УДК 629.-592.:620.178.4

А. М. Сафронов, к.т.н.
(заместитель директора по научной работе ГП «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения» (ГП «УкрНИИВ»)

МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТОРМОЗНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ С КОЛОДОЧНЫМ ТОРМОЗОМ, БАЗИРУЮЩАЯСЯ НА РЕШЕНИИ ДИФФЕРЕНЦАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

Приведена методика расчета тормозной эффективности пассажирского вагона с колодочными тормозами, базирующаяся на решение дифференциального уравнения движения при торможении во временной области. Представлены расчетные зависимости для определения действительных тормозных путей пассажирского поезда, а также для пересчета тормозных коэффициентов композиционных колодок на чугунные и наоборот. Методика позволяет осуществлять расчеты тормозной эффективности со смешанным типом тормозных колодок. Приведен пример расчета тормозной эффективности пассажирского вагона со смешанным типом тормозных колодок и сравнительный анализ его эффективности при однотипных колодках.

Ключевые слова: *пассажирский вагон, тормозная эффективность, расчетный тормозной коэффициент, тормозной путь.*

Наведена методика розрахунку гальмівної ефективності пасажирського вагона з колодковим гальмом, що базується на рішення диференційного рівняння руху при гальмуванні в часовій області. Представлені розрахункові залежності для визначення дійсних гальмівних шляхів пасажирського поїзда, а також для перерахунку гальмівних коефіцієнтів композиційних колодок на чавунні і навпаки. Методика дозволяє здійснювати розрахунки гальмівної ефективності зі змішаним типом гальмівних колодок. Наведено приклад розрахунку гальмівної ефективності пасажирського вагона зі змішаним типом гальмівних колодок і порівняльний аналіз його ефективності при однотипних колодках.

Ключові слова: *пасажирський вагон, гальмівна ефективність, розрахунковий гальмівний коефіцієнт, гальмівний шлях.*

Постановка проблемы. В условиях дальнейшего развития и совершенствования транспортной системы железнодорожного транспорта, создания конкурентоспособной продукции, важное значение приобретают вопросы анализа конструктивного исполнения и контроля фактических параметров единиц подвижного состава, в частности вагонов [1–3]. При этом особую актуальность приобретают задачи
оценки соответствия достигнутого уровня конструкции вагона и его составляющих элементов современному уровню развития отрасли вагоностроения, а также нормативно-техническим требованиям на стадии проектирования.

© Сафронов А. М., 2016

Такие задачи, в частности для тормозных систем, невозможно решить без совершенствования теоретических методов, базирующихся на применении основных положений математической статистики и компьютерного моделирования.

Анализ последних исследований и публикаций. В предыдущих исследованиях [4–7] расчетно-экспериментальным путем были получены отдельные уточненные характеристики процессов, которые возникают при торможении подвижного состава. Так в роботе [4] была предложена методология пересчета тормозной эффективности вагона на тормозную эффективность поезда, базирующаяся на результатах ходовых тормозных испытаний одиночного вагона. При пересчете использовались фактические характеристики тормозной системы: время наполнения тормозного цилиндра, измеренные значения тормозных путей в диапазоне скоростей 40 − 120 км/ч и соответствующие им тормозные коэффициенты, скорость распространения тормозной волны. В роботе [5] представлены результаты исследования влияния времени неустановившегося торможения на тормозную эффективность пассажирского вагона с колодочными тормозами при экстренном пневматическом торможении. Показано, что наибольшая тормозная эффективность при уменьшении времени переходного периода достигается для скоростей в начале торможения до 80 км/ч. Представлены графики и диаграммы процессов торможения пассажирских вагонов для двух вариантов: при стандартной диаграмме наполнения тормозного цилиндра сжатым воздухом и ускоренной. Методология исследования тормозных процессов вагонов, базируется на совместном использовании математических моделей и результатов ходовых тормозных испытаний. Также исследовались тормозные процессы пассажирского вагона с колодочным тормозом при экстренном пневматическом торможении. На основании расчетно-экспериментальных исследований получены основные особенности и отличия кинематических параметров при торможении вагона на чугунных и композиционных колодках и определена формула для определения тормозного коэффициента с учетом наполнения тормозного цилиндра сжатым воздухом. Показано, что на характер распределения замедления оказывает влияние переходной режим торможения, что максимальные силы инерции при торможении реализуются в момент остановки вагона [6]. В роботе [7] были проведены экспериментальные исследования тормозной эффективности подвижного состава при использовании смешанных тормозных колодок. При этом результаты расчетов тормозной эффективности пассажирского вагона со смешанными тормозными колодками приведенные в настоящей статье имеют хорошее совпадение с результатами ранее проведенных исследований [7].

Цель статьи – проведение расчетных исследований для выбора рационального алгоритма и методики расчета тормозной эффективности пассажирского вагона с применением универсальных математических зависимостей, которые позволят еще на стадии проектирования производить многовариантные расчеты при выборе характеристик тормозной системы, удовлетворяющих нормативным требованиям к тормозной эффективности подвижного состава.

Основной материал исследований. Типовая методика расчета тормозной эффективности пассажирских вагонов [8-10] имеет ряд существенных недостатков, к основным из которых следует отнести невозможность:

– определения расчетных тормозных коэффициентов при смешанных типах тормозных колодок, установленных на вагоне;

– пересчета расчетных тормозных коэффициентов композиционных колодок на чугунные и наоборот;

– осуществлять многовариантные расчеты для выбора рациональных параметров тормозной системы.

Указанные недостатки обусловлены тем, что интегрирование дифференциального уравнение движения поезда (1) [10] осуществляется по интервалам скорости, а действительный тормозной путь поезда определяется по формуле (2) [9].

$$\frac{dv}{dt} = -\zeta \cdot \ 1000 \cdot \phi_{кр} \cdot \delta_p + w_{ox}(v) + i_c \tag{1}$$

где ζ − замедление поезда при действии удельной замедляющей силы, значение ζ для грузовых и пассажирских поездов принимается равным 120 км/ч^2 [5, 6, 7];

$\varphi_{кр}$ − расчетный коэффициент трения колодок при скорости движения;

w_{ox} − основное удельное сопротивление движению поезда;

δ_p − расчетный тормозной коэффициент.

$$S_д = \sum_n \frac{4.17 \cdot (v_n^2 - v_{n+1}^2)}{1000 \cdot \delta_p \cdot \varphi_{кр} + w_{ox} + i_c} \tag{2}$$

где v_{n+1} и v_n − конечная и начальная скорость поезда в принятом расчетном интервале скоростей, км/ч;

i_c − уклон, ‰, для площадки $i_c = 0$.

Указанных недостатков можно избежать, если решение дифференциального уравнения осуществить одним из приближенных методов решения дифференциальных уравнений во временной области. Так как дифференциальное уравнение движения (1) представляет обыкновенное дифференциальное уравнение и относится к классу задач Коши, то из всего многообразия численного решения задачи Коши наиболее распространенным является метод Рунге-Кутты [11]. Анализ изменения тормозного пути вагона от величины расчетного тормозного коэффициента для скорости в начале торможения V_0 свидетельствует об их степенной функциональной зависимости:

$$S_д(V_0) = c(V_0) \cdot \delta_p^{\,d(V_0)} \tag{3}$$

где коэффициенты $c(V_0)$ и $d(V_0)$ уравнения, зависящие от скорости в начале торможения.

Коэффициенты уравнения (3) определяют методом максимального правдоподобия (методом наименьших квадратов) [11]. Для этого формула (3) путем логарифмирования правой и левой частей приводится к виду:

$$\ln(S_д(V_0)) - \ln(c) - d(V_0) \cdot \ln(\delta_p) = 0 \tag{4}$$

После ввода обозначений $y = \ln(S(V_0))$; $A = \ln(c)$; $B = d(V_0)$; z= $\ln(\delta_p)$, формула (4) преобразовывается к линейному уравнению $y = A + B \cdot z$. С учетом указанных преобразований, разрешающее уравнение метода наименьших квадратов примет вид:

$$U = \sum_{i=1}^{n} (y_i - (A + B \cdot z))^2 \tag{5}$$

где n – число интервалов.

После дифференцирования уравнения (5) по неизвестным коэффициентам A и B получается система уравнений:

$$\begin{cases} A \cdot n + B \sum_{i=1}^{n} z_i = \sum_{i=1}^{n} y_i \\ A \sum_{i=1}^{n} z_i + B \sum_{i=1}^{n} z_i^2 = \sum_{i=1}^{n} y_i z_i \end{cases} \tag{6}$$

В результате решения системы уравнений (6), коэффициенты уравнения (3), с учетом введенных обозначений, определяем по формулам:

$$c(V_0) = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \ln(S_{\partial i}(V_0) \cdot \sum_{i=1}^{n} (\ln(\delta_{pi}))^2 - \sum_{i=1}^{n} \ln(\delta_{pi}) \cdot \ln(S_{\partial i}(V_0)) \cdot \sum_{i=1}^{n} \ln(\delta_{pi})}{n \cdot (\sum_{i=1}^{n} \ln(\delta_{pi}))^2 - \sum_{i=1}^{n} (\ln(\delta_{pi}))^2} \right) \tag{7}$$

$$d(V_0) = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^{n} \ln(\delta_{pi}) \cdot \ln(S_{\partial i}(V_0)) - \sum_{i=1}^{n} \ln(\delta_{pi}) \cdot \sum_{i=1}^{n} \ln(S_{\partial i}(V_0))}{n \cdot (\sum_{i=1}^{n} \ln(\delta_{pi}))^2 - \sum_{i=1}^{n} (\ln(\delta_{pi}))^2} \tag{8}$$

Действительные тормозные пути (табл. 1 и 2) определялись на основе решения дифференциального уравнения (1) методом Рунге-Кутты 4 порядка в заданных диапазонах изменения расчетного тормозного коэффициента и скоростей в начале торможения (40 км/ч – 160 км/ч с шагом 10 км/ч) с использованием пакета прикладных программ написанных на языке VBA (Visual Basic for Application).

Величина погрешности при определения действительного тормозного пути вагона по аналитическим зависимостям в наиболее вероятном диапазоне изменения расчетного тормозного коэффициента не превышает 0,5 % (рис. 1). Формулы для определения действительного тормозного пути вагона в зависимости от расчетного тормозного коэффициента приведены в табл. 3.

Таблица 1. **Действительные тормозные пути пассажирского вагона с композиционными колодками на площадке**

V, км/ч	Расчетный тормозной коэффициент															
	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
40	104	94	87	80	75	70	65	62	58	55	52	50	48	46	44	42
50	165	151	139	128	119	111	105	99	93	88	84	80	76	73	70	67
60	243	221	204	188	175	164	154	145	137	130	123	118	112	108	103	99

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
70	336	307	282	261	243	227	213	201	190	180	171	163	156	149	143	138
80	445	407	374	346	322	301	283	267	252	239	228	217	207	198	190	183
90	571	521	479	444	413	387	363	342	324	307	292	279	266	255	245	235
100	712	651	599	555	517	483	454	428	405	384	366	349	333	319	306	294
110	870	795	732	678	632	591	556	524	496	471	448	427	408	391	375	360
120	1043	954	879	814	759	710	668	630	596	566	539	514	491	470	451	434
130	1232	1127	1039	963	898	841	791	746	706	670	638	609	582	558	535	514
140	1436	1314	1212	1124	1048	982	924	872	826	784	746	712	681	652	626	602
150	1654	1515	1398	1297	1210	1134	1067	1008	954	906	863	824	788	755	724	697
160	1888	1730	1597	1483	1384	1297	1221	1153	1092	1038	988	943	902	865	830	798

Таблица 2. **Действительные тормозные пути пассажирского вагона с чугунными колодками на площадке**

V, км/ч	Расчетный тормозной коэффициент															
	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15
40	109	97	88	80	74	68	63	59	55	52	49	47	45	42	40	39
50	184	164	148	135	124	115	107	100	94	88	83	79	75	72	68	65
60	281	251	227	207	190	176	164	153	144	135	128	121	115	110	105	101
70	402	360	325	297	273	252	235	220	206	194	184	174	166	158	151	144
80	548	490	443	405	372	344	321	300	282	266	251	238	227	216	206	198
90	718	643	582	531	489	453	422	394	371	349	331	314	298	284	272	260
100	913	818	740	677	623	577	538	503	473	446	422	401	381	364	347	333
110	1131	1015	920	841	775	718	669	627	589	556	526	499	475	453	433	415
120	1374	1233	1119	1024	944	875	816	764	719	678	642	610	580	554	529	507
130	1640	1473	1338	1225	1130	1048	978	916	862	814	771	732	697	665	636	609
140	1928	1734	1576	1444	1333	1237	1155	1082	1019	962	911	866	824	787	753	721
150	2237	2015	1833	1681	1552	1442	1346	1262	1188	1123	1064	1011	963	919	880	843
160	2567	2315	2107	1934	1787	1661	1552	1456	1371	1296	1228	1168	1113	1062	1017	975

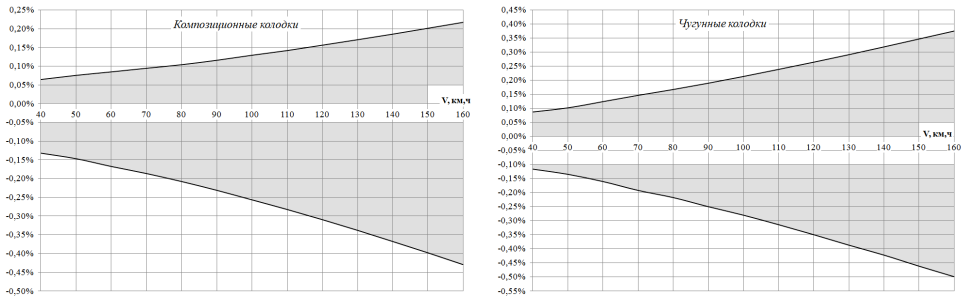


Рис. 1. **Погрешность (%) при определения действительного тормозного пути вагона по формулам табл. 3**

Таблица 3. **Формулы для определения действительных тормозных путей пассажирского вагона на площадке**

Скорость в начале торможения, км/ч	Композиционные колодки	Чугунные колодки
40	$S = 21{,}3074 \cdot \delta_{рк}^{-0{,}9831}$	$S = 44{,}511 \cdot \delta_{рч}^{-0{,}9827}$
50	$S = 34{,}166 \cdot \delta_{рк}^{-0{,}981}$	$S = 75{,}1444 \cdot \delta_{рч}^{-0{,}9793}$
60	$S = 50{,}362 \cdot \delta_{рк}^{-0{,}978}$	$S = 115{,}3807 \cdot \delta_{рч}^{-0{,}9755}$
70	$S = 70{,}0248 \cdot \delta_{рк}^{-0{,}9758}$	$S = 165{,}7643 \cdot \delta_{рч}^{-0{,}9714}$
80	$S = 93{,}262 \cdot \delta_{рк}^{-0{,}973}$	$S = 226{,}7142 \cdot \delta_{рч}^{-0{,}967}$
90	$S = 120{,}1645 \cdot \delta_{рк}^{-0{,}97}$	$S = 298{,}5191 \cdot \delta_{рч}^{-0{,}9621}$
100	$S = 150{,}816 \cdot \delta_{рк}^{-0{,}966}$	$S = 381{,}3917 \cdot \delta_{рк}^{-0{,}957}$
110	$S = 185{,}297 \cdot \delta_{рк}^{-0{,}963}$	$S = 475{,}4566 \cdot \delta_{рч}^{-0{,}9514}$
120	$S = 223{,}6632 \cdot \delta_{рк}^{-0{,}959}$	$S = 580{,}7718 \cdot \delta_{рч}^{-0{,}946}$
130	$S = 265{,}975 \cdot \delta_{рк}^{-0{,}954}$	$S = 697{,}334 \cdot \delta_{рч}^{-0{,}9395}$
140	$S = 312{,}278 \cdot \delta_{рк}^{-0{,}95}$	$S = 825{,}0981 \cdot \delta_{рч}^{-0{,}933}$
150	$S = 362{,}625 \cdot \delta_{рк}^{-946}$	$S = 963{,}969 \cdot \delta_{рч}^{-0{,}9265}$
160	$S = 417{,}038 \cdot \delta_{рк}^{-0{,}941}$	$S = 1113{,}806 \cdot \delta_{рч}^{-0{,}9196}$

Так как основным критерием допустимой скорости движения пассажирских поездов, согласно действующей нормативной документации, является суммарное нажатие чугунных колодок на 100 тс веса поезда, а вагоны в основном эксплуатируются на композиционных тормозных колодках, поэтому важное значение приобретают задачи пересчета тормозного коэффициента композиционных колодок на чугунные.

Такой пересчет производится исходя из равенства тормозных путей пассажирского поезда при чугунных и композиционных колодках. В таблице 4 приведены формулы для пересчета расчетного тормозного коэффициента колодок одного типа на другой тип. Погрешность пересчета не превышает 0,4 % (рис. 2).

Практические вычисления по формулам таблиц 3 и 4 могут быть реализованы в среде Excel для этого достаточно в соседних ячейках записать коэффициенты уравнений и применить формулу вычисления степени (рис. 3).

На основании изложенного, расчет тормозной эффективности пассажирского вагона может быть представлен алгоритмом, приведенным на рис. 4.

На большинстве пассажирских вагонах локомотивной тяги совместно с композиционными используются чугунные колодки на колесных парах с приводом от подвагонного генератора. Очевидно, для таких вагонов необходимо учитывать влияние чугунных колодок на тормозную эффективность.

Таблица 4. **Формулы для пересчете расчетного тормозного коэффициента с одного типа колодок на другой**

Скорость в начале торможения, км/ч	Формулы для пересчета тормозного коэффициента композиционных колодок на чугунные	Формулы для пересчета тормозного коэффициента чугунных колодок на композиционные
40	$\delta_{\text{рч}} = 2{,}116 \cdot \delta_{рк}^{1{,}0004}$	$\delta_{\text{рк}} = 0{,}4727 \cdot \delta_{рч}^{0{,}9996}$
50	$\delta_{\text{рч}} = 2{,}236 \cdot \delta_{рк}^{1{,}0016}$	$\delta_{\text{рк}} = 0{,}4477 \cdot \delta_{рч}^{0{,}9983}$
60	$\delta_{\text{рч}} = 2{,}339 \cdot \delta_{рк}^{1{,}0031}$	$\delta_{\text{рк}} = 0{,}4286 \cdot \delta_{рч}^{0{,}997}$
70	$\delta_{\text{рч}} = 2{,}428 \cdot \delta_{рк}^{1{,}0045}$	$\delta_{\text{рк}} = 0{,}4135 \cdot \delta_{рч}^{0{,}9955}$
80	$\delta_{\text{рч}} = 2{,}5061 \cdot \delta_{рк}^{1{,}0062}$	$\delta_{\text{рк}} = 0{,}4013 \cdot \delta_{рч}^{0{,}994}$
90	$\delta_{\text{рч}} = 2{,}575 \cdot \delta_{рк}^{1{,}0078}$	$\delta_{\text{рк}} = 0{,}3912 \cdot \delta_{рч}^{0{,}9922}$
100	$\delta_{\text{рч}} = 2{,}6366 \cdot \delta_{рк}^{1{,}0116}$	$\delta_{\text{рк}} = 0{,}3828 \cdot \delta_{рч}^{0{,}9903}$
110	$\delta_{\text{рч}} = 2{,}692 \cdot \delta_{рк}^{1{,}0097}$	$\delta_{\text{рк}} = 0{,}3757 \cdot \delta_{рк}^{0{,}9885}$
120	$\delta_{\text{рч}} = 2{,}7429 \cdot \delta_{рк}^{1{,}01373}$	$\delta_{\text{рк}} = 0{,}3696 \cdot \delta_{рч}^{0{,}9863}$
130	$\delta_{\text{рч}} = 2{,}789 \cdot \delta_{рк}^{1{,}0158}$	$\delta_{\text{рк}} = 0{,}3643 \cdot \delta_{рч}^{0{,}9843}$
140	$\delta_{\text{рч}} = 2{,}8323 \cdot \delta_{рк}^{1{,}0181}$	$\delta_{\text{рк}} = 0{,}3597 \cdot \delta_{рч}^{0{,}982}$
150	$\delta_{\text{рч}} = 2{,}8726 \cdot \delta_{рк}^{1{,}0206}$	$\delta_{\text{рк}} = 0{,}3556 \cdot \delta_{рч}^{0{,}9798}$
160	$\delta_{\text{рч}} = 2{,}91 \cdot \delta_{рк}^{1{,}023}$	$\delta_{\text{рк}} = 0{,}352 \cdot \delta_{рч}^{0{,}9775}$

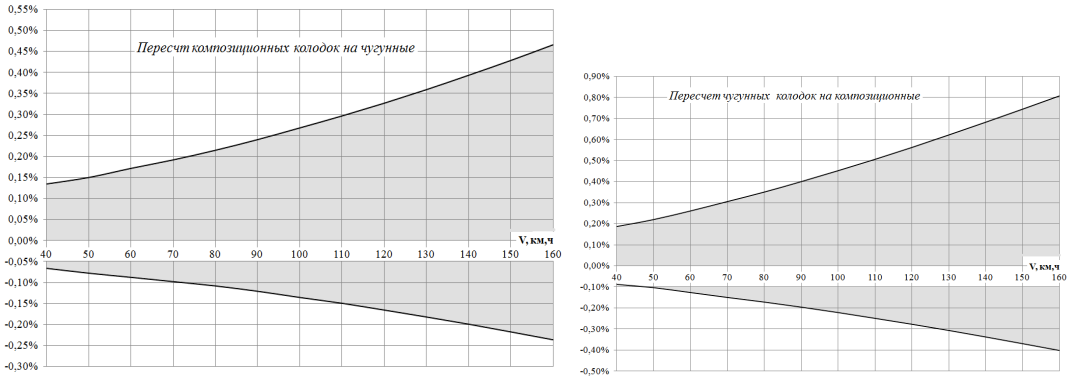
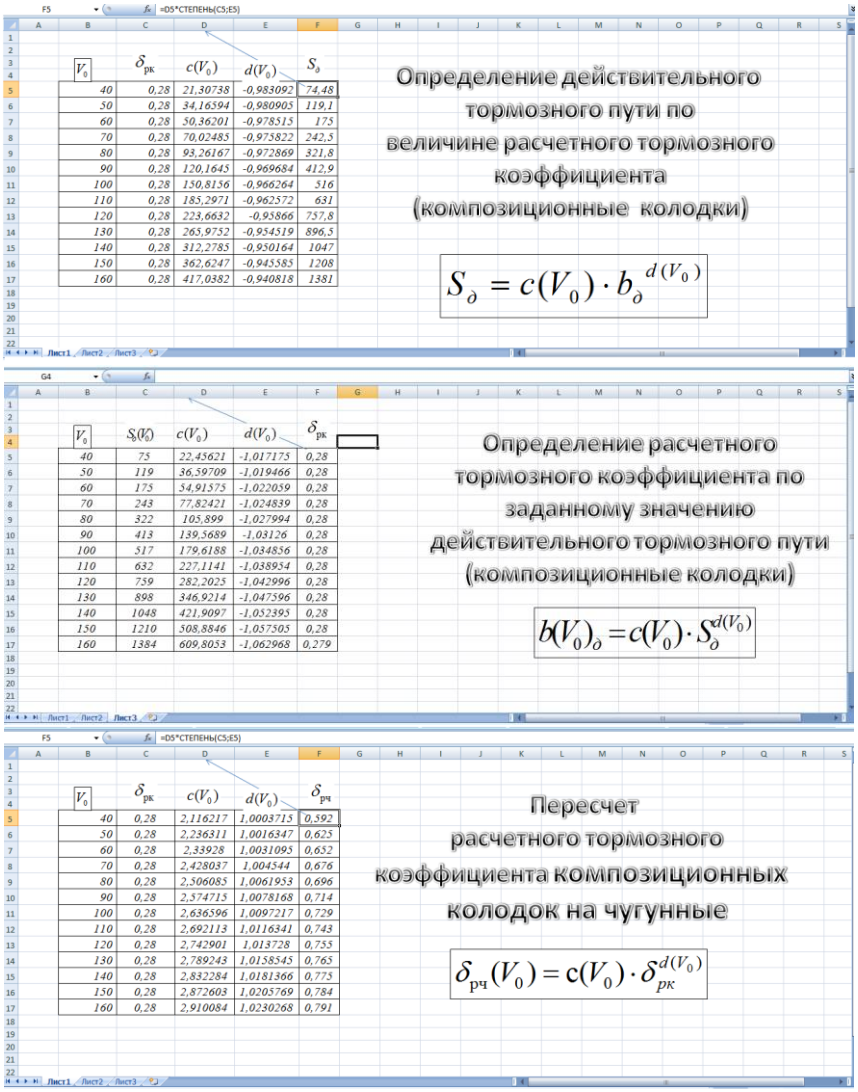


Рис. 2. **Погрешность (%) при пересчете тормозных коэффициентов по формулам табл. 4**



V_0	$\delta_{рк}$	$c(V_0)$	$d(V_0)$	$S_д$
40	0,28	21,30738	-0,983092	74,48
50	0,28	34,16594	-0,980905	119,1
60	0,28	50,36201	-0,978515	175
70	0,28	70,02485	-0,975822	242,5
80	0,28	93,26167	-0,972869	321,8
90	0,28	120,1645	-0,969684	412,9
100	0,28	150,8156	-0,966264	516
110	0,28	185,2971	-0,962572	631
120	0,28	223,6632	-0,95866	757,8
130	0,28	265,9752	-0,954519	896,5
140	0,28	312,2785	-0,950164	1047
150	0,28	362,6247	-0,945585	1208
160	0,28	417,0382	-0,940818	1381

V_0	$S_д(V_0)$	$c(V_0)$	$d(V_0)$	$\delta_{рк}$
40	75	22,45621	-1,017175	0,28
50	119	36,59709	-1,019466	0,28
60	175	54,91575	-1,022059	0,28
70	243	77,82421	-1,024839	0,28
80	322	105,899	-1,027994	0,28
90	413	139,5689	-1,03126	0,28
100	517	179,6188	-1,034856	0,28
110	632	227,1141	-1,038954	0,28
120	759	282,2025	-1,042996	0,28
130	898	346,9214	-1,047596	0,28
140	1048	421,9097	-1,052395	0,28
150	1210	508,8846	-1,057505	0,28
160	1384	609,8053	-1,062968	0,279

V_0	$\delta_{рк}$	$c(V_0)$	$d(V_0)$	$\delta_{рч}$
40	0,28	2,116217	1,0003715	0,592
50	0,28	2,236311	1,0016347	0,625
60	0,28	2,33928	1,0031095	0,652
70	0,28	2,428037	1,004544	0,676
80	0,28	2,506085	1,0061953	0,696
90	0,28	2,574715	1,0078168	0,714
100	0,28	2,636596	1,0097217	0,729
110	0,28	2,692113	1,0116341	0,743
120	0,28	2,742901	1,013728	0,755
130	0,28	2,789243	1,0158545	0,765
140	0,28	2,832284	1,0181366	0,775
150	0,28	2,872603	1,0205769	0,784
160	0,28	2,910084	1,0230268	0,791

Рис. 3. **Примеры вычисления по формулам табл. 3 и 4 в среде Excel**

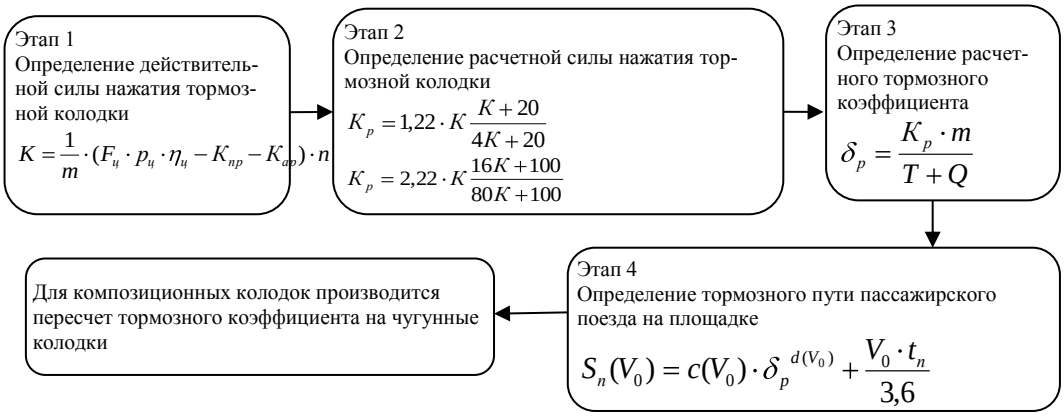


Рис. 4. **Алгоритм расчета тормозной эффективности пассажирского вагона**

Для определения расчетного коэффициента силы нажатия тормозных колодок пассажирского вагона со смешанными тормозными колодками предлагается методика расчета, в которой для определения расчетного коэффициента силы нажатия тормозных колодок в пересчете на чугунные колодки используется формула:

$$\delta_p^ч = \frac{n_k \cdot \delta_p^{к \to ч} + n_ч \cdot \delta_p^{к \to ч} \cdot \dfrac{i_{рк}}{i_{рч}}}{n_k + n_ч} \qquad (9)$$

где n_k – количество осей с композиционными колодками;

$n_ч$ – количество осей с чугунными колодками;

$\delta_p^{к \to ч}$ – расчетный тормозной коэффициент композиционных колодок в пересчете на чугунные;

$\delta_p^ч$ – расчетный коэффициент нажатия тормозных колодок на колеса пассажирского вагона с чугунными колодками;

$i_{рк}$ – передаточное отношение рычажной передачи тормоза при композиционных колодках;

$i_{рч}$ – передаточное отношение рычажной передачи тормоза при чугунных колодках.

Алгоритм расчета тормозной эффективности пассажирского вагона со смешанным типом тормозных колодок представлен на рис. 5.

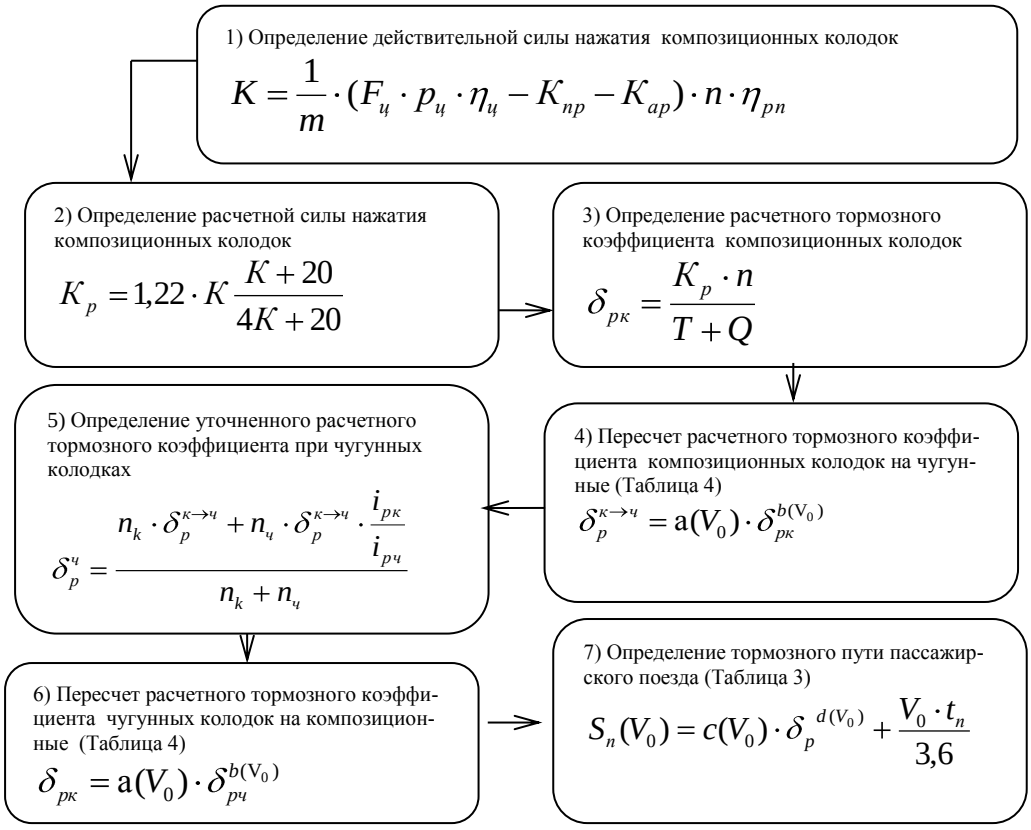


Рис. 5. **Алгоритм расчета тормозной эффективности пассажирского вагона со смешанным типом тормозных колодок**

Для иллюстрации предложенного алгоритма был выполнен расчет для пассажирского вагона на композиционных колодках и с чугунными колодками на колесной паре с приводом от подвагонного генератора, исходные данные для которого приведены в табл. 5.

Таблица 5. **Исходные данные для расчета тормозной эффективности пассажирского вагона**

Наименование параметра	Обозначение	Значение параметра
Сила тяжести вагона, тс	T	59,00
Сила тяжести груза, тс	Q	4,20
Число тормозных колодок	m	16,00
Параметры тормозного цилиндра		
Диаметр поршня, см	$d_ц$	35,60
Жесткость пружины, кг/см	$g_{пр}$	6,57
Усилие предварительного сжатия пружины, кгс	$F_{пр}$	159,00
КПД тормозного цилиндра	$\eta_ц$	0,98
Давление в тормозном цилиндре, кгс/см²	$p_ц$	4,10
Передаточное отношение рычажной передачи	n	5,51
Выход штока тормозного цилиндра, см (груженый)	$l_{шт}$	15,50
Параметры авторегулятора		
Усилие предварительного сжатия, кгс	$F_{авт}$	169,00
Жесткость пружины, кг/см	$g_{авт}$	23,10
Величина сжатия при торможении, см	$l_{авт}$	4,50
Передаточное отношение (композиционные)	$n_{авт}$	1,45
КПД рычажной передачи	$\eta_{рп}$	0,90

Анализ результатов вычислений (табл. 6.) показал, что наличие чугунных колодок уменьшает расчетный тормозной коэффициент на 13,2 % соответственно с 0,2788 (триповый расчет) до 0,242 (уточненный расчет).

Действительные тормозные пути в диапазоне скоростей 40-160 км/ч, полученные по изложенному алгоритму (рис. 5) представлены в табл. 7, а в пересчете на поезд при пневматическом торможении – в табл. 8. Пересчет тормозного коэффициента композиционных колодок приведен в табл. 9.

Таблица 6. **Расчет тормозной эффективности пассажирского вагона со смешанным типом тормозных колодок**

№ п/п	Наименование	Результата вычисления
1	Расчетное усилие сжатия внутренней отпускной пружины цилиндра, кгс	$K_{пр} = F_{пр} + g_{пр} \cdot l_{шт} =$ $= 159 + 6{,}57 \cdot 15{,}5 = 260{,}84$
2	Усилие пружины авторегулятора рычажной передачи, приведенное к штоку тормозного цилиндра, кгс	$K_{ар} = (F_{авт} + g_{авт} \cdot l_{авт}) \cdot n_{авт} =$ $= (169 + 23{,}1 \cdot 4{,}5) \cdot 1{,}45 = 395{,}78$
3	Действительная сила нажатия колодки на колесо, кгс (тс)	$K = \frac{1}{m} \cdot (\frac{\pi \cdot d_ц^2}{4} \cdot p_ц \cdot \eta_ц - K_{пр} - K_{ар}) \cdot n \cdot \eta_{рп} =$ $= \frac{1}{16} \cdot (\frac{3{,}14 \cdot 35{,}6^2}{4} \cdot 4{,}1 \cdot 0{,}98 - 260{,}84 - 395{,}78) \cdot 5{,}33 \cdot 0{,}9 =$ $= 1036{,}1 (1{,}0361)$
4	Расчетная сила нажатия колодки на колесо, тс	$K_р = 1{,}22 \cdot K \frac{K + 20}{4K + 20} = 1{,}22 \cdot 1{,}0361 \cdot \frac{1{,}0361 + 20}{4 \cdot 1{,}0361 + 20} = 1{,}1013$
5	Расчетный тормозной коэффициент композиционных колодок	$\delta_{рк} = \frac{K_р \cdot m}{T + Q} = \frac{1{,}1013 \cdot 16}{59 + 4{,}2} = 0{,}2788$
6	Пересчет на чугунные колодки	$\delta_{рч} = 2{,}91 \cdot \delta_{рк}^{1{,}023} = 2{,}91 \cdot 0{,}2788^{1{,}023} = 0{,}79$
7	Уточненная оценка расчетного тормозного коэффициента в пересчете на чугунные колодки	$\delta_р^ч = \frac{n_k \cdot \delta_р^{к \to ч} + n_ч \cdot \delta_р^{к \to ч} \cdot \frac{i_{рк}}{i_{рч}}}{n_k + n_ч} =$ $= \frac{3 \cdot 0{,}79 + 1 \cdot 0{,}79 \cdot \frac{5{,}51}{12}}{3 + 1} = 0{,}683$
8	Пересчет на композиционные колодки	$\delta_{рк} = 0{,}352 \cdot \delta_{рч}^{0{,}9775} = 0{,}352 \cdot 0{,}683^{0{,}9775} = 0{,}2425$

Таблица 7. **Действительные тормозные пути пассажирского поезда**

V_0 км/ч	Композиционные колодки				Смешанные колодки			
	$\delta_р$	$c(V_0)$	$d(V_0)$	$S_n(V_0) = c(V_0) \cdot \delta_р^{d(V_0)}$	$\delta_р$	$c(V_0)$	$d(V_0)$	$S_n(V_0) = c(V_0) \cdot \delta_р^{d(V_0)}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
40	0,2788	21,3074	0,9831	75	0,2425	21,3074	0,9831	86
50	0,2788	34,1659	0,9809	120	0,2425	34,1659	0,9809	137
60	0,2788	50,3620	0,9785	176	0,2425	50,3620	0,9785	201
70	0,2788	70,0248	0,9758	244	0,2425	70,0248	0,9758	279

Оконание табл. 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9
80	0,2788	93,2617	0,9729	323	0,2425	93,2617	0,9729	370
90	0,2788	120,1645	0,9697	415	0,2425	120,1645	0,9697	475
100	0,2788	150,8156	0,9663	518	0,2425	150,8156	0,9663	593
110	0,2788	185,2971	0,9626	634	0,2425	185,2971	0,9626	725
120	0,2788	223,6632	0,9587	761	0,2425	223,6632	0,9587	870
130	0,2788	265,9752	0,9545	900	0,2425	265,9752	0,9545	1028
140	0,2788	312,2785	0,9502	1051	0,2425	312,2785	0,9502	1200
150	0,2788	362,6247	0,9456	1213	0,2425	362,6247	0,9456	1384
160	0,2788	417,0382	0,9408	1387	0,2425	417,0382	0,9408	1581

Таблица 8. **Тормозные пути пассажирского поезда при пневматическом торможении**

V_0 км/ч	Электропневматическое торможение			Пневматическое торможение		
	Композиционные колодки	Смешанные колодки	%	Композиционные колодки	Смешанные колодки	%
40	97,0	108,0	10,19	119,2	130,2	8,45
50	147,4	164,9	10,62	175,1	192,7	9,13
60	209,1	234,8	10,94	242,4	268,1	9,59
70	282,4	317,9	11,17	321,3	356,8	9,95
80	367,6	414,5	11,32	412,0	459,0	10,24
90	464,6	524,7	11,45	514,6	574,7	10,46
100	573,7	648,5	11,53	629,2	704,0	10,63
110	694,7	785,8	11,59	755,8	846,9	10,76
120	827,6	936,5	11,63	894,3	1003,2	10,86
130	972,4	1100,6	11,65	1044,6	1172,8	10,93
140	1206,6	1277,7	5,57	1206,6	1355,5	10,98
150	1380,0	1467,7	5,98	1380,0	1551,1	11,03
160	1475,8	1670,3	11,65	1564,7	1759,2	11,06

Таблица 9. **Значения расчетных тормозных коэффициентов в пересчете композиционных колодок на чугунные**

V_0 км/ч	Композиционные колодки				Смешанные колодки			
	$\delta_{рк}$	$c(V_0)$	$d(V_0)$	$\delta_{рч} = c(V_0) \cdot \delta_{рк}^{d(V_0)}$	$\delta_{рк}$	$c(V_0)$	$d(V_0)$	$\delta_{рч} = c(V_0) \cdot \delta_{рк}^{d(V_0)}$
40	0,2788	2,1162	1,0004	0,5897	0,2425	2,1162	1,0004	0,5129
50	0,2788	2,2363	1,0016	0,6222	0,2425	2,2363	1,0016	0,5411
60	0,2788	2,3393	1,0031	0,6496	0,2425	2,3393	1,0031	0,5648
70	0,2788	2,4280	1,0045	0,6730	0,2425	2,4280	1,0045	0,5850
80	0,2788	2,5061	1,0062	0,6932	0,2425	2,5061	1,0062	0,6024
90	0,2788	2,5747	1,0078	0,7107	0,2425	2,5747	1,0078	0,6175
100	0,2788	2,6366	1,0097	0,7260	0,2425	2,6366	1,0097	0,6306
110	0,2788	2,6921	1,0116	0,7395	0,2425	2,6921	1,0116	0,6422
120	0,2788	2,7429	1,0137	0,7514	0,2425	2,7429	1,0137	0,6523
130	0,2788	2,7892	1,0159	0,7621	0,2425	2,7892	1,0159	0,6614
140	0,2788	2,8323	1,0181	0,7716	0,2425	2,8323	1,0181	0,6694
150	0,2788	2,8726	1,0206	0,7801	0,2425	2,8726	1,0206	0,6766
160	0,2788	2,9101	1,0230	0,7878	0,2425	2,9101	1,0230	0,6830

Анализ тормозной эффективности исследуемого пассажирского вагона по критерию единого наименьшего тормозного нажатия чугунных колодок на 100 тс веса поезда [12] при смешанных колодках показал, что допустимая скорость движения составляет не более 120 км/ч (табл. 10).

Таблица 10. **Единое наименьшее тормозное нажатие для пассажирских поездов в пересчете на чугунные колодки [7]**

Максимальная скорость движения, км/ч	Наименьшее тормозное нажатие на 100 тс веса поезда, тс	Тормозное нажатие на 100 тс веса поезда, тс (с композиционными колодками на всех колесных парах)	Тормозное нажатие на 100 тс веса поезда, тс (с чугунными колодками на колесной паре с приводом от подвагонного генератора)
до 120 км/час включительно	60 (0,6)	75,1 (0,751)	65,2 (0,652)
от 120 км/час до 130 км/год включительно	68 (0,68)	76,2 (0,762)	66,1 (0,661)
от 130 км/час до 140 км/час включительно	78 (0,78)	77,1 (0,771)	66,9 (0,669)
от 140 км/час до 160 км/час включительно	80 (0,80)	78,7 (0,787)	68,3 (0,683)

Выводы. Предложенный алгоритм расчета тормозной эффективности с применением полученных универсальных математических зависимостей позволяет:

1. Выполнять расчеты тормозной эффективности пассажирских вагонов со смешанным типом тормозных колодок;
2. Оценивать тормозную эффективность вагона по наименьшему тормозному нажатию в пересчете на чугунные колодки на 100 тс веса поезда;
3. Производить многовариантные расчеты при выборе рациональных характеристик тормозной системы, удовлетворяющих нормативным требованиям тормозной эффективности;
4. Результаты расчетов тормозной эффективности пассажирского вагона со смешанными тормозными колодками имеют хорошее совпадения с результатами ранее проведенных исследований [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Фомін, О. В.* Підвищення ступеня ідеальності вантажних вагонів та прогнозування стадій їх еволюції / О. В. Фомін, // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: НГУ, 2015. – №3. – С.68-76
2. *Fomin, O.* Modern requirements to carrying systems of railway general-purpose gondola cars/ O.V. Fomin / Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». 2014, No. 5 – P.31-43.
3. *Fomin, O.* Improvement of upper bundling of side wall of gondola cars of 12-9745 model / O.V. Fomin / Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». 2015, No. 1 – P.45-48.)
4. *Водянников Ю. Я.* Методология пересчета тормозной эффективности одиночного вагона на тормозную эффективность поезда/ Ю. Я. Водянников, С. М. Свистун, Е. Г. Макеева // Залізничний транспорт України. – 2014. – № 2. – С. 27-37.
5. *Водянников Ю.Я.* Влияние времени наполнения тормозного цилиндра сжатым воздухом на тормозную эффективность пассажирского вагона / Ю. Я. Водянников, А. М. Сафронов, С. М. Свистун // Залізничний транспорт України. – 2014. – № 5. – С. 3-8.
6. *Водянников Ю. Я.* Силы инерции при торможении пассажирского вагона / Ю. Я. Водянников, Т. В. Шелейко, Е. Г. Макеева // Залізн. трансп. України. – 2014. – № 4. – С. 3-8.
7. *Водянников Ю. Я.* Исследования тормозной эффективности пассажирских вагонов со смешанными тормозными колодками (композиционными и чугунными) / Ю. Я. Водянников, М. И. Яланский, А. П. Киницкая // Вагонный парк. – 2008. – № 1. – С. 13-16.
8. «Нормы для расчете и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм(несамоходных) – ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996 г.
9. *Иноземцев В. Г.* Нормы и методы расчета автотормозов / Иноземцев В.Г., Гребенюк П.Т. – М.: И-во «Транспорт»,1971. – 57 с.
10. *Гребенюк П. Т.* Правила тормозных расчетов / Гребенюк П. Т. – М.: Интекст, 2004. – 114 с.
11. *Гутер Р. С., Овчинский Б. В.* Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта / Гутер Р.С., Овчинский Б.В. – М.:«Наука», 1970.
12. ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015. Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України // Транспорт України, 2002.

Aleksandr Safronov, PhD (Technical Sciences)

(Deputy Director for Science, State Enterprise «State Research Center of Railway Transport of Ukraine»)

METHODOLOGY FOR CALCULATION RESEARCHES OF THE BRAKING EFFICIENCY OF PASSENGER CARS EQUIPPED WITH BLOCK BRAKES, BASED ON SOLVING A DIFFERENTIAL EQUATION OF MOTION AT BRAKING IN THE TIME DOMAIN

Calculation methods for braking efficiency of a passenger car with block brakes, based on solving a differential equation of motion at braking in the time domain was given. Calculation dependences for effective braking length calculation of a passenger train, and for

braking coefficients recalculation of composite brake shoes for cast-iron brake shoes and vice versa were represented. The methods allow making calculations for braking efficiency of mixed type brake shoes. A calculation example of the passenger car braking efficiency with mixed type brake shoes and comparative analysis of its efficiency with same-type brake shoes was given.

Keywords: *passenger car, braking efficiency, calculated braking coefficient, braking length*

REFERENCES

1. Fomin, O.V. Pidvyshchennia stupenia idealnosti vantazhnykh vahoniv ta prohnozuvannia stadii yikh evoliutsii (Increasing of freight cars ideality and forecasting stages of their evolution), Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu, Dnipropetrovsk, NHU, 2015, No 3, pp. 68-76

2. Fomin, O. Modern requirements to carrying systems of railway general-purpose gondola cars, Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». 2014, No. 5, pp. 31-43.

3. Fomin, O. Improvement of upper bundling of side wall of gondola cars of 12-9745 model, Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». 2015, No. 1, pp. 45-48.

4. Vodjannikov Ju. Ja. Svistun S. M., Makeeva E. G. Metodologiya perescheta tormoznoy effektivnosti odinochnogo vagona na tormoznuyu effektivnost poezda dlya perevoda (Methodology of the conversion efficiency of the brake single car on the braking efficiency of the train), Zalizn. transp. Ukrainy, 2014, No 2, pp. 27-37

5. Vodjannikov Ju. Ja., Safronov A. M., Svistun S. M. Vliyanie vremeni napolneniya tormoznogo tsilindra szhatyim vozduhom na tormoznuyu effektivnost passazhirskogo vagona (Effect of time of filling of the brake cylinder of compressed air to the braking efficiency of a passenger car), Zalizn. transp. Ukrainy, 2014, No 5, pp. 3-8.

6. Vodjannikov Ju. Ja., Sheleyko T. V., Makeeva E. G. Silyi inertsii pri tormozhenii passazhirskogo vagona (The forces of inertia during deceleration of the passenger car), Zalizn. transp. Ukrainy, 2014, No 4, pp. 3-8.

7. Vodjannikov Ju. Ja., Yalanskiy M. I., Kinitskaya A. P. Issledovaniya tormoznoy effektivnostipassazhirskih-vagonov so smeshannyimitormoznyimi kolodkami (kompozitsionnyimi i chugunnyimi) (Research braking efficiency of passenger cars with the mixed brake pads (composite and cast iron)), Vagonnyiy park, 2008, No 1, pp. 13-16.

8. Normyi dlya raschete i proektirovaniya vagonov zheleznyih dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnyih) (The rules for the calculation and design of wagons MPS 1520 mm gauge railways (non-self)), GosNIIV-VNIIZhT, 1996.

9. Inozemtsev V. G., Grebenyuk P. T. Normyi i metodyi rascheta avtotormozov (Norms and methods of calculation of car brakes), M.: I-vo «Transport», 1971, 57 p.

10. Гребенюк П. Т. Правила тормозных расчетов / Гребенюк П. Т. – М.: Интекст, 2004. – 114 с.

11. *Guter R. S., Ovchinskiy B. V.* Elementyi chislennogo analiza i matematicheskoy obrabotki rezultatov opyita (Elements of numerical analysis and mathematical processing of the experimental results), «Nauka», 1970.

12. TsT-TsV-TsL-0015. Instruktsiia z ekspluatatsii halm rukhomoho skladu na zaliznytsiakh Ukrainy (Operating Instructions brake rolling stock on the railways of Ukraine), Kyiv: Transport Ukrainy, 2002.