

УДК 629.4.077-592.117.001.4

*Ю. Я. Водяников
Т. В. Шелейко
А. Е. Нищенко*

ТОРМОЗНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА В ЗАВИСМОСТИ ОТ ЧИСЛА ОСЕЙ В СОСТАВЕ

Представлена методология определения тормозной эффективности грузового поезда с произвольным количеством осей. Методология базируется на использовании результатов тормозных испытаний опытного вагона. Приведены математическая модель торможения поезда, а также расчетные зависимости для определения тормозного пути и тормозного коэффициента.

Подано методологію визначення гальмівної ефективності вантажного поїзда з довільною кількістю осей. Методологія базується на використанні результатів гальмівних випробувань дослідного вагона. Наведені математична модель гальмування поїзда, а також розрахункові залежності для визначення гальмівного шляху і гальмівного коефіцієнта.

Is the methodology for the determination of the braking efficiency of the freight train with an arbitrary number of axes. The methodology is based on the use of the results of the brake testing of an experienced coach. Mathematical model shows braking trains, as well as calculated according to determine the braking distance and braking rate.

Ключевые слова: вагон, грузовой поезд, тормозная эффективность, тормозной путь, тормозной коэффициент, скорость, время, число осей.

Дальнейшее развитие грузовых вагонов в направлении повышения скоростей и осевой нагрузки в одну из основных выдвигает задачи совершенствования методов оценки тормозной эффективности. В этих условиях ограничение экспериментальных исследований только оценкой тормозной эффективности одиночного вагона является недостаточной. Поэтому основной целью ходовых тормозных испытаний вагона должно стать не только определение его тормозной эффективности, но и оценка способности вагона обеспечить тормозную эффективность грузового поезда как на площадке, так и на нормированных спусках.

В этой связи, задачи оценки тормозной эффективности поезда в зависимости от количества вагонов (осей) являются актуальными.

© Водяников Ю. Я., Шелейко Т. В., Нищенко А. Е., 2013

Поставленная задача решалась расчетно-экспериментальным методом путем использования фактических параметров тормозной эффективности одиночного вагона, полученных в процессе ходовых тормозных испытаний.

Математическая модель при экстренном торможении грузового поезда как единой массы имеет вид [1]:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = -\zeta \cdot \{ 1000 \cdot \gamma(N, V_{ms}, t) \cdot \delta_{pn} \cdot \varphi_{mp} + w_{ox}(V) \pm i \}, \quad (1)$$

где ζ – замедление поезда под действием удельной замедляющей силы;

$w_{ox}(V)$ – удельное основное сопротивление движению;

$\pm i$ – величина уклона пути, при торможении на площадке $i=0$;

δ_{pn} – тормозной коэффициент для поезда (расчетный коэффициент силы нажатия колодок при номинальных давлениях в тормозных цилиндрах);

φ_{mp} – расчетный коэффициент трения композиционных колодок, определяется по формуле [2]:

$$\varphi_{mp} = 0,36 \cdot \frac{V + 150}{2 \cdot V + 150}; \quad (2)$$

$\gamma(N, V_{ms}, t)$ – функция, отображающая изменение тормозного коэффициента поезда в относительных единицах от времени торможения;

N – количество вагонов в составе поезда (осей);

V_{ms} – скорость распространения тормозной волны, м/с;

t – время торможения.

Функция $\gamma(N, V_{ms}, t)$ определяется по формуле:

$$\frac{1}{N \cdot Q_g} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{N} \cdot \beta(t - \frac{(2 \cdot i - 1) \cdot L_{\bar{c}}}{2 \cdot V_{ms}}) \cdot \delta_p \cdot Q_g \right); \quad (3)$$

где δ_p – тормозной коэффициент i -го вагона при номинальном давлении в тормозном цилиндре;

Q_g – вес (брутто) вагона;

$L_{\bar{c}}$ – база вагона по осям сцепления автосцепок j -го вагона;

i – порядковый номер вагона в составе поезда;

t – текущее время, с;

$\beta_i(t)$ – функция, отображающая изменение тормозного коэффициента (в относительных единицах) одиночного вагона от времени торможения;

V_{ms} – скорость распространения тормозной волны.

Основными факторами, влияющими на тормозную эффективность грузового поезда, являются:

- тормозная эффективность одиночного вагона;
- скорость распространения тормозной волны;
- количество осей (вагонов) в составе поезда.

Для иллюстрации предложенной методологии, рассматривался грузовой поезд из однотипных вагонов. В качестве субъекта исследования был принят вагон для перевозки минеральных удобрений. Вагон прошел полный цикл тормозных ходовых испытаний в диапазоне скоростей в начале торможения (40-120) км/ч, резуль-

таты которых представлены на рис. 1. На рис. 2 приведена диаграмма изменения тормозного коэффициента в относительных единицах, полученная на основе индикаторной диаграммы наполнения тормозного цилиндра сжатым воздухом.

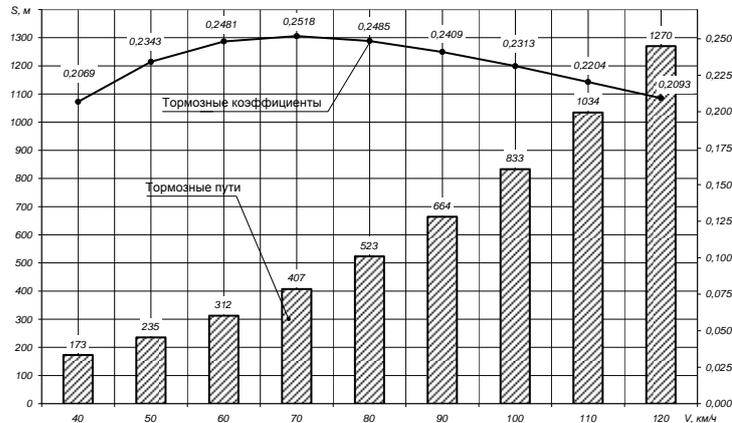


Рис. 1. Экспериментальные значения тормозных путей тормозных коэффициентов одиночного вагона

Для решения дифференциального уравнения (1) использовался метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Исследования показали, что скорость распространения тормозной волны не оказывает значительное влияния на тормозную эффективность поезда, о чем свидетельствует время неустановившегося торможения для различных скоростей тормозной волны (рис. 3). Так при увеличении скорости распространения тормозной волны в 1,2 раза (с 250 м/с до 300 м/с) время неустановившегося торможения уменьшается в 1,016 раза.

Поэтому дальнейшие расчетно-экспериментальные исследования проводились для скорости распространения тормозной волны равной 270 м/с.

Особенности изменения тормозных коэффициентов грузового поезда приведены на рис. 4. Тормозные коэффициенты поезда аппроксимировались аналитической зависимостью методом наименьших квадратов [3] в виде полинома, наивысшая степень которого выбиралась исходя из значения коэффициента детерминации $R^2 \geq 0,990$.

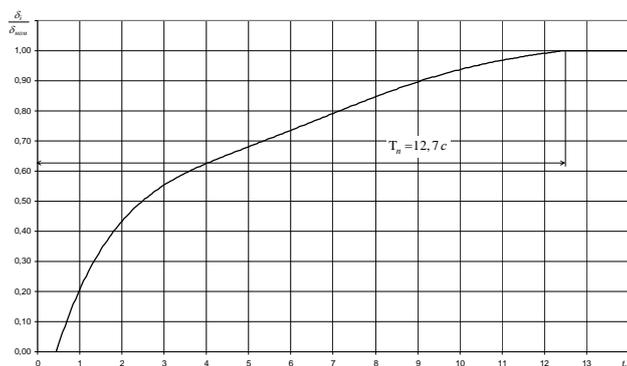


Рис. 2. Диаграмма изменения тормозного коэффициента одиночного вагона (в относительных единицах)

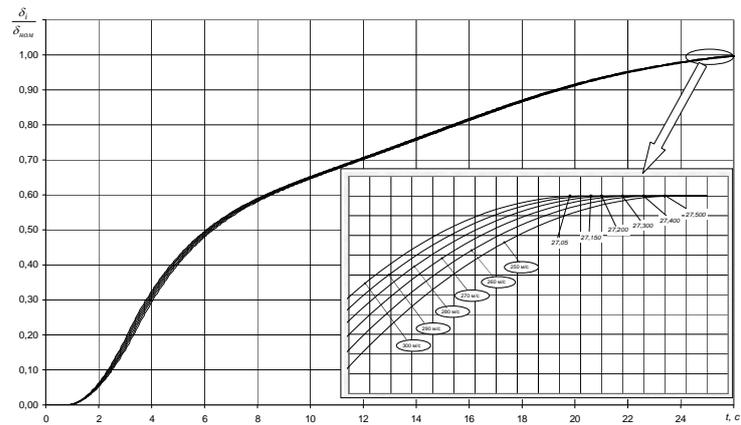


Рис. 3. Диаграммы изменения тормозного коэффициента грузового поезда в зависимости от скорости распространения тормозной волны

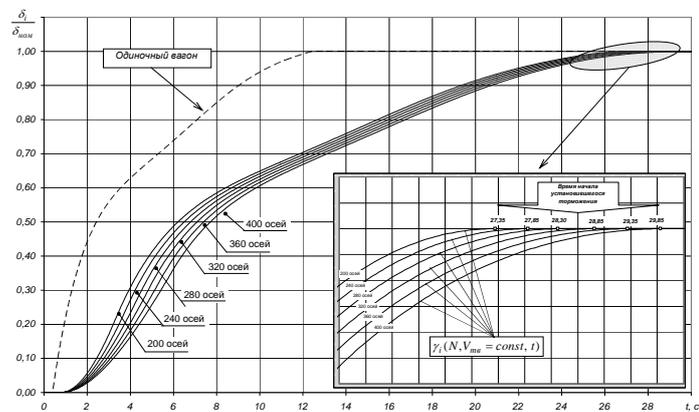


Рис. 4. Диаграммы тормозных коэффициентов грузового поезда при изменении количества осей

В результате многовариантного решения дифференциального уравнения (1) была получена линейка показателей тормозной эффективности грузового поезда при экстренном пневматическом торможении на площадке (рис. 5 и 6), а также на нормированных спусках [4] (рис.7 и 8) в зависимости от числа осей.

Анализ результатов показал, что тормозной путь имеет квадратичную зависимость от количества осей в составе грузового поезда, а тормозной коэффициент – степенную, что позволяет эффективность одиночного вагона пересчитывать на грузовой поезд с произвольным количеством вагонов.

На основании расчетно-экспериментальных исследований получены формулы для определения тормозного пути и тормозного коэффициента грузового поезда при экстренном пневматическом торможении в зависимости от числа осей в составе (табл. 1 и 2).

В качестве примера использования полученных формул, на рис. 9 и 10 приведены результаты расчета тормозной эффективности поезда в диапазоне скоростей в начале торможения (40-120) км/ч при числе осей от 400 до 1000.

Изложенная методика реализована на ЭВМ в виде пакета прикладных программ, написанных на языке FOXPRO.

Результаты исследования касаются грузового вагона для перевозки минеральных удобрений, для вагона с другими параметрами тормозной эффективности результаты могут отличаться от полученных.

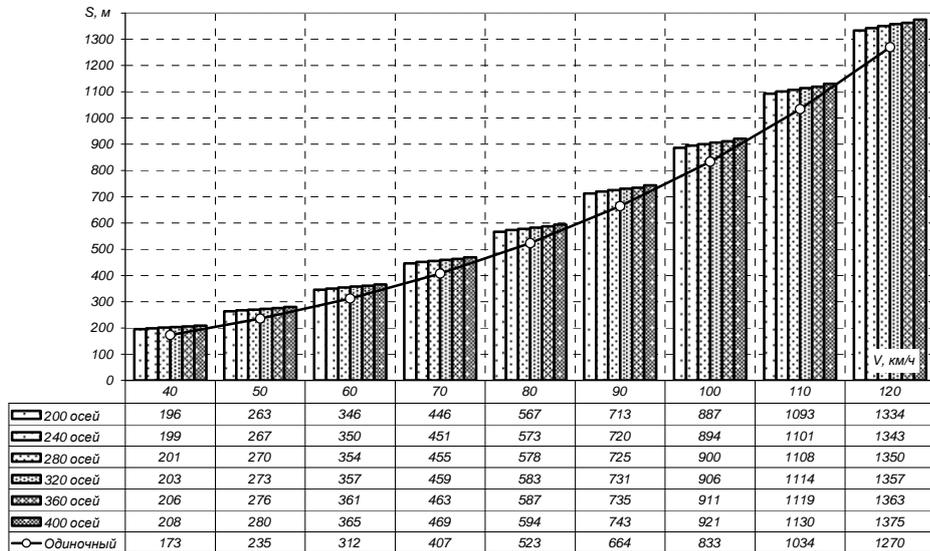


Рис. 5. Тормозные пути грузового поезда при экстренном пневматическом торможении на площадке в зависимости от числа осей

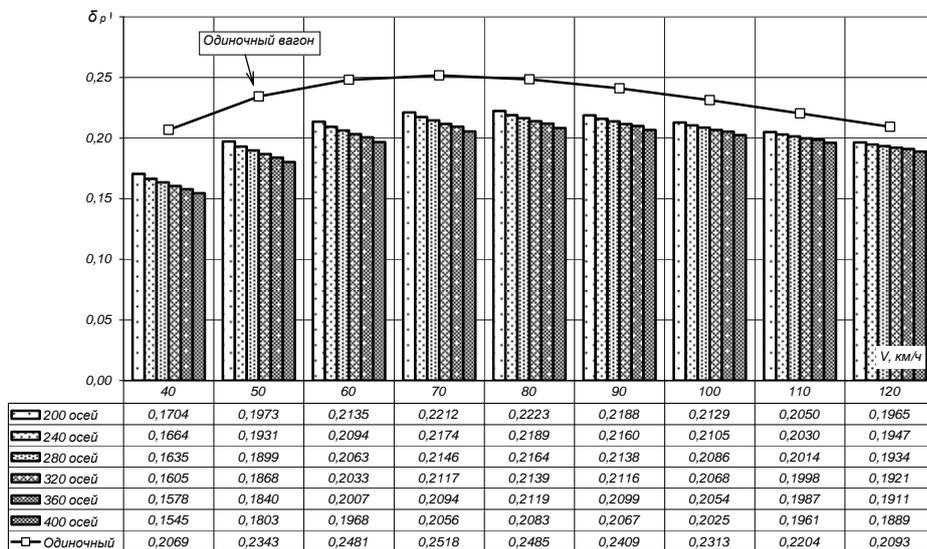


Рис. 6. Тормозные коэффициенты грузового поезда в зависимости от числа осей при экстренном пневматическом торможении на площадке

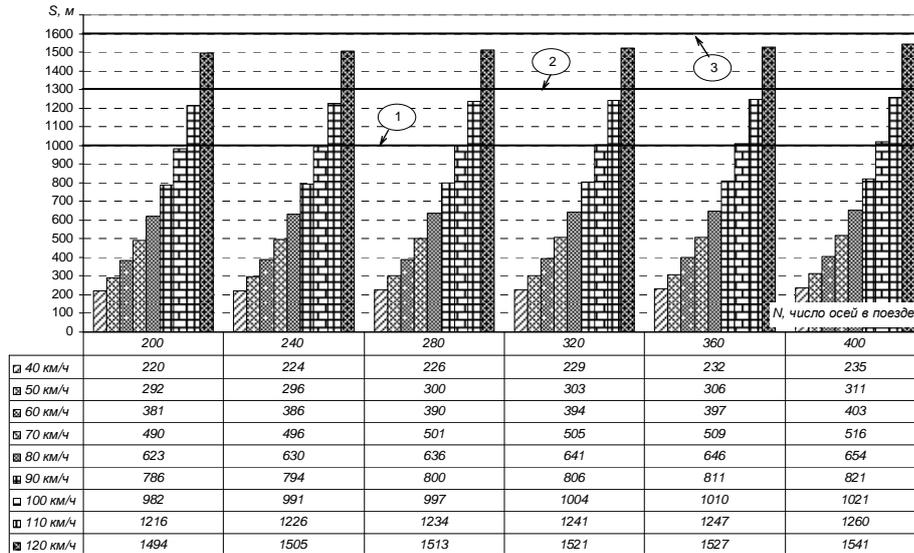


Рис. 7. Тормозные пути грузового поезда в зависимости от числа осей при экстренном пневматическом торможении на спуске 6 ‰
(1 – допустимое значение тормозного пути при скорости 80 км/ч; 2 – при скорости 90 км/ч; 3 – при скорости 90 км/ч)

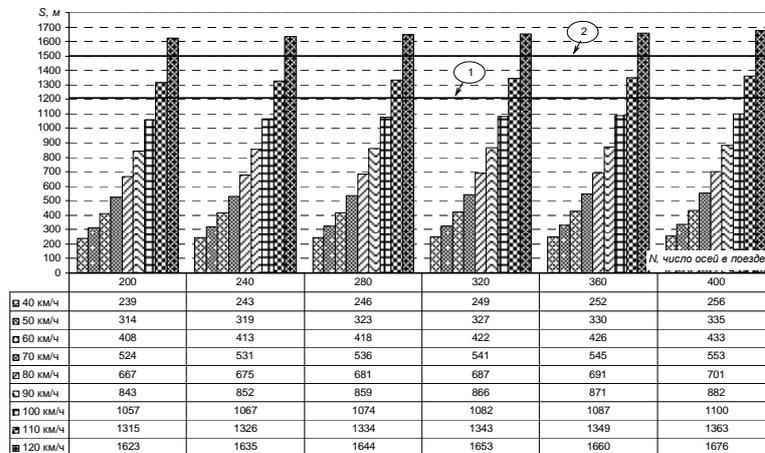


Рис. 8. Тормозные пути грузового поезда в зависимости от числа осей при экстренном пневматическом торможении на спуске 10 ‰
(1 – допустимое значение тормозного пути при скорости 80 км/ч; 2 – при скорости 90 км/ч)

Таблиця 1. Формулы для определения тормозного пути грузового поезда в зависимости от числа осей (N) при экстренном пневматическом торможении

Скорость, км/ч	Тормозной путь грузового поезда
40 км/ч	$S = 0,000078 \cdot N^2 + 0,147267 \cdot N + 1302,0637;$ $R^2 = 0,989706$
50 км/ч	$S = -0,000012 \cdot N^2 + 0,084830 \cdot N + 247,176500;$ $R^2 = 0,997496$
60 км/ч	$S = -0,000002 \cdot N^2 + 0,096147 \cdot N + 326,917243;$ $R^2 = 0,99627$
70 км/ч	$S = 0,00001 \cdot N^2 + 0,105987 \cdot N + 424,548471;$ $R^2 = 0,99492$
80 км/ч	$S = 0,000023 \cdot N^2 + 0,115077 \cdot N + 543,470529;$ $R^2 = 0,99361$
90 км/ч	$S = 0,000037 \cdot N^2 + 0,123532 \cdot N + 687,303486;$ $R^2 = 0,992393$
100 км/ч	$S = 0,000051 \cdot N^2 + 0,131595 \cdot N + 858,975214;$ $R^2 = 0,991367$
110 км/ч	$S = 0,000078 \cdot N^2 + 0,147267 \cdot N + 1302,063700;$ $R^2 = 0,989706$
120 км/ч	$S = 0,000078 \cdot N^2 + 0,147267 \cdot N + 1302,063700;$ $R^2 = 0,989706$

Таблиця 2. Формулы для определения тормозного коэффициента грузового поезда в зависимости от числа осей (N) при экстренном пневматическом торможении

Скорость, км/ч	Тормозной коэффициент грузового поезда
1	2
40 км/ч	$\delta_{pn} = 672,33 \cdot (0,000078 \cdot N^2 + 0,147267 \cdot N + 1302,0637)^{-1,5693}$
50 км/ч	$\delta_{pn} = 959,53 \cdot (-0,000012 \cdot N^2 + 0,084830 \cdot N + 247,1765)^{-1,5231}$
60 км/ч	$\delta_{pn} = 1195,6 \cdot (-0,000002 \cdot N^2 + 0,096147 \cdot N + 326,917243)^{-1,4764}$
70 км/ч	$\delta_{pn} = 1378,7 \cdot (0,00001 \cdot N^2 + 0,105987 \cdot N + 424,548471)^{-1,4325}$
80 км/ч	$\delta_{pn} = 1531,1 \cdot (0,000023 \cdot N^2 + 0,115077 \cdot N + 543,470529)^{-1,3939}$
90 км/ч	$\delta_{pn} = 1672,5 \cdot (0,000037 \cdot N^2 + 0,123532 \cdot N + 687,303486)^{-1,3611}$
100 км/ч	$\delta_{pn} = 1814,5 \cdot (0,000051 \cdot N^2 + 0,131595 \cdot N + 858,975214)^{-1,3334}$
110 км/ч	$\delta_{pn} = 1964,1 \cdot (0,000078 \cdot N^2 + 0,147267 \cdot N + 1302,0637)^{-1,3103}$
120 км/ч	$\delta_{pn} = 2125,6 \cdot (0,000078 \cdot N^2 + 0,147267 \cdot N + 1302,0637)^{-1,2909}$

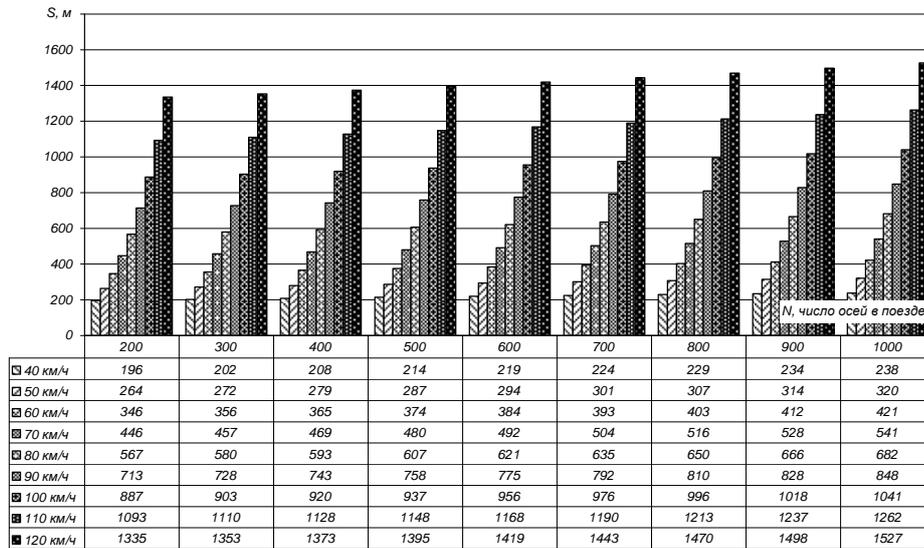


Рис. 9. Тормозные пути грузового поезда в зависимости от числа осей при экстренном пневматическом торможении на площадке, полученные по формулам табл. 1

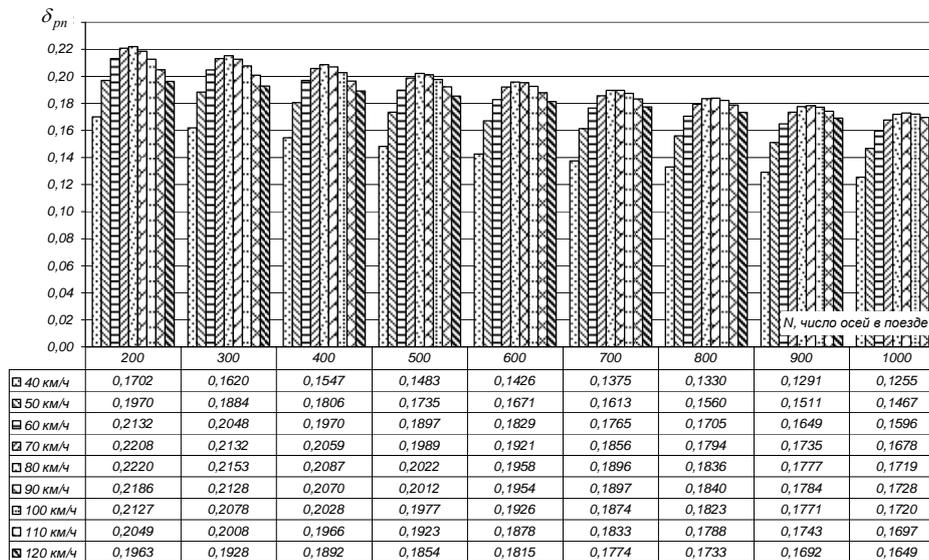


Рис. 10. Тормозные коэффициенты грузового поезда в зависимости от числа осей при экстренном пневматическом торможении на площадке, полученные по формулам табл. 2

Выводы

1. Предложена методология по определению тормозной эффективности грузового поезда с произвольным количеством осей, которая базируется на фактических результатах испытаний тормозной системы одиночного вагона.
2. В результате исследований было установлено, что скорость распространения тормозной волны в пределах (250-300) м/с практически не оказывает влияние на тормозную эффективность грузового поезда.
3. На тормозную эффективность поезда основное влияние оказывают тормозные характеристики опытного вагона и число осей (вагонов) в составе грузового поезда.
4. Методология может быть использована для исследования тормозных систем грузовых вагонов с повышенными осевыми нагрузками с целью отработки конструктивного решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гребенюк П. Т.* Правила тормозных расчетов / Труды ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2004. – 114 с.
2. *Иноземцев В. Г.* Нормы и методы расчета автотормозов / В.Г. Иноземцев, П.Т. Гребенюк. – М.: Транспорт, 1971. – 57 с.
3. *Гутер Р. С., Овчинский Б. В.* Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. – М.: Наука, 1970. – 432 с.
4. ЦШ-0001 Інструкція з сигналізації на залізницях України. – К.: Міністерство транспорту та зв'язку України: ТОВ «Інпрес», 2008. – 159 с.