УДК 629.4:592.2

Александр Сафронов, к.т.н.

(директор Государственного предприятия «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения» ГП «УкрНИИВ»).

Юрий Водяников, к. т. н., с. н. с.

(ведущий научный сотрудник лаборатории электротехнических, динамических, теплотехнических и прочностных исследований железнодорожной техники Государственного предприятия «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения» ГП «УкрНИИВ»).

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ТОРМОЗНОЙ СИЛЫ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА С ДИСКОВЫМИ ТОРМОЗАМИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОЕЗДНЫХ ТОРМОЗНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Представлена методика определения фактического значения удельной тормозной силы пассажирского вагона по результатам поездных тормозных испытаний, базирующаяся на решение дифференциального уравнения движения при торможении. Приведены расчетные зависимости определения фактических значений удельных тормозных сил и расчетных тормозных коэффициентов. На примере результатов ходовых тормозных испытаний пассажирского вагона с дисковым тормозом показано, что погрешность определения удельной тормозной силы не превышает 1%.

Ключевые слова: *дисковый тормоз, удельная тормозная сила, тормозной путь, математическое моделирование, тормозные процессы.*

Вступление. Создание высокоскоростного пассажирского движения в одну из основных выдвигает задачи создания высоконадежных и эффективных тормозных систем. Решение указанных задач связано с большими конструкторскими, расчетными и исследовательскими работами, успех которых во многом зависит от выбранных способов расчета, правильности принятых исходных положений и расчетных нормативов, а также методики экспериментальных исследований различных процессов и работоспособности тех или иных элементов нового тормозного оборудования.

Дальнейшее развитие тормозных систем и повышение тормозной эффективности вагонов невозможно без применения новых более углубленных методов экспериментального исследования и анализа процессов торможения.

Кроме того, определение эффективности тормозной системы является одним из основных видов специальных поездных испытаний опытных вагонов.

DOI: 10.32703/2617-9040-2019-33-1-18

Дальнейшее повышение скоростей движения пассажирских поездов при колодочных тормозах ограничено силой сцепления колес с рельсами, а также чрезмерным нагревом поверхности катания колеса при торможении.

В этой связи все большее распространение получают дисковые тормозные системы (рис. 1), которые обеспечивают высокую тормозную эффективность, особенно при скоростях движения более 160 км/ч.

Рис. 1. Дисковый тормоз, установленный на оси колесной пары

Дисковые тормоза имеют существенные преимущества перед колодочными с точки зрения компактности тормозного оборудования и стабильности рабочих характеристик. При дисковом тормозе поверхность катания колес свободна от усиленного нагрева и износа при этом устраняются перегревы колес, ненормальные выработки на поверхности катания и др.

Коэффициент трения между накладкой и диском является постоянной величиной и может изменяться в пределах от 0,3 до 0,4 (рис. 2), не зависит от температуры и скорости, подтверждением этому являются результаты экспериментальных исследований (рис. 3).

Рис. 2. Особенности изменения расчетных коэффициентов трения для колодочных и дисковых тормозов

Рис. 3. Залежність коефіцієнтів трення від швидкості руху, отримані при ходових тормозних випробуваннях

Вместе с тем, отмеченные существенные различия колодных и дисковых тормозов не позволяют применить существующие нормативы к дисковым тормозным системам и требуют пересчета (проецирования) их тормозной эффективности на тормозную эффективность колодного тормоза.

Анализ последних исследований и постановка проблемы. В статье [1,12] показано основное отличие в определении характеристик тормозной системы пассажирских вагонов с дисковыми и колодными тормозами. Предлагается анализ тормозной эффективности пассажирских вагонов с дисковыми тормозами производить по удельной тормозной силе. Приведены номограммы для определения тормозных путей пассажирского поезда в зависимости от величины удельной тормозной силы.

В статье [2, 14] указывается на необходимость оценки тормозной эффективности дисковых тормозов с учетом фактических значений коэффициентов трения.

Алгоритм по выбору основных характеристик тормозной системы пассажирского вагона с дисковым тормозом приведен в работе [3, 13].

Результаты испытаний дисковой тормозной системы пассажирского вагона изложены в [4, 15], они состояли из стационарных и поездных тормозных испытаний. Основные характеристики определялись с помощью индикаторных диаграмм изменения давления в тормозных приборах при торможении. Приведены коэффициенты тормозного нажатия в пересчете на чугунные колодки в диапазоне скоростей (40-160) км/ч, а также номограммы тормозных путей в зависимости от действительного коэффициента тормозного нажатия. Представлен характер изменения действительного коэффициента трения фрикционной пары накладки-диск. В статье [5, 14] Предложена методика определения фактического коэффициента трения накладок по результатам поездных тормозных испытаний. На конкретных примерах показано, что для анализа эффективности дискового тормоза по результатам тормозных испытаний необходимо учитывать фрикционные свойства накладки. Расчетно-экспериментальный метод определения характеристик тормозных систем

пассажирских и грузовых вагонов с использованием математической модели предложен в работе [6]. Расчетные исследования позволяют провести анализ свойств тормозной системы во временной области. Апробация метода на примере пассажирского вагона с дисковым тормозом показала хорошее совпадение с результатами экспериментальных исследований и может быть использована для оценки характеристик тормозных процессов вагонов во временной области.

В статье [7, 15] описана методология исследования тормозных систем единиц подвижного состава при проведении поездных тормозных испытаний. Представлен программный комплекс, позволяющий исследовать различные по своей физической природе характеристики процессов торможения в едином режиме времени.

Цель и задачи исследования. Важнейшей оценочной характеристикой тормозной эффективности вагона является расчетный тормозной коэффициент колодочного тормоза или удельная тормозная сила дискового, поэтому одной из основных задач ходовых тормозных испытаний пассажирских вагонов является определение таких значений указанных характеристик, которые соответствуют измеренным значениям тормозных путей при заданных скоростях движения в начале торможения. Для колодочных тормозов расчетные тормозные коэффициенты определяются по таблицам или номограммам [8, 9]. Для дискового тормоза требуется разработка специальной методики оценивания тормозной эффективности (удельной тормозной силы) по результатам ходовых тормозных испытаний.

Материалы и методы исследования. Удельная тормозная сила и тормозной путь находятся в обратно пропорциональной зависимости - чем больше удельная тормозная сила, тем меньше тормозной путь. В этой связи, зависимость между ними может быть описана математическим выражением, отображающей степенную зависимость:

$$b_{факт} = c(V_0) \cdot S_{эксн}(V_0)^{d(V_0)}, \quad (1)$$

где коэффициенты уравнения (1) для скорости V_0 определяются по формулам [10]:

$$c(V_0) = \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^m \ln(b_i) \cdot \sum_{i=1}^n (\ln(S_i(V_0, b_i)))^2 - \sum_{i=1}^n \ln(b_j) \cdot \ln(S_i(V_0, b_i)) \cdot \sum_{i=1}^n \ln S_i(V_0, b_i)}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\ln(S_i(V_0, b_i)))^2 - \sum_{i=1}^n (\ln(S_i(V_0, b_i)))^2} \right) \quad (2)$$

$$d(V_0) = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \ln(b_i) \cdot \ln(S_i(V_0, b_i)) - \sum_{i=1}^m \ln(b_i) \cdot \sum_{i=1}^n \ln(S_i(V_0, b_i))}{n \cdot \sum_{i=1}^n (\ln(S_i(V_0, b_i)))^2 - \sum_{i=1}^n (\ln(S_i(V_0, b_i)))^2}, \quad (3)$$

где V_0 – скорость в начале торможения в диапазоне изменения от минимального до максимального значений с шагом ΔV ;

b_i – удельная тормозная сила в диапазоне изменения значений от минимальной до максимальной величин с шагом Δb ;

$S_i(V_0, b_i)$ – тормозной путь пассажирского вагона при заданных значениях V_0 и b_i .

Блок-схема вычислений фактических значений удельных тормозных сил (расчетных тормозных коэффициентов) представлена на рис. 4.

Рис.4. Блок схема определения фактического значения удельной тормозной силы

Массивы значений параметров, входящих в формулы (2 и 3), определяются методом решения дифференциального уравнения по прикладной программе для ЭВМ, в качестве математической модели используется дифференциальное уравнение [6]:

$$\frac{d^2 S}{dt^2} = -\zeta \cdot \{1000 \cdot b_T \cdot \beta(b_i / b_T, t) + w_{ox}(v)\}, \quad (4)$$

где ζ – замедление поезда при действии удельной замедляющей силы, $\zeta = 120$ км/ч² ([11];

b_T – удельная тормозная сила при максимальном давлении в тормозном цилиндре;

$\beta(b_i / b_T, t)$ – функция, отображающая процесс изменения удельной тормозной силы в зависимости от наполнения цилиндра сжатым воздухом при торможении;

w_{ox} – основное удельное сопротивление движению поезда, определяется по формуле [11]:

$$w_{ox} = 0,7 + \frac{8 + 0,18 \cdot V(t) + 0,003 \cdot V^2}{q_0}, \quad (5)$$

где q_0 – осевая нагрузка, тс/ось;

$V(t)$ – текущая скорость движения вагона при торможении, км/ч.

Для иллюстрации изложенной методики на рис. 5 приведены результаты измерений тормозных путей пассажирского вагона с дисковым тормозом, а в таблице 1 – массив тормозных путей для расчета коэффициентов уравнения (1) по формулам (2-3) в заданных диапазонах изменения удельных тормозных сил и скоростей движения в начале торможения (рис. 6).

Рис. 5. Результаты измерений тормозного пути пассажирского вагона с дисковым тормозом

Таблиця 1. Массив значений тормозных путей пассажирского вагона с дисковым тормозом, полученных в результате решения дифференциального уравнения

V, км/ч	Ряд задаваемых значений удельных тормозных сил											
	0,065	0,070	0,075	0,080	0,085	0,090	0,095	0,100	0,105	0,110	0,115	0,120
	Массив значений тормозных путей, м											
40	132,8	125,8	119,8	114,4	109,7	105,5	101,7	98,2	95,1	92,3	89,7	87,3
50	197,0	186,2	176,7	168,4	161,1	154,5	148,7	143,4	138,6	134,2	130,1	126,5
60	273,2	257,7	244,2	232,3	221,8	212,5	204,1	196,5	189,6	183,3	177,6	172,3
70	361,4	340,4	322,1	306,0	291,8	279,1	267,8	257,5	248,2	239,7	231,9	224,8
80	461,2	434,0	410,3	389,4	370,9	354,5	339,7	326,3	314,2	303,2	293,1	283,8
90	572,6	538,4	508,6	482,3	459,1	438,3	419,7	402,9	387,7	373,8	361,1	349,4
100	695,4	653,4	616,8	584,6	556,1	530,7	507,8	487,2	468,5	451,4	435,8	421,4
110	829,2	778,8	734,9	696,2	661,9	631,3	603,8	579,0	556,5	535,9	517,1	499,8
120	974,0	914,5	862,5	816,9	776,3	740,1	707,6	678,3	651,6	627,3	605,0	584,6
130	1129,4	1060,1	999,7	946,4	899,2	857,0	819,1	784,9	753,8	725,4	699,4	675,5
140	1295,2	1215,6	1146,0	1084,8	1030,4	981,8	938,2	898,7	862,8	830,1	800,2	772,6
150	1471,2	1380,6	1301,5	1231,7	1169,8	1114,4	1064,6	1019,6	978,7	941,4	907,2	875,8
160	1657,1	1555,0	1465,7	1387,0	1317,1	1254,6	1198,4	1147,5	1101,3	1059,1	1020,5	984,9
170	1852,5	1738,4	1638,6	1550,5	1472,3	1402,3	1339,3	1282,3	1230,5	1183,2	1139,8	1099,9

Рис.6. Номограммы тормозных путей пассажирского вагона в диапазонах изменения удельных тормозных сил и скоростей движения

В таблице 2 приведены коэффициенты уравнения (1), а также удельные тормозные силы. Погрешность определения удельных тормозных сил не превышает 0,5 % (табл. 3).

Таблица 2. Результаты расчета фактических значений удельных тормозных сил

V, км/ч	Фактические значения тормозного пути (м), полученные в результате испытаний	Коэффициенты уравнения $b_{факт} = c(V_0) \cdot S_{эксп}(V_0)^{d(V_0)}$		Значение удельной тормозной силы
		$c(V_0)$	$d(V_0)$	
1	2	3	4	5
40	106	95,56463	-1,49215	0,0903
50	158	111,4496	-1,40995	0,0887
60	219	128,6335	-1,3533	0,0875
70	290	147,5358	-1,31233	0,0865
80	371	168,3192	-1,2816	0,0857
90	462	191,2984	-1,25807	0,0849
100	563	216,8634	-1,2399	0,0843
110	674	244,9187	-1,22552	0,0836
120	795	275,5394	-1,21397	0,0831
130	925	309,2048	-1,20478	0,0825
140	1066	346,8093	-1,19777	0,0820
150	1216	387,0686	-1,19189	0,0814
160	1377	431,7901	-1,1875	0,0809

Таблица 3. Тормозные пути вагона

V, км/ч	Фактические значения тормозного пути (м), полученные в результате испытаний	Значения тормозного пути (м), полученные методом математического моделирования	Погрешность
1	2	3	4
40	106,38	106,02	0,340%
50	157,75	157,17	0,366%
60	219,02	218,22	0,366%

Конец таблицы 3

1	2	3	4
70	290,21	289,18	0,353%
80	371,30	370,07	0,333%
90	462,30	460,89	0,306%
100	563,22	561,63	0,281%
110	674,04	672,33	0,253%
120	794,77	792,97	0,225%
130	925,40	923,58	0,197%
140	1065,95	1064,15	0,169%
150	1216,41	1214,71	0,139%
160	1376,77	1375,26	0,110%

В табл. 4 показана динамика изменения основных параметров тормозного процесса за время торможения, а на рис. 7 – удельные тормозные силы и эквивалентные им значения расчетных тормозных коэффициентов композиционных и чугунных колодок.

Таблица 4. Динамика изменения параметров тормозного процесса от времени торможения

Конец таблицы 3

Рис.7. Удельная тормозная сила и эквивалентные расчетные тормозные коэффициенты композиционных и чугунных колодок

Выводы. Предложен алгоритм определения фактических значений удельных тормозных сил (тормозной эффективности) пассажирского вагона по результатам ходовых тормозных испытаний. Изложенная методика базируется на математических формулах, коэффициенты которых определяются в результате решения дифференциального уравнения движения вагона. Методика позволяет получить дополнительные характеристики тормозных процессов и, следовательно, выполнять более глубокий анализ тормозных систем пассажирских вагонов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Водяников Ю. Я., Гречко А. В., Кукин С. В., Нищенко А. Е. Уточненный анализ результатов поездных тормозных испытаний пассажирских вагонов с дисковыми тормозами // Збірник наукових праць державного економіко-технологічного університету транспорту, серія „Транспортні системи і технології”, Київ ДЕТУТ, 2010. Вип. 16. С. 13-19.
- 2 Водяников Ю. Я., Сафронов А. М., Шелейко Т.В., Свистун С.М.. Анализ тормозных испытаний электропоезда с применением математических моделей // "Залізничний транспорт".2013. № 5/6.С. 29-39.
- 3 Водяников Ю. Я., Яланский М. И., Киницкая А. П., Шелейко Т.В. Использование номограмм для определения характеристик тормозной системы пассажирских вагонов с дисковым тормозом // Збірник наукових праць державного економіко-технологічного університету транспорту, серія „Транспортні системи і технології”, Київ ДЕТУТ, 2009. Вип. 15. С. 41-51.
- 4 Водяников Ю. Я., Кукин С.В., Гречко А.В., Нищенко А. Е. Исследования дисковой тормозной системы пассажирского вагона // Сборник научных статей «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты». издат. Петербургский государственный университет путей сообщения. Санкт-Петербург, 2007. Вип.4. С. 113-120.
- 5 Водяников Ю. Я., Гречко А. В., Сафронов А. М. Оценка фрикционных свойств накладок дискового тормоза пассажирского вагона по результатам поездных тормозных испытаний // Вагонный парк. 2010. № 5. С. 12-13.
- 6 Водяников Ю. Я., Сафронов А.М., Свистун С.М. Расчетно-экспериментальный метод определения характеристик процессов торможения пассажирских и грузовых вагонов // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту (ДЕТУТ), серія «Транспортні системи і технології», Київ, 2013. Вип. 22. С. 85-96.
- 7 Водяников Ю. Я., Василенко В.С., Ольгард Л.С. Методология проведения поездных тормозных испытаний для определения тормозной эффективности единиц подвижного состава // Вагонный парк. 2014. № 02 (83). С. 9-13.
- 8 Сафронов А.М. Методология расчетных исследований тормозной эффективности пассажирских вагонов с колодочным тормозом, базирующаяся на решении дифференциального уравнения движения при торможении во временной области // Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Транспортні системи і технології», 2016. Вип. 29. С. 13-27.
- 9 Гребенюк П.Т. Правила тормозных расчетов. Москва: Интекст, 2004.- 114 с.
- 10 Шашков В. Б. Обработка экспериментальных данных и построение эмпирических формул. Курс лекций: учебное пособие.- Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005.- 150 с.
- 11 Осипов С.И., Осипов С.С. Основы тяги поездов: учебник для студентов техникумов и колледжей ж/д тр-та, М.: УМК МПС , 2000. 592 с.
- 12 Водяников Ю. Я., Кукин С.В., Нищенко А.Е., Павлов С.А. Дисковые тормозные системы пассажирских вагонов и их особенности // Вагонный парк. 2013. № 9(78). С. 27-29.
- 13 Водяников Ю.Я., Свистун С.М., Макеева Е.Г. Методология пересчета тормозной эффективности одиночного вагона на тормозную эффективность поезда // Залізничний транспорт України. 2014. Вип. 2. С. 27-37.
- 14 Водяников Ю. Я., Гречко А. В., Сафронов А. М. Оценка фрикционных свойств накладок дискового тормоза пассажирского вагона по результатам поездных тормозных испытаний // Вагонный парк. 2010. № 5. С. 12-13.
- 15 Водяников Ю. Я., Сафронов А. М., Жихарцев К. Л. Методика экспериментального исследования тормозной эффективности и тормозных характеристик единиц подвижного // Вагонный парк. 2008. № 3. С. 14-17.

REFERENCES

- 1 Vodyannikov Yu. Ya., A. V. Grechko, &S. V. Kukin, A. E. Nishhenko (2010) Utochnenny`j analiz rezul'tatov poezdny`x tormozny`x ispy`tanij passa-zhirskix vagonov s diskovy`mi tormozami [Refined analysis of the results of train brake testing of passenger cars with disc brakes]. Zbirnik naukovix prac` derzhavnogo ekonomiko-technologichnogo universitetu transportu, seriya „Transportni sistemi i tehnologii”[Collection of scientific works "Railboundrollingstock], Kiïv - DETUT,16, 13-19. [in Russian].

- 2 Vodyannikov Yu. Ya., Safronov A.M., Shelejko T.V., & Svistun S.M. (2013). Analiz tormoznykh ispytaniy elektropoyezda s primeneniye matematicheskikh modeley [Analysis of brake tests of electric trains using mathematical models]. "Zalozhnyy transport", 5/6, 23-39. [in Russian].
- 3 Vodyannikov Yu. Ya., Yalanskij M. I., Kiniczkaya A. P., Shelejko T.V. (2009). Ispol'zovaniye nomogramm dlya opredeleniya kharakteristik tormoznoy sistemy passazhirskikh vagonov s diskovym tormozom [Using nomograms to characterize the braking system of passenger cars with disc brakes] Zbirnik naukovix prac' derzhavnogo ekonomiko-tekhnologichnogo universitetu transportu, seriya „Transportni sistemi i tekhnologii” [Collection of scientific works "Railboundrollingstock", Kiiv - DETUT,(15), 41-51. [in Russian].
- 4 Vodyannikov Yu. Ya., Kukin S.V., & Grechko A.V. Nishhenk A. E. (2007). Issledovaniya diskovoy tormoznoy sistemy passazhirskogo vagona [Studies of the disk brake system of passenger cars] Sbornik nauchnykh statey «Podvizhnoy sostav XXI veka: idei, trebovaniya, proyekty-Collection of scientific articles "Rolling stock of the XXI century: ideas, requirements, projects,113-120. [in Russian].
- 5 Vodyannikov Yu. Ya., Grechko A.V., & Safronov A. M. (2010). Otsenka friktsionnykh svoystv nakladok diskovogo tormoza passazhirskogo vagona po rezul'tatam poyezdnykh tormoznykh ispytaniy [Evaluation of the friction properties of disc brakes of a passenger car based on the results of train brake tests] Vagonnyy park, 5,12-13. [in Russian].
- 6 Vodyannikov Yu. Ya. Safronov A.M., & Svistun S.M. (2013). Raschetno-eksperimental'nyy metod opredeleniya kharakteristik protsessov tormozheniya passazhirskikh i gruzovykh vagonov [Calculated-experimental method for determining the characteristics of the braking processes of passenger and freight cars] Zbirnik naukovix prac' derzhavnogo ekonomiko-tekhnologichnogo universitetu transportu, seriya „Transportni sistemi i tekhnologii” [Collection of scientific works "Railboundrollingstock", Kiiv - DETUT,(22), 85-96. [in Russian].
- 7 Vodyannikov Yu. Ya., Vasilenko V.S., & Ol'gard L.S. (2014). Metodologiya provedeniya poezdny'x tormozny'x ispytaniy dlya opredeleniya tormoznoy e'fektivnosti edinic podvizhnogo sostava [Methodology for conducting train brake tests to determine the stopping power of rolling stock units] Vagonnyy park, 02(83), 9-13. [in Russian].
- 8 Safronov A.M. (2016). Metodologiya raschetnykh issledovaniy tormoznoy effektivnosti passazhirskikh vagonov s kolodochnyim tormozom, baziruyuschayasya na reshenii differentsialnogo uravneniya dvizheniya pri tormozhenii vovremennoy oblasti [Methodology of computational studies of the braking efficiency of passenger cars with shoe brakes, based on solving the differential equation of motion when braking in the time domain]. Zbirnik naukovix prac' derzhavnogo ekonomiko-tekhnologichnogo universitetu transportu, seriya „Transportni sistemi i tekhnologii” [Collection of scientific works "Railboundrollingstock", Kiiv - DETUT,(29), 13-27. [in Russian].
- 9 Grebenyuk P. (2004). Pravilatormoznyhraschetov [RulesofBrakeCalculation]. Moscow: Intekst, p.112. [in Russian].
- 10 Shashkov, V.B. (2005) Kurslektiy [Lecture course]. Obrabotka eksperimentalnykh dannykh i postroyeniye empiricheskikh formul. [Processing of experimental data and the construction of empirical formulas] (p. 150).Orenburg: GOU OGU [in Russian].
- 11 Osipov, S.I., & Osipov, S.S. (2000) Osnovy tyagi poyezdov. Uchebnik dlya studentov tekhnikumov i kolledzhey zh/d transporta [A textbook for students of colleges and colleges of railway transport].Osnovy tyagi poezdov. [Fundamentals of train](p. 592).Moscow: UMK Ministry of Railways of Russia[in Russian].
- 12 Vodyannikov Yu. Ya., Kukin S.V., Nischenko A.E., & Pavlov S.A. (2013). Diskovyye tormoznyye sistemy passazhirskikh vagonov i ikh osobennosti [Disk braking systems of passenger cars and their distinctive features]. Kharkov:Vagonnyypark - Rolling stock , 9 (78), 27-29. [in Russian].
- 13 Vodyannikov Yu. Ya., Svistun S. M., & Makeeva E.G. (2014). Metodologiya perescheta tormoznoy effektivnosti odinochnogo vagona na tormoznuyu effektivnost poezda. [Methodology of recalculation of the brake efficiency of a single car on the brake efficiency of a train]. Zalozhnyy transport. Ukrainy – Railwaytransport of Ukraine, 2, 27-37. [in Russian].
- 14 Vodyannikov Yu. Ya., Grechko A. V., & Safronov A. M. (2010). Otsenka friktsionnykh svoystv nakladok diskovogo tormoza passazhirskogo vagona po rezul'tatam poyezdnykh tormoznykh ispytaniy [Estimation of the frictional properties of the disk brake pads of the passenger car by the results of the train braking tests]. Vagonnyypark – Rolling stock, 5, 12-13. [in Russian].
- 15 Vodyannikov Yu. Ya., & Safronov A. M., Zhikhartsev K. L.(2008). Metodika eksperimental'nogo issledovaniya tormoznoy effektivnosti i tormoznykh kharakteristik yedynits podvizhnogo [Methods of experimental study of the braking efficiency and braking characteristics of units rolling] Vagonnyypark - Rolling stock , 3, 14-17. [in Russian].

Олександр Сафонов, к.т.н.

(директор Державного підприємства «Український науково-дослідний інститут вагонобудування» ДП «УкрНДІВ»).

Юрій Водяников, к. т. н., с. н. с.

(провідний науковий співробітник лабораторії електротехнічних, динамічних, теплотехнічних і міцностних досліджень залізничної техніки Державного підприємства «Український науково-дослідний інститут вагонобудування» ДП «УкрНДІВ»).

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНОГО ЗНАЧЕННЯ ПИТОМОЇ ГАЛЬМІВНОЇ СИЛИ ПАСАЖИРСЬКОГО ВАГОНА З ДИСКОВИМИ ГАЛЬМАМИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ПОЇЗНИХ ГАЛЬМІВНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Представлена методика визначення фактичного значення питомої гальмівної сили пасажирського вагона за результатами поїзних гальмівних випробувань, що базується на рішеннях диференційного рівняння руху при гальмуванні. Наведено розрахункові залежності визначення фактичних значень питомих гальмівних сил і розрахункових гальмівних коефіцієнтів. На прикладі результатів ходових гальмівних випробувань пасажирського вагона з дисковим гальмом показано, що похибка визначення питомої гальмівної сили не перевищує 1%.

Запропонований алгоритм визначення фактичних значень питомих гальмівних сил (гальмівної ефективності) пасажирського вагона за результатами ходових гальмівних випробувань. Викладена методика базується на математичних формулах, коефіцієнти яких визначаються в результаті рішення диференціального рівняння руху вагона. Методика дозволяє отримати додаткові характеристики гальмівних процесів і, отже, виконувати більш глибокий аналіз гальмівних систем пасажирських вагонів.

Ключові слова: *дискове гальмо, питома гальмівна сила, гальмівний шлях, математичне моделювання, гальмівні процеси.*

Oleksandr Safronov, Ph.D in Engineering

(Director of the State Enterprise "Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute DP "UkrNDIV").

Yurii Vodiannykov, Ph.D in Engineering

(leading researcher of the research Laboratory for electrical, dynamic, heat engineering and strength studies of railway equipment of the State Enterprise "Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute " DP "UkrNDIV").

PROCEDURE FOR DETERMINATION OF THE ACTUAL VALUE OF THE SPECIFIC BRAKE FORCE OF THE PASSENGER CAR WITH DISK BRAKES BASED ON THE RESULTS OF TRAIN BRAKE TESTS

This paper presents the procedure on determination of the actual value of the specific braking force of a passenger car based on the results of train brake tests and solution of the differential motion equation when braking. The design dependences of the determination of the actual values of specific braking forces and calculated braking

coefficients have been given. The results of running brake tests of a passenger car with disc brake show that the error in determination of the specific brake force does not exceed 1%. The example of the results of running brake tests of a passenger car with disc brake shows that the error in determining the specific braking force does not exceed 1%.

An algorithm for determining the actual values of specific braking forces (braking efficiency) of a passenger car based on the results of running brake tests has been proposed. The described methodology is based on mathematical formulas, the coefficients of which are determined as a result of solving the differential equation of motion of the car. The technique allows to obtain additional characteristics of the braking processes and, therefore, to perform a more in-depth analysis of the braking systems of passenger cars.

Keywords: *Disc brake, specific brake force, braking distance, mathematical modeling, braking processes.*