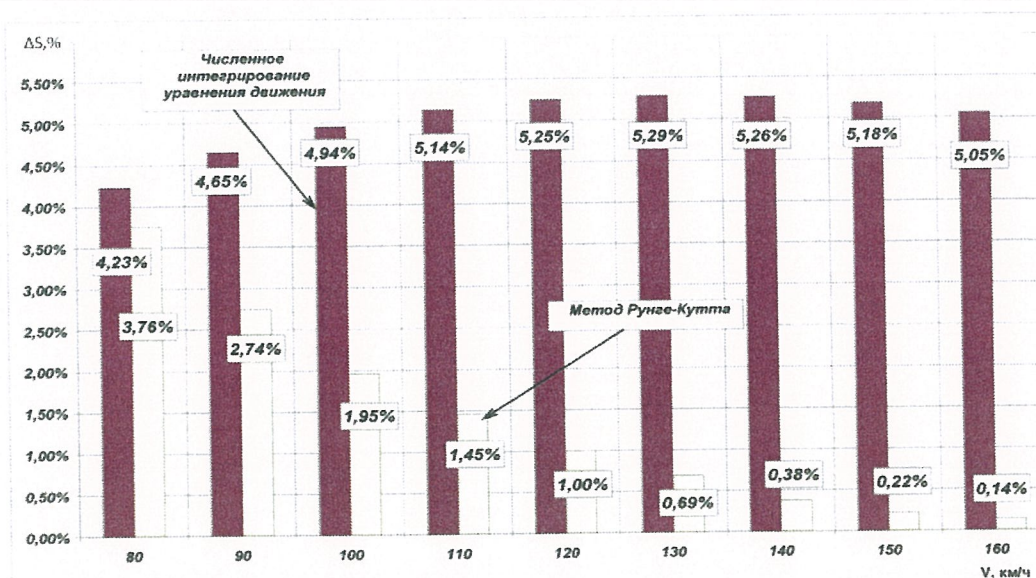


Рис. 5. Отклонение расчетных и фактических значений тормозных путей пассажирского поезда на площадке при экстренном пневматическом торможении

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

---

### Выводы

1 Выполненные исследования показали, что наилучшее совпадение расчетных и фактических тормозных путей может быть получено при непосредственном решении дифференциального уравнения методом Рунге-Кутты.

2 При определении тормозного пути пассажирского поезда методом численного интегрирования расчетные и фактические тормозные пути отличаются более чем на 5 %.

3 Для более объективной оценки тормозных путей как одиночных вагонов, так и пассажирского поезда более предпочтительным является метод Рунге-Кутты.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гребенюк П.Т. Правила тормозных расчетов / Труды ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2004. – 112 с.
2. Иноземцев В.Г. Нормы и методы расчета автотормозов / Иноземцев В.Г., Гребенюк П.Т. – М.: «Транспорт», 1971. – 157 с.
3. Сафронов О.М. Підвищення гальмівної ефективності пасажирських вагонів шляхом удосконалення процесів функціонування дискових гальм: дис. ... кандидата техн. наук: 05.22.07 / Сафронов Олександр Михайлович. – К., 2010. – 168 с.
4. ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015 Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України. – К.: Транспорт України, 2002. – 145 с.