

УДК 629.4.077-592.117

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ РАСЧЕТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СИЛЫ НАЖАТИЯ ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОЕЗДНЫХ ТОРМОЗНЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Канд. техн. наук А.М. Сафронов

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНОГО ЗНАЧЕННЯ РОЗРАХУНКОВОГО КОЕФІЦІЄНТА СИЛИ НАТИСКАННЯ ГАЛЬМІВНИХ КОЛОДОК ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ПОЇЗНИХ ГАЛЬМІВНИХ ВИПРОБУВАНЬ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ

Канд. техн. наук О.М. Сафронов

THE ALGORITHM FOR DETERMINING THE ACTUAL VALUES OF THE ESTIMATED COEFFICIENT OF BRAKE SHOES PRESS FORCE ACCORDING TO TRAIN BRAKE TESTS RESULTS FOR FREIGHT CARS

Cand. of techn. sciences O. Safronov

Наведено алгоритм визначення фактичного розрахункового гальмівного коефіцієнта вантажного вагона за результатами ходових гальмівних випробувань. Алгоритм враховує основні особливості зміни гальмівного коефіцієнта, обумовленого наростанням тиску в гальмівному циліндрі при гальмуванні.

Ключові слова: алгоритм, гальмівний шлях, швидкість, гальмівний коефіцієнт, тиск стисненого повітря, гальмування, часовий інтервал, відносна сила натиснення.

Представлен алгоритм определения фактического расчетного тормозного коэффициента грузового вагона по результатам ходовых тормозных испытаний. Алгоритм учитывает основные особенности изменения тормозного коэффициента, обусловленного нарастанием давления в тормозном цилиндре при торможении.

Ключевые слова: алгоритм, тормозной путь, скорость, тормозной коэффициент, давление сжатого воздуха, торможение, временной интервал, относительная сила нажатия.

The task of creation of competitive constructions for railway rolling stock vehicles, providing operational reliability and improved technical and economic indexes, makes strict requirements to the construction of the main railcar units, and particularly to brake systems, corresponding to the requirements of international standards. For this reason the further development of railway vehicles includes considerable quality changes of trainstop equipment, associated with the necessity to raise trains specific braking force; especially in the high speed range, and improvement of long train controllability during their running in braking modes. Final assessment of the railcar braking efficiency is made on the results of running and braking tests. In this case the problems of true test results receiving are urgent, and matters of research methods, their characteristics and properties improvement take the particular importance.

The essential research part is the choice of methods for receiving, processing and analyzing of experimental data. Data processing means values arrangement, their classification and analysis. Experimental results must be represented in readable recording forms – tables, diagrams, formulas, that allow to compare and analyze obtained results quickly.

The algorithm for determining the actual estimated brake coefficient of the freight car according to running brake tests was submitted. The algorithm includes key features of the brake coefficient variation, caused by the increase of pressure in the brake cylinder at braking.

Keywords: algorithm, stopping distance, speed, brake coefficient, compressed air pressure, braking, time interval, relative press force.

Вступлення. Одним из главных показателей экономического развития государства является устойчивая работа его транспортной системы. Особенности Украины определяют в качестве основного вида транспорта – железнодорожный, который обеспечивает около 70 % общего объема грузооборота, а следовательно, занимает решающее место в транспортной системе Украины. Это формирует особые требования к надежности подвижного состава в целом.

Задача создания конкурентоспособных конструкций транспортных средств подвижного состава железных дорог, обеспечивающих надежность в эксплуатации и улучшенные технико-экономические показатели, выдвигает повышенные требования к конструкции основных узлов вагонов, в частности к тормозным системам, которые должны соответствовать требованиям международных стандартов. Поэтому дальнейшее развитие железнодорожного транспорта предусматривает существенное качественное изменение автотормозной техники, связанное с необходимостью повышения удельной тормозной силы поездов, особенно в диапазоне высоких скоростей, и улучшением управляемости длинносоставными поездами при движении их в тормозных режимах.

Необходимость таких исследований обусловлена еще и тем, что эксплуатация подвижного состава связана с сохранностью груза и безопасностью пассажиров. Поскольку одним из важнейших факторов при определении максимальной допустимой скорости движения поездов является

надежность и эффективность тормозных систем вагонов это вызывает необходимость выполнения научно-технических исследований, частью которых является проведение длительных, достаточно трудоемких испытаний как отдельных элементов, так и конструкции в целом.

Как правило, тормозная система вагона подвергается двум видам испытаний: стационарным и тормозным ходовым. Целью стационарных испытаний является установление характеристик тормозной системы на соответствие инструкции [1]. В процессе тормозных ходовых испытаний определяется тормозная эффективность вагона на соответствие нормативным требованиям [2, 3, 4].

Окончательная оценка тормозной эффективности вагона осуществляется по результатам ходовых тормозных испытаний. При этом актуальными остаются проблемы получения достоверных результатов испытаний.

Наиболее достоверные показатели тормозной эффективности вагона при ходовых тормозных испытаниях могут быть получены методом «бросания», при котором в момент достижения опытным поездом заданной скорости исследуемый вагон автоматически отцепляется от опытного поезда, в то время как поезд уходит вперед. Тормозной путь определяется как разность величин путей, проходимого поездом от точки отцепления опытного вагона до его остановки и обратно до возвращения к испытываемому вагону (рис. 1) [5, 6, 7].



Рис. 1. Определение тормозного пути опытного вагона методом «бросания»

Указанный метод позволяет получить тормозные пути одиночного вагона в заданном диапазоне скоростей в начале торможения.

В качестве основного критерия оценки тормозной эффективности принят расчетный коэффициент силы нажатия тормозных колодок

на колеса (далее тормозной коэффициент) [2, 3]. Так, например, для груженых вагонов, оборудованных авторежимом, минимальное значение расчетного коэффициента составляет 0,14, для порожних – 0,22 [2]. Допустимая скорость движения грузовых поездов

определяется единым наименьшим нажатием тормозных колодок на 100 тонн веса поезда в пересчете на чугунные колодки [3]. Для дальнейшего совершенствования автотормозной техники требуется проведение исследовательских работ, к основным из которых следует отнести изыскание более эффективных способов торможения поездов и усовершенствованию работы тормозной системы.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами. При проектировании единиц подвижного состава нового поколения особое значение приобретают вопросы совершенствования методов исследования их характеристик и свойств.

Важным разделом исследования является выбор методов получения, обработки и анализа экспериментальных данных. Обработка данных сводится к систематизации всех значений, классификации, анализу. Результаты экспериментов должны быть сведены в удобочитаемые формы записи – таблицы, графики, формулы, позволяющие быстро сопоставлять и анализировать полученные результаты. Размерность всех параметров должна соответствовать единой системе физических величин. Особое внимание должно быть уделено математическим методам обработки и анализа опытных данных, в том числе установлению эмпирических зависимостей, аппроксимации связей между варьируемыми характеристиками, установлению критериев и доверительных интервалов. В связи с этим дальнейшее развитие тормозных систем и повышение тормозной эффективности вагонов невозможно без применения новых, более углубленных методов экспериментального исследования и анализа процессов торможения. Такие исследования невозможно провести без проверки конструкторских и технических решений на конкретном вагоне в условиях экстренных торможений при различных скоростях движения, кроме того, определение эффективности тормозной системы является одним из основных видов специальных поездных испытаний опытных вагонов. Указанные исследования требуют более совершенных способов и методов по оценке тормозной эффективности как вагонов, так и новых тормозных систем.

Работа выполнена согласно действующим Государственным программам и концепциям: „Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки”; Транспортная стратегия Украины до 2020 года.

Следует отметить, что в рамках указанных программ созданы и успешно прошли испытания грузовые вагоны с отдельными тормозными системами на каждой тележке. Планируется увеличение скоростей движения грузовых поездов до 100 км/ч и выше. Создаются грузовые вагоны с повышенной осевой нагрузкой 25-30 т/ось. Тщательный анализ тормозной эффективности грузовых вагонов нового поколения требует использования нетрадиционных подходов к методам получения оценочных критериев.

Основная проблема определения фактического тормозного коэффициента при ходовых тормозных испытаниях состоит в том, что номограммы зависимости тормозных путей от тормозного коэффициента представлены для грузовых поездов из 200 и более осей [8], что не позволяет их использование для критериальной оценки тормозного коэффициента отдельного вагона.

Такие задачи могут быть решены расчетно-экспериментальным методом на основе моделирования процессов торможения, исходными данными для которого являются результаты ходовых тормозных испытаний (скорость в начале торможения и соответствующий ей тормозной путь). При этом используется уравнение движение вагона при торможении, которое описывается нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка [8]:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = -\zeta \cdot \{b_T(\delta_p(t), \varphi_{mp}) + w_{ox}(v) \pm i\}, \quad (1)$$

где φ_{mp} - коэффициент трения;

ζ - замедление поезда под действием удельной замедляющей силы;

$w_{ox}(v)$ - удельное основное сопротивление движению;

$\pm i$ - величина уклона пути;

$\delta_p(t)$ - расчетный коэффициент силы нажатия колодок на колесо, зависит от времени нарастания давления в тормозном цилиндре.

Анализ последних исследований и публикаций. За последние годы получили дальнейшее развитие аппаратно-программные комплексы и методы экспериментальных исследований тормозных систем вагонов различного назначения.

Важным фактором повышения достоверности результатов является автоматизация проведения испытаний, которая позволяет свести к минимуму количество ошибок, вызванных человеческим фактором, повысить точность вычислений и сократить время на проведение испытаний.

Так, в ГП «УкрНИИВ» был разработан и успешно прошел апробацию программно-аппаратный комплекс [5, 9]. Аппаратная часть комплекса для проведения испытаний состоит из механизма расцепления вагонов [10], датчика оборотов колеса, АЦП, ПК (ноутбук). Программная часть состоит из компьютерной программы "DynamicBrake", которая зарегистрирована в Государственной службе интеллектуальной собственности Украины что подтверждается Свидетельством о регистрации авторского права на произведение №46909, дата регистрации 24.12.2012 г. Программа позволяет записывать и обрабатывать различные по физической природе процессы (обороты колеса, температура нагрева колодок, давление в тормозном цилиндре, отслеживать юзовые ситуации и т. д.).

В работе [11] предложена методология пересчета тормозной эффективности

одиночного вагона на тормозную эффективность грузового поезда с использованием фактических характеристик тормозной системы, полученных в результате тормозных испытаний, а также установления фактического значения времени подготовки к торможению, обусловленного распространением тормозной волны и последовательным вовлечением в тормозной процесс каждого вагона в составе поезда. Развитие методов и методологии оценивания тормозной эффективности подвижного состава изложены в работах [5-16].

Исследованиями в области тормозной техники занимались такие известные ученые, как Иноземцев В.Г., Гребенюк П.Т., Крылов В.И., Крылов В.В., Асадченко В.Р., Водяников Ю.Я., Долганов А.Н. и др.

Цели и задачи исследования. Целью работы является разработка алгоритма по определению фактического тормозного коэффициента грузового вагона с учетом особенностей процессов изменения давления в тормозном цилиндре (силы нажатия колодок на колеса) и величины тормозного пути, полученного в процессе ходовых тормозных испытаний методом «бросания».

Основная часть исследования. Фактический тормозной коэффициент, реализованный в процессе ходовых тормозных испытаний вагона, определяется из равенства [16]

$$S_{опыт}(V) = \sum_i \Delta S_i = \sum_i \left(v_{i-1} + \frac{\Delta t \cdot \zeta \cdot (1000 \cdot \delta_d \cdot K_i / K_D \cdot \varphi_{mp} + w_i + w_{ox}(v_i))}{2 \cdot 3600} \right) \cdot \frac{\Delta t}{3,6} \quad (2)$$

где $S_{опыт}(V)$ – полученный (измеренный) тормозной путь одиночного вагона на площадке;

ζ – замедление поезда под действием удельной замедляющей силы;

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

w_i – величина уклона, ‰;

δ_d – действительный коэффициент силы нажатия колодок при номинальном давлении (постоянной силе нажатия колодок на колеса);

φ_{mp} – коэффициент трения накладок;

Δt – временной интервал, с;

$K_i(t_i)$ – сила нажатия колодки (накладки) на колесо (диск), соответствующая времени торможения t_i ;

K_D – сила нажатия колодки (накладки) на колесо (диск) при номинальном (установившемся) давлении в тормозном цилиндре.

Для определения фактического значения тормозного коэффициента используется итерационная формула

$$\delta_{\delta,n} = \frac{S_{\text{опыт}}(V)}{\left(\frac{v_{i-1}}{\delta_{\delta,n-1}} + \frac{\Delta t \cdot \zeta \cdot (1000 \cdot K_i / K_D \cdot \varphi_{mp} + \frac{w_i}{\delta_{\delta,n-1}} + \frac{w_{ox}(v_i)}{\delta_{\delta,n-1}})}{2 \cdot 3600} \right) \cdot \frac{\Delta t}{3,6}} \quad (3)$$

где n – номер итерации;

$\delta_{\delta,n}$ – тормозной коэффициент, соответствующий n -ой итерации.

В качестве начального значения тормозного коэффициента ($\delta_{\delta,0}$) задается величина, полученная расчетным путем либо в процессе стационарных испытаний.

Итерационный процесс прекращается, если разница тормозных путей, полученных при ходовых тормозных испытаний одиночного вагона и при расчете не превышает заданного числа ξ (рекомендуется принимать $\xi \leq 0,5 м$):

$$|S_{\text{опыт}}(V_H) - S_{\text{расч}}(V_H)| \leq \xi. \quad (4)$$

Изменение силы тормозного нажатия колодок на колеса (относительная сила нажатия K_i/K_0) во временной области определяется по индикаторной диаграмме нарастания давления в тормозном цилиндре при торможении.

Алгоритм определения фактического значения тормозного коэффициента представлен на рис. 2 и был реализован с применением программного комплекса «Microsoft Office Excel».

В качестве примера рассматриваются тормозные испытания вагона для перевозки минеральных удобрений с потележечным торможением. По результатам стационарных испытаний было установлено, что действительный тормозной коэффициент при номинальном давлении в тормозных цилиндрах составляет 0,164.

Анализ диаграмм наполнения тормозного цилиндра и силы нажатия тормозных колодок (накладок) свидетельствуют о том, что нарастание силы нажатия при экстренном пневматическом торможении начинается по истечении некоторого времени от момента снижения давления в тормозной магистрали и характеризуется тремя периодами (рис. 3):

- временем начала наполнения тормозного цилиндра сжатым воздухом – t_1 ;

- временем начала нажатия тормозных колодок (накладок) на колесо (диск) – t_2 ;

- временем достижения номинального нажатия колодок (накладок) на колеса (диски) – t_3 .

Ходовые тормозные испытания проводились методом «бросания» на магистральном участке пути ст. Новомосковск – ст. Баловка Приднепровской железной дороги. Запись и обработка результатов производилась с использованием компьютерной программы "DynamicBrake" [9]. Тормозные пути, полученные в процессе исследований, приведены на рис. 4.

По представленному алгоритму (рис. 2) были рассчитаны действительные тормозные коэффициенты для диапазона скоростей 40-120 км/ч.

Расчетные исследования показали, что уже на четвертой итерации достигается заданная точность (рис. 5)

$$|S_{\text{опыт}}(V_H) - S_{\text{расч}}(V_H)| \leq 0,5 .$$

В таблице приведены значения фактического тормозного коэффициента в диапазоне скоростей 40-120 км/ч.

Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении. Разработанный алгоритм позволяет получить уточненную оценку тормозной эффективности опытного грузового вагона. Результаты расчетных исследований могут быть использованы для определения тормозных путей грузового поезда из произвольного количества вагонов как на площадке, так и на уклонах. В результате исследования было установлено, что величина фактического тормозного коэффициента зависит от скорости в начале торможения и имеет тенденцию снижения при ее увеличении.

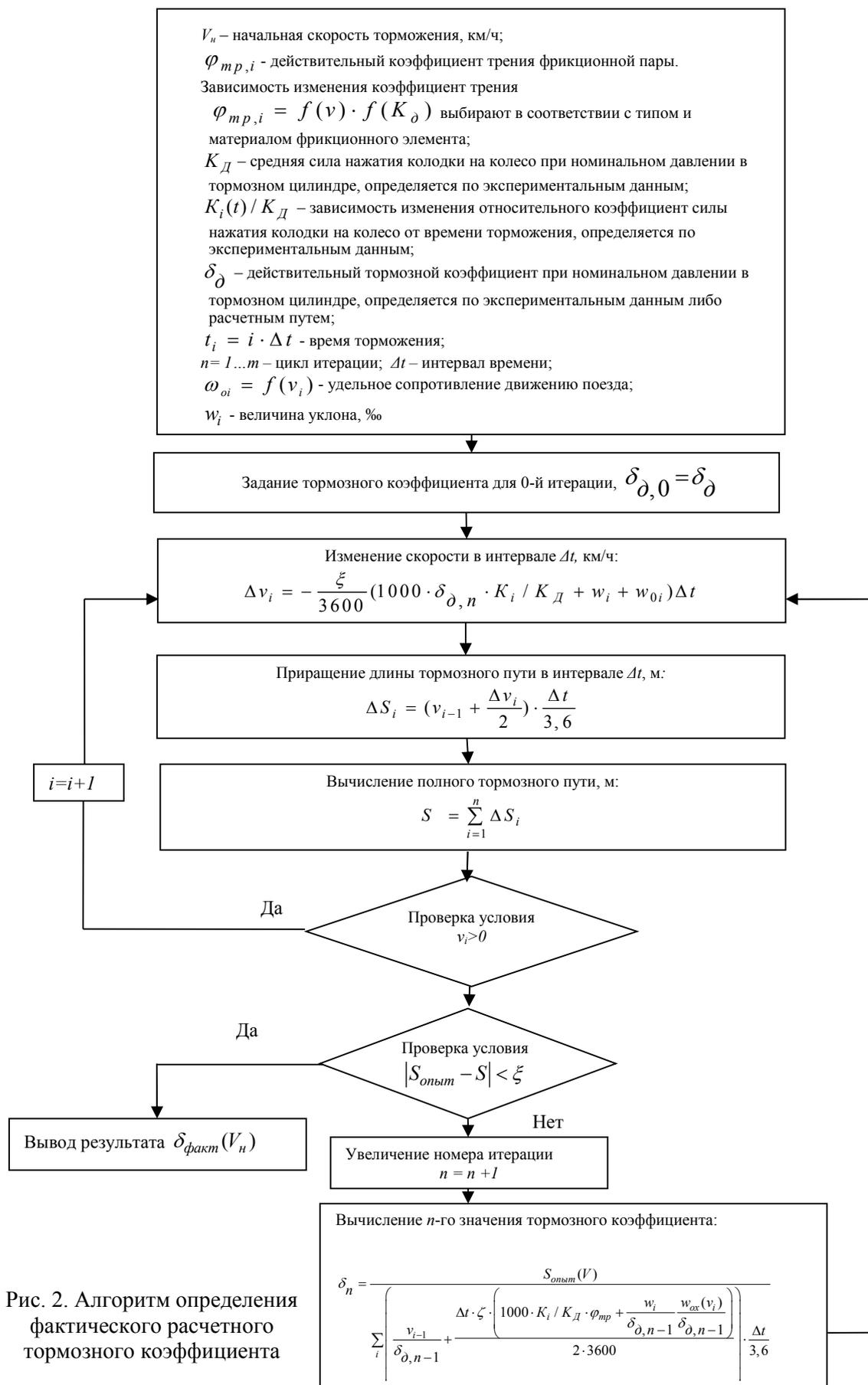


Рис. 2. Алгоритм определения фактического расчетного тормозного коэффициента

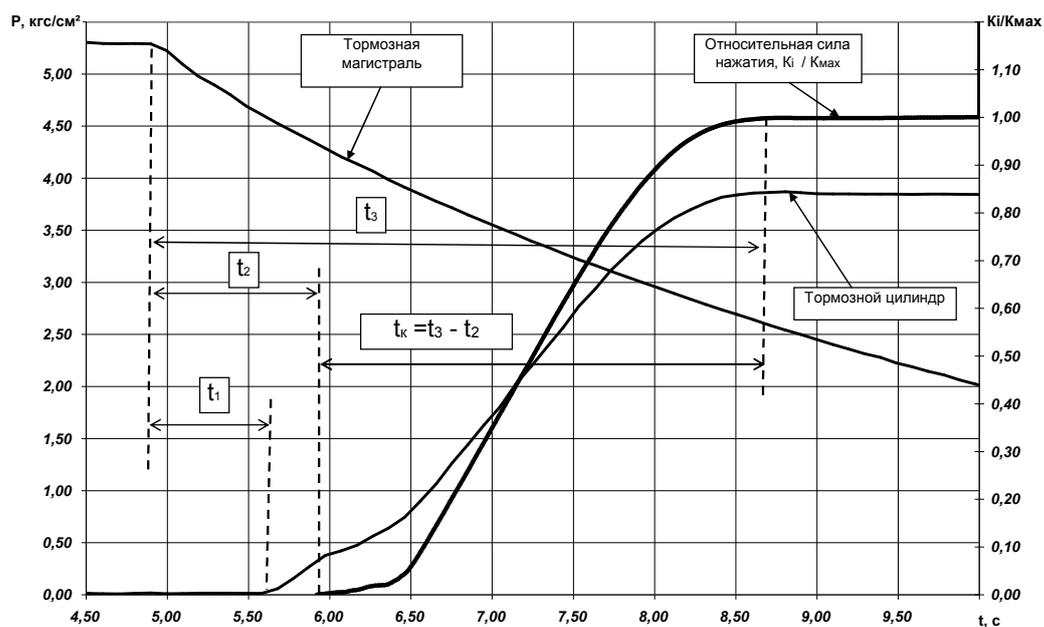


Рис. 3. Диаграммы наполнения тормозного цилиндра и силы нажатия при пневматическом торможении

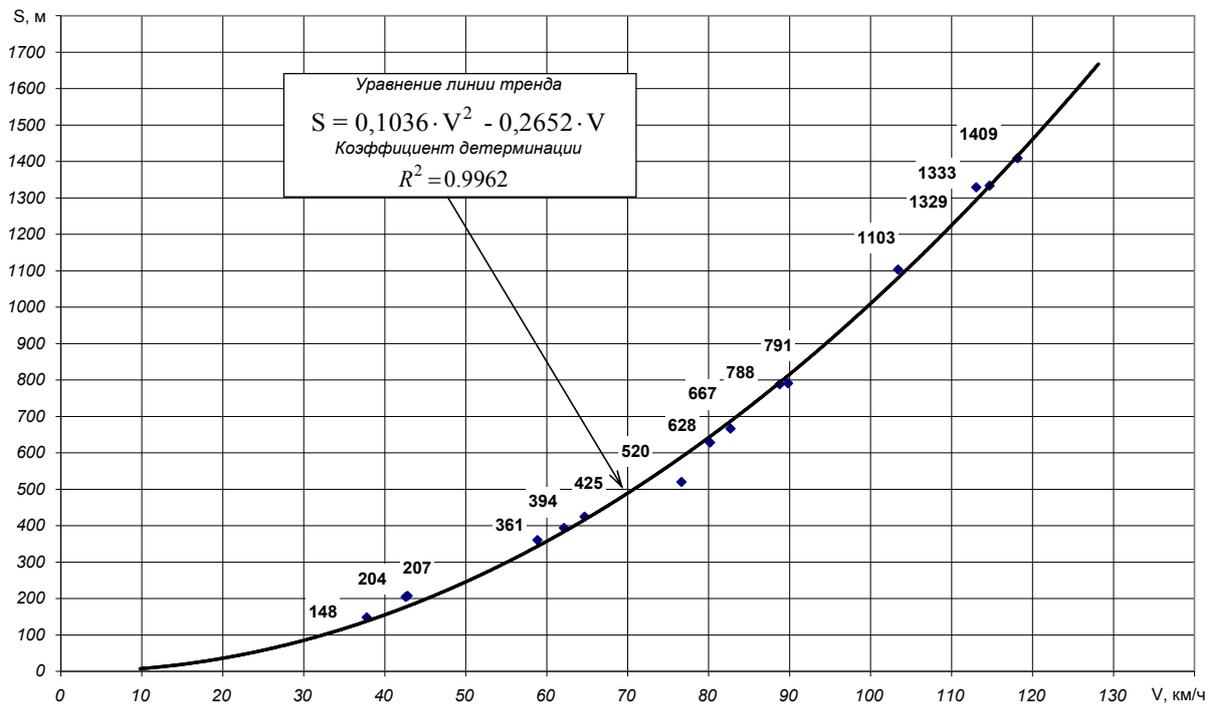


Рис. 4. Тормозные пути одиночного вагона на площадке при экстренном пневматическом торможении

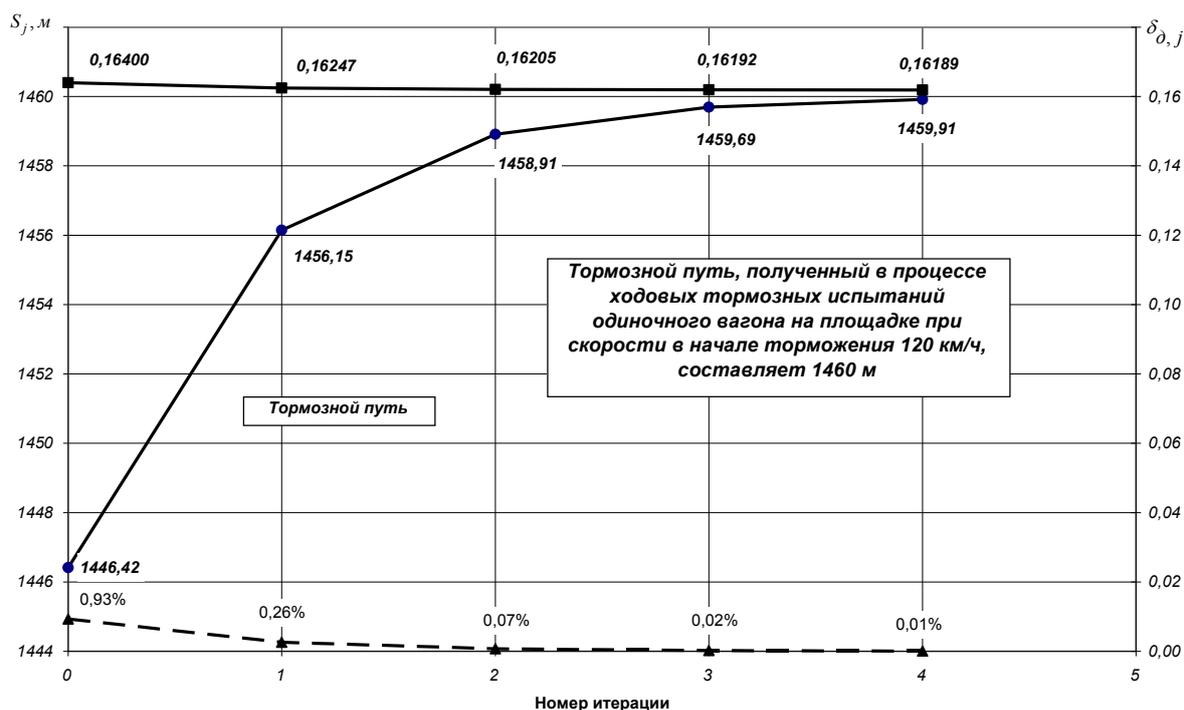


Рис. 5. Ітераційний процес визначення фактичного коефіцієнта гальмування по результатам ходових тормозних випробувань одиночного вагона на площадці при швидкості в початку гальмування 120 км/ч

Таблиця

Результати розрахункових досліджень

Швидкість в початку гальмування	Виміряний тормозний шлях, м	Розрахований тормозний шлях, м	Фактичний тормозний коефіцієнт
40	155,15	155,35	0,1833
50	245,74	245,37	0,1736
60	357,05	357,02	0,1678
70	489,08	489,02	0,1649
80	641,82	641,43	0,1634
90	815,29	815,77	0,1623
100	1009,48	1008,73	0,1621
110	1224,39	1224,59	0,1617
120	1460,02	1459,54	0,1617

Список використаних джерел

1. ЦВ-ЦЛ-0013. Інструкція з ремонту гальмівного обладнання вагонів [Текст]. – К., 2005. – 160 с.
2. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) [Текст]. – М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 260 с.
3. ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015. Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України [Текст]. – К.: Транспорт України, 2002. – 145 с.
4. ЦШ-0001. Інструкція з сигналізації на залізницях України [Текст]. – К., 2008. – 160 с.

5. Водяников, Ю.Я. Методология проведения поездных тормозных испытаний для определения тормозной эффективности единиц подвижного состава [Текст] / Ю.Я. Водяников, В.С. Василенко, Л.С. Ольгард // Вагонный парк. – 2014. – № 02 (83). – С. 9-13.
6. Водяников, Ю.Я. Сравнительный анализ методов определения тормозного пути единиц подвижного состава железных дорог [Текст] / Ю.Я. Водяников, Т.В. Шелейко, С.М. Свистун // Залізничний транспорт України. – 2014. – № 1. – С. 52-58.
7. Водяников, Ю.Я. Расчетно-экспериментальный метод определения характеристик процессов торможения пассажирских и грузовых вагонов [Текст] / Ю.А. Водяников, А.М. Сафронов, С.М. Свистун // Зб. наук. праць Держ. екон.-технол. університету трансп. Сер.: Транспортні системи і технології. – 2013. – Вип. 22. – С. 86-96.
8. Иноземцев, В.Г. Нормы и методы расчета автотормозов [Текст] / В.Г. Иноземцев, П.Т. Гребенюк. – М.: Транспорт, 1971. – 56 с.
9. Василенко, В.С. Программный комплекс для экспериментального исследования тормозных систем единиц подвижного состава железных дорог [Текст] / В.С. Василенко, Ю.Я. Водяников // Рейковий рухомий склад: зб. наук. праць ДП «УкрНДІВ». – Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2013. – Вип. 9. – С. 38-47.
10. Гречко, А.В. Розчіпний пристрій [Текст] / А.В. Гречко, О.С. Ніщенко, Т.В. Шелейко // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – 2013. – Вип. 139. – С. 243-247.
11. Водяников, Ю.Я. Методология пересчета тормозной эффективности одиночного вагона на тормозную эффективность поезда [Текст] / Ю.Я. Водяников, С.М. Свистун, Е.Г. Макеева // Залізничний транспорт України. – 2014. – Вип. 2. – С. 27-37.
12. Водяников, Ю.Я. Особенности процессов торможения грузового вагона с осевой нагрузкой 25 тс/ось [Текст] / Ю.Я. Водяников, С.В. Кукин, А.Е. Нищенко // Вагонный парк. – 2014. – № 01 (82). – С. 13-21.
13. Водяников, Ю.Я. Тормозная эффективность грузового поезда в зависимости от числа осей в составе [Текст] / Ю.Я. Водяников, Т.В. Шелейко, А.Е. Нищенко // Зб. наук. праць Держ. екон.-технол. університету трансп. – К., 2013. – Вип. 23. – С. 60-68.
14. Водяников, Ю.Я. Неопределенность измерения тормозной эффективности грузовых вагонов [Текст] / Ю.Я. Водяников, А.М. Сафронов, К.Л. Жихарцев // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Луганськ, 2013. – Т. 207, № 18. – Ч. 2. – С. 85-89.
15. Водяников, Ю.Я. Влияние времени наполнения тормозного цилиндра сжатым воздухом на тормозную эффективность пассажирского вагона [Текст] / Ю.Я. Водяников, А.М. Сафронов, С.М. Свистун // Залізничний транспорт України. – 2014. – Вип. 5. – С. 3-8.
16. Гребенюк, П.Т. Правила тормозных расчетов [Текст] / П.Т. Гребенюк. – М.: Интекст, 2004. – 114 с.

Рецензент д-р техн. наук, професор І.Е. Мартинов

Сафронов Александр Михайлович, кандидат технічних наук, заступник директора з наукової роботи, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування». Тел.: (05366) 6-03-54. E-mail: ndv6@ukrndiv.com.ua.

Safronov Oleksandr, candidate of technical sciences, deputy director for science, State Enterprise "Ukrainian research van-building institute". Tel.: (05366) 6-03-54. E-mail: ndv6@ukrndiv.com.ua.

Стаття прийнята 16.10.2015 р.