

УДК 629.4.077-592.117.001.4

*Ю.Я. Водяников, Т.В. Шелейко, А.М. Сафронов*

## АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ТОРМОЗНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВАГОНОВ

*Изложен алгоритм расчета неопределенности измерений тормозной эффективности грузовых и пассажирских вагонов по результатам поездных тормозных испытаний. В качестве программного обеспечения использован программный комплекс EXCEL. Программа полностью автоматизирована, в качестве исходных данных используются фактические значения скоростей и тормозных путей, полученных в процессе испытаний.*

При испытаниях новых конструкций вагонов важное значение приобретают вопросы анализа и оценки результатов тормозных испытаний и принятия решения о соответствии или несоответствии их нормативным требованиям.

Как правило, тормозная эффективность устанавливается по результатам ходовых тормозных испытаний, основными показателями которых являются:

- тормозные пути поезда в исследуемом диапазоне скоростей;
- тормозной коэффициент (расчетный коэффициент силы нажатия колодок на колеса);
- тормозные пути поезда на нормированных спусках.

Наиболее точным и объективным методом определения тормозной эффективности исследуемого вагона является метод «бросания», при котором разогнанный до заданной скорости вагон автоматически отцепляется от опытного сцепа в момент начала торможения, в то время как сцеп уходит вперед.

Тормозной путь опытного вагона определяется как разность путей локомотива с вагоном лабораторией от точки расцепления до его остановки и обратно до возвращения к испытываемому вагону (рис. 1).



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

Для определения фактических значений тормозных путей при прямом и обратном движении вагона лаборатории используется специальная программа, входными данными для которой являются сигналы, получаемые от датчика оборотов колес, установленного на оси колесной пары вагона лаборатории (рис. 2).

© Ю.Я. Водяников, Т.В. Шелейко, А.М. Сафронов, 2013

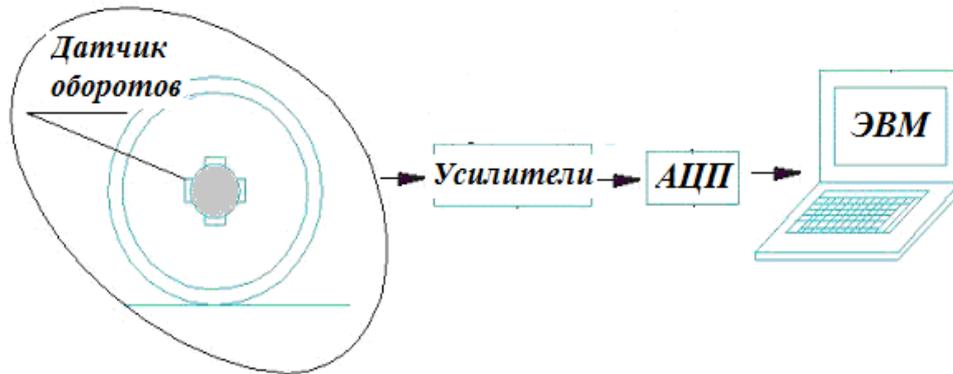


Рис. 2. Схема записи оборотов колеса

Традиционный подход в оценивании точности измерений основывается на понятии «погрешность измерений», которое является количественной характеристикой отклонения результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Однако, такой подход в анализе и оценке результатов испытаний не достаточно отвечает современным требованиям и сейчас все большее распространение получают вероятностные методы оценивания результатов испытаний, которые базируются на понятии «неопределенности измерений» (или просто «неопределенности») - параметре, характеризующем рассеивание значений и которые обоснованно могли бы быть приписаны измеряемой величине.

В этой связи, в одну из актуальных выдвигается задача автоматизации расчета неопределенности измерений исследуемых характеристик. Такая задача может быть решена с использованием средств вычислительной техники.

Вместе с тем следует отметить, что программа, написанная на алгоритмическом языке высокого уровня, представляет собой «черный ящик» и не позволяет проследить всю цепочку промежуточных вычислений.

Указанный недостаток отсутствует у программы «Excel», поэтому эта программа была принята в качестве основной для расчета неопределенности измерений результатов ходовых тормозных испытаний. При написании программы использовались основные положения [1].

Формула для определения стандартной неопределенности тормозного пути вагона на площадке  $u_S$  имеет вид [1]:

$$u_S = \sqrt{(l_k \cdot u_{об})^2 + \left(\frac{L_T \cdot m}{l_k \cdot n} \cdot u_1\right)^2 + \left(\frac{L_T \cdot m}{l_k \cdot n} \cdot u_2\right)^2 + \left(\frac{L_T \cdot m}{l_k \cdot n} \cdot u_3\right)^2 + u_A^2}, \quad (1)$$

где  $L_T$  – измеренное значение тормозного пути, м;

$l_k$  – длина окружности колеса с установленным датчиком оборотов, м;

$u_{об}$  – стандартная неопределенность измерения оборотов колеса;

$u_1$  – стандартная неопределенность, обусловленная ценой деления шкалы рулетки;

$u_2$  – стандартная неопределенность, обусловленная неточностью отметки начала и конца отсчета длины;

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$u_3$  – стандартная неопределенность, обусловленная систематической ошибкой при измерении длины рулеткой;

$n$  – число оборотов колеса при определении длины окружности;

$m$  – количество отрезков, равных длине рулетки на измеренном пути при определении длины окружности колеса.

Расширенная неопределенность определяется по формуле [2, 3]:

$$U_S = k \cdot u_S, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент охвата, определяемый как коэффициент из распределения Стьюдента для уровня доверия 0,95 и эффективного числа степеней свободы  $\nu_{eff}$  (формула Велча-Сатерсвейта)

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1} \frac{u^4(x_i)}{\nu_i} \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^4}, \quad (3)$$

$u_c$  – суммарная стандартная неопределенность входной величины;

$\nu_i$  – число степеней свободы для  $i$ -ой входной величины;

$u(x_i)$  – стандартная неопределенность для  $i$ -ой входной величины;

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$  – коэффициент чувствительности для  $i$ -ой входной величины.

Стандартная неопределенность расчетного коэффициента силы нажатия композиционных колодок  $u_\delta$  определяется по формуле:

$$u_\delta = \frac{\partial \delta}{\partial S} = d \cdot c \cdot S^{d-1} \cdot u_S, \quad (4)$$

где,  $c$  и  $d$  – коэффициенты уравнения выравнивания экспериментальных данных,

$$\delta(V_0) = c(V_0) \cdot S(V_0)^{d(V)}, \quad (5)$$

$\delta(V_0)$  – расчетный коэффициент силы нажатия тормозных колодок, который при применении метода бросания, определяется функциональной зависимостью от скорости движения в начальный момент торможения  $V_0$  и соответствующей ей величины тормозного пути  $S$  грузового поезда (тормозного пути одиночного вагона, пересчитанного на поезд).

Для расчета тормозного пути поезда на спусках 6 ‰ и 10 ‰ используется формула [4]:

$$S(i_c) = \frac{V_0 \cdot t_n}{3,6} + \sum \frac{4,17 \cdot (V_n^2 - V_k^2)}{1000 \cdot \delta \cdot \varphi_{mp} + W_{ox} + i_c}, \quad (6)$$

где  $i_c$  – спуск, ‰;

$V_i$  и  $V_\epsilon$  – начальная и конечная скорость в принятом расчетном интервале скоростей, км/ч;

## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$t_n$  – время подготовки автотормозов к действию, с;  
 $\varphi_{mp}$  – расчетный коэффициент трения тормозных колодок;  
 $W_{ox}$  – удельное основное сопротивление движению, кгс/т.

Неопределенность тормозного пути вагона в составе поезда на нормированных спусках зависит от расчетного коэффициента силы нажатия. Дифференцируя модельное уравнение (6) по  $\delta$ , получим:

$$u_{S(i)} = \sum \frac{4,17 \cdot (V_n^2 - V_k^2) \cdot \varphi_{mp}}{(1000 \cdot \delta \cdot \varphi_{mp} + W_{ox} + i_c)^2} \cdot u_\delta \cdot 1000 \quad , \quad (7)$$

где  $\sum \frac{4,17 \cdot (V_n^2 - V_k^2) \cdot \varphi_{mp}}{(1000 \cdot \delta \cdot \varphi_{mp} + W_{ox} + i_c)^2}$  – коэффициент чувствительности.

Бюджетные таблицы расчета неопределенности измерений формировались на украинском языке для использования в отчетных документах.

Программа состоит из отдельных взаимосвязанных блоков (листов).

Функциональное назначение блоков:

Блок 1 (рис. 3)

- задание измеренных значений скоростей и тормозных путей;
- определение коэффициентов для аналитического уравнения линии регрессии методом наименьших квадратов;
- построение графика линии регрессии;

Блок 2 (рис. 4)

- пересчет тормозного пути одиночного вагона на поезд длиной 200 осей;
- определение тормозных коэффициентов при композиционных колодках, а также в пересчете на чугунные колодки;

Блок 3 (рис. 5)

- задание характеристик средств измерений;
- расчет стандартной неопределенности тормозного пути одиночного вагона на площадке.

Блок 4 (рис. 6)

Определение коэффициентов чувствительности для расчета неопределенности тормозного пути поезда на спусках.

Блок 5 (рис. 7)

Расчет тормозного пути грузового поезда на нормированных спусках.

Блок 6 (рис. 8)

Формирование бюджетной таблицы неопределенности измерений тормозного пути грузового поезда на площадке.

Блок 7 (рис. 9)

Формирование бюджетной таблицы неопределенности измерений тормозных коэффициентов.

Блок 8 (рис. 10)

Формирование бюджетной таблицы неопределенности измерений тормозного пути грузового поезда на нормированных спусках.

Блок 9 (рис. 11)

Формирование итоговых таблиц расчета неопределенности измерений.

# РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Храктеристики применяемых средств измерений			Стандартная неопределенность тормозного пути одиночного вагона					
Excel	1	число импульсов, получаемых от датчика за один оборот колеса	2	№ опыта	Скорость, км/ч	$S_{изм\text{ер}}$	$S_{уравн} = a \cdot V^2 + b$	$(S_{изм\text{ер}} - S_{уравн})^2$
	2	шкала рулетки	0,001	1	44,02	210,76	195,9439162	219,5163383
	3	Ошибка начала и конца измерения	0,01	2	62,73	375,00	381,9178456	47,85658719
	4	Системная ошибка	0,00165	3	79,36	595,94	598,6381924	7,280242144
	5	путь колеса, измеренный рулеткой	30	4	115,12	1212,22	1228,577724	267,5751363
	6	Количество оборотов колеса	10	5	117,70	1317,60	1282,681151	1219,326028
	7	длина окружности колеса, 5/6	3	6	79,97	591,57	607,5077792	254,012807
	8	Длина рулетки	10	7	45,75	217,30	210,5695921	45,29839102
	9	Количество отрезков равных длине рулетки на измеренном пути	3	8	65,88	406,98	419,2530856	150,6286306
				9	101,71	933,15	966,1269401	1087,47858
				10	119,04	1315,41	1311,240974	17,38077416
				11	104,76	1020,36	1023,054656	7,261170389
				12	80,58	607,56	616,4424799	78,89844979
				13	44,20	212,21	197,4412517	218,1159258
				14	63,11	402,62	386,3296819	265,3744622
				15	96,11	883,73	865,8421832	319,973991
								4,35696551

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (S_i - (a \cdot V_i^2 + b \cdot V_i))^2}{k \cdot (k - 1)}}$$

Рис. 3. Блок 1

Пересчет тормозного пути одиночного вагона на поезд			Определение тормозных коэффициентов								
Время подготовки тормозов, с			Композиционные колодки			Чуунные колодки					
$S_{уравн} = a \cdot V^2 + b \cdot V$			$S_{поезд} = S_{уравн} + \frac{V_o \cdot t_n}{3,6}$			$\delta_k = c \cdot S^{-d}$			$\delta_v = \beta \cdot c \cdot S^{-d}$		
Excel	Скорость, км/ч	Тормозной путь одиночного вагона	Тормозной путь в пересчете на поезд	скор	путь	коэф с	коэф d	$\alpha_k$	коэф $\beta$	$\alpha_v$	
	40	163,9807	197,3140	40	197	3404,2	-1,8661	0,177	2,1173	0,376	
	50	248,7234	290,3901	50	290	2415,3	-1,6806	0,175	2,2339	0,392	
	60	350,9651	400,9651	60	401	2084,5	-1,5661	0,175	2,3333	0,408	
	70	470,7059	529,0392	70	529	1915,7	-1,4831	0,175	2,4148	0,423	
	80	607,9457	674,6123	80	675	1828,9	-1,4198	0,176	2,4914	0,438	
	90	762,6845	837,6845	90	838	1833,1	-1,3736	0,177	2,555	0,452	
	100	934,9223	1018,2556	100	1018	1888,8	-1,3384	0,178	2,6108	0,465	
	110	1124,6591	1216,3258	110	1216	1967,8	-1,3098	0,179	2,66	0,477	
	120	1331,8949	1431,8949	120	1432	2080,1	-1,2872	0,180	2,7037	0,487	
			Среднее значение тормозного коэффициента			0,177			0,435		

Рис. 4. Блок 2

Храктеристики применяемых средств измерений			Стандартная неопределенность тормозного пути одиночного вагона					
Excel	1	число импульсов, получаемых от датчика за один оборот колеса	2	№ опыта	Скорость, км/ч	$S_{изм\text{ер}}$	$S_{уравн} = a \cdot V^2 + b$	$(S_{изм\text{ер}} - S_{уравн})^2$
	2	шкала рулетки	0,001	1	44,02	210,76	195,9439162	219,5163383
	3	Ошибка начала и конца измерения	0,01	2	62,73	375,00	381,9178456	47,85658719
	4	Системная ошибка	0,00165	3	79,36	595,94	598,6381924	7,280242144
	5	путь колеса, измеренный рулеткой	30	4	115,12	1212,22	1228,577724	267,5751363
	6	Количество оборотов колеса	10	5	117,70	1317,60	1282,681151	1219,326028
	7	длина окружности колеса, 5/6	3	6	79,97	591,57	607,5077792	254,012807
	8	Длина рулетки	10	7	45,75	217,30	210,5695921	45,29839102
	9	Количество отрезков равных длине рулетки на измеренном пути	3	8	65,88	406,98	419,2530856	150,6286306
				9	101,71	933,15	966,1269401	1087,47858
				10	119,04	1315,41	1311,240974	17,38077416
				11	104,76	1020,36	1023,054656	7,261170389
				12	80,58	607,56	616,4424799	78,89844979
				13	44,20	212,21	197,4412517	218,1159258
				14	63,11	402,62	386,3296819	265,3744622
				15	96,11	883,73	865,8421832	319,973991
								4,35696551

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (S_i - (a \cdot V_i^2 + b \cdot V_i))^2}{k \cdot (k - 1)}}$$

Рис. 5. Блок 3

# РЕЙКОВОЙ РУХОМОЙ СКЛАД

Использованные формулы

$$\sum \frac{4,17 \cdot (V_n^2 - V_{n+1}^2) \cdot \phi_{mp}}{(1000 \cdot \delta_p \cdot \phi_{mp} + W_{ox} + i_c)^2}$$

$$\phi_{mp} = 0,36 \cdot \frac{V+150}{2 \cdot V+150}$$

скорость 80 км/ч						Excel					
0	фн	23,5	0,175994	с	%	0	фн	23,5	0,175994	с	%
5	0,354194	0,175994	62,33666	0,837766	-6	11,219554	5	0,354194	0,175994	62,33666	0,837766
10	0,343636	0,175994	60,47805	0,861117	-6	15,603796	10	0,343636	0,175994	60,47805	0,861117
15	0,334286	0,175994	58,83239	0,88883	-6	20,37688	15	0,334286	0,175994	58,83239	0,88883
20	0,325446	0,175994	57,36464	0,920746	-6	25,40977	20	0,325446	0,175994	57,36464	0,920746
25	0,318462	0,175994	56,01513	0,966916	-6	30,74493	25	0,318462	0,175994	56,01513	0,966916
30	0,3131707	0,175994	54,86872	0,99734	-6	36,33009	30	0,3131707	0,175994	54,86872	0,99734
35	0,309581	0,175994	53,7888	1,042021	-6	42,11493	35	0,309581	0,175994	53,7888	1,042021
40	0,3	0,175994	52,7593	1,090967	-6	48,05551	40	0,3	0,175994	52,7593	1,090967
45	0,294894	0,175994	51,89911	1,144749	-6	54,09904	45	0,294894	0,175994	51,89911	1,144749
50	0,290204	0,175994	51,07428	1,201596	-6	60,29004	50	0,290204	0,175994	51,07428	1,201596
55	0,285882	0,175994	50,31368	1,261298	-6	66,58082	55	0,285882	0,175994	50,31368	1,261298
60	0,281887	0,175994	49,61048	1,323956	-6	73,01987	60	0,281887	0,175994	49,61048	1,323956
65	0,278182	0,175994	48,96422	1,390468	-6	79,64407	65	0,278182	0,175994	48,96422	1,390468
70	0,274737	0,175994	48,35213	1,473936	-6	86,49953	70	0,274737	0,175994	48,35213	1,473936
75	0,271525	0,175994	47,76684	1,566206	-6	93,62007	75	0,271525	0,175994	47,76684	1,566206
80	0,268525	0,175994	47,20811	1,636338	-6	101,0488	80	0,268525	0,175994	47,20811	1,636338

Рис. 6. Блок 4

Использованные формулы

$$S_n(t) = \frac{V_n \cdot t_n}{3,6} + \sum \frac{4,17 \cdot (V_n^2 - V_{n+1}^2)}{1000 \cdot \delta_p \cdot \phi_{mp} + W_{ox} + i_c}$$

$$t_n = 7 - \frac{10 \cdot i_c}{b_m}$$

$$\phi_{mp} = 0,36 \cdot \frac{V+150}{2 \cdot V+150}$$

скорость 80 км/ч						Excel					
0	фн	23,5	0,175994	с	%	0	фн	23,5	0,175994	с	%
5	0,354194	0,175994	62,33666	0,837766	-6	1,823389	5	0,354194	0,175994	62,33666	0,837766
10	0,343636	0,175994	60,47805	0,861117	-6	5,651507	10	0,343636	0,175994	60,47805	0,861117
15	0,334286	0,175994	58,83239	0,88883	-6	9,792299	15	0,334286	0,175994	58,83239	0,88883
20	0,325446	0,175994	57,36464	0,920746	-6	13,87613	20	0,325446	0,175994	57,36464	0,920746
25	0,318462	0,175994	56,01513	0,966916	-6	18,00445	25	0,318462	0,175994	56,01513	0,966916
30	0,3131707	0,175994	54,86872	0,99734	-6	22,18121	30	0,3131707	0,175994	54,86872	0,99734
35	0,309581	0,175994	53,7888	1,042021	-6	26,40453	35	0,309581	0,175994	53,7888	1,042021
40	0,3	0,175994	52,7593	1,090967	-6	30,67056	40	0,3	0,175994	52,7593	1,090967
45	0,294894	0,175994	51,89911	1,144749	-6	35,07531	45	0,294894	0,175994	51,89911	1,144749
50	0,290204	0,175994	51,07428	1,201596	-6	39,61486	50	0,290204	0,175994	51,07428	1,201596
55	0,285882	0,175994	50,31368	1,261298	-6	44,29431	55	0,285882	0,175994	50,31368	1,261298
60	0,281887	0,175994	49,61048	1,323956	-6	49,11876	60	0,281887	0,175994	49,61048	1,323956
65	0,278182	0,175994	48,96422	1,390468	-6	54,09321	65	0,278182	0,175994	48,96422	1,390468
70	0,274737	0,175994	48,35213	1,473936	-6	59,21276	70	0,274737	0,175994	48,35213	1,473936
75	0,271525	0,175994	47,76684	1,566206	-6	64,48231	75	0,271525	0,175994	47,76684	1,566206
80	0,268525	0,175994	47,20811	1,636338	-6	70,00686	80	0,268525	0,175994	47,20811	1,636338

Рис. 7. Блок 5

Программа позволяет полностью автоматизировать расчет неопределенности измерений тормозной эффективности грузовых и пассажирских вагонов. Для этого достаточно данные, полученные в результате ходовых тормозных испытаний, занести в блок 1.

Для формирования отчета или протокола испытаний бюджетные и итоговые таблицы копируются в текстовый документ.





## РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Результаты расчета неопределенности измерений			Тормозная эффективность вагона			
Скорость, км/ч	Тормозной путь поезда на площадке	Тормозной коэффициент	Тормозной путь на площадке			
			Минимальный	Средний	Максимальный	
40	197,3±11,3 при P=0,95	0,1774±0,0187 при P=0,95	40	186,1	197,3	208,6
50	290,4±11,3 при P=0,95	0,1753±0,0113 при P=0,95	50	279,1	290,4	301,6
60	401,0±11,3 при P=0,95	0,1747±0,0076 при P=0,95	60	389,7	401,0	412,2
70	529,0±11,3 при P=0,95	0,1750±0,0055 при P=0,95	70	517,8	529,0	540,3
80	674,6±11,3 при P=0,95	0,1760±0,0041 при P=0,95	80	663,3	674,6	685,9
90	837,7±11,3 при P=0,95	0,1770±0,0032 при P=0,95	90	826,4	837,7	849,0
100	1018,3±11,3 при P=0,95	0,1780±0,0026 при P=0,95	100	1007,0	1018,3	1029,6
110	1216,3±11,3 при P=0,95	0,1791±0,0022 при P=0,95	110	1205,0	1216,3	1227,6
120	1431,9±11,4 при P=0,95	0,1802±0,0018 при P=0,95	120	1420,5	1431,9	1443,2
<b>Тормозные пути поезда на спусках</b>			<b>Тормозной коэффициент</b>			
Скорость, км/ч	Величина спуск	Тормозной путь	40	0,1587	0,1774	0,1961
80	- 6 ‰	766,7±15,1 при P=0,95	50	0,1640	0,1753	0,1866
90	- 6 ‰	952,9±15,0 при P=0,95	60	0,1671	0,1747	0,1823
100	- 6 ‰	1159,8±15,0 при P=0,95	70	0,1696	0,1750	0,1805
80	- 10 ‰	818,0±18,1 при P=0,95	80	0,1719	0,1760	0,1801
90	- 10 ‰	1009,3±18,1 при P=0,95	90	0,1738	0,1770	0,1803
			100	0,1754	0,1780	0,1806
			110	0,1770	0,1791	0,1813
			120	0,1784	0,1802	0,1820
<b>Допускаемые пути на уклонах (инстр. ЦШ/001)</b>			<b>Тормозной путь на спусках</b>			
			<b>На уклоне - 6 ‰</b>			
Скорость, км/ч	уклон 6 ‰		80	751,6	766,7	781,7
80	800	1000	90	937,8	952,9	967,9
90	1100	1300	100	1144,8	1159,8	1174,8
100	1400	1600	<b>На уклоне -10 ‰</b>			
Скорость, км/ч	уклон 10 ‰		80	799,9	818,0	836,1
80	1000	1200	90	991,2	1009,3	1027,4
90	1300	1500				

Рис. 11. Блок 9

### ЛИТЕРАТУРА

- Шелейко Т.В. Застосування основних положень невизначеності вимірювань для оцінки гальмівної ефективності рухомого складу / Т.В. Шелейко, Ю.Я. Водянніков, С.М. Свистун // Державний економіко-технологічний університет транспорту. Збірник наукових праць серія «Транспортні системи і технології». – К.: ДЕТУТ, 2012. – Вип. 21. – С. 81-92.
- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First Edition. – ISO, Switzerland, 1993. – 101 p.
- ДСТУ-Н РМГ 43-2006 Метрологія. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений» (РМГ 43:2001, ИДТ). – [Чинний від 2007-07-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 27 с. – (Національний стандарт України).
- Гребенюк П.Т. Правила тормозных расчетов / П.Т. Гребенюк // Труды ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2004. – 112 с.