

С. А. ПОЖИДАЕВ, Ю. Д. РОСЛИКОВА (Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь)

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОРТИРОВОЧНОЙ РАБОТЫ ПРИ РАСФОРМИРОВАНИИ СОСТАВОВ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ НА НЕМЕХАНИЗИРОВАННЫХ СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ

Наведено результати розрахунку рекомендованої довжини юза при гальмуванні вагонів на немеханізованих гальмівних позиціях сортувальних гірок у сучасних умовах їх роботи. В якості факторів, що впливають розглядаються: величина теплового потоку в плямі контакту «колесо-рейка», коефіцієнт тертя ковзання, критична температура, швидкість руху вагонів, що рухаються з сортувальної гірки, та інші. Дано рекомендації по обмеженню довжини юза при зміні різних чинників для забезпечення схоронності рухомого складу, що переробляється на немеханізованих сортувальних гірках, та безпеки руху.

*Ключові слова:* сортувальна гірка, гальмівні позиції, «колесо-рейка»

Приведены результаты расчета рекомендуемой длины юза при торможении вагонов на немеханизованных тормозных позициях сортировочных горок в современных условиях их работы. В качестве влияющих факторов рассматриваются: величина теплового потока в пятне контакта «колесо-рельс», коэффициент трения скольжения, критическая температура, скорость движения вагонов, скатывающихся с сортировочной горки, и другие. Даны рекомендации по ограничению длины юза при изменении различных факторов для обеспечения сохранности подвижного состава, перерабатываемого на немеханизованных сортировочных горках, и безопасности движения.

*Ключевые слова:* сортировочная горка, тормозные позиции, «колесо-рельс»

Results of calculation of the recommended length of a skid braking cars on non-mechanized brake positions humps in modern conditions of their work. As influencing factors are considered: the heat flux in the contact area of the «wheel-rail», the coefficient of sliding friction, critical temperature, speed of movement of cars moving with a hump, and others. Recommendations to limit the length of a skid when changing different factors to ensure the safety of rolling stock that is processed by the non-mechanized sorting slides, and driving safety.

*Keywords:* hill screening, brake position, «wheel-rail»

На многих сортировочных горках Белорусской железной дороги торможение вагонов осуществляется башмаками. Торможение башмаками имеет ряд существенных недостатков, одним из которых является недопустимо высокая температура в пятне контакта «колесо-рельс» при движении заклиненной башмаком колесной пары юзом по рельсу, приводящая к образованию односторонних ползунов и других термомеханических повреждений на тормозимой колёсной паре (примерно в 50 % случаев, согласно [3]). Особенно эта проблема обострилась в последнее время. В современных условиях в 1,5-2 раза уменьшилось удельное сопротивление движению вагона, возросли осевые нагрузки, увеличилось количество вагонов и доля полногрузных вагонов в отцепках. В результате повысилась скорость входа вагонов на тормозной башмак до 5-6 м/с и даже более [4-5]. Превышение допустимой длины юза при башмачном торможении (15...20 м) во многом является следствием того, что существующая высота сортировочных горок зачастую превышает минимально необходимую, сортировочные пути имеют недостаточную полезную дли-

ну на большинстве станций [1-2].

В результате термомеханических повреждений поверхности катания колесных пар вагонов на сортировочных горках, образующихся при башмачном торможении, только в 2010 году Белорусской железной дорогой было затрачено на ремонт поврежденных вагонов и замену колесных пар 3 668 млн. руб., [10, 11]. Ежедневно в процессе текущего отцепочного ремонта заменяется в среднем 65 колесных пар, из них 75 % – по причине образования односторонних ползунов и других термомеханических повреждений поверхности катания колес вагонов [11].

Механизация – наиболее эффективная мера повышения надежности и безопасности работы сортировочных горок, обеспечивающая значительное сокращение штата регулировщиков скорости движения вагонов (РСДВ), находящихся в зонах с опасными условиями труда, однако, требующая значительных инвестиций, при этом не всегда окупаемых, к тому же требуется определенное время на реализацию реконструктивных мероприятий. Часть сортировочных горок малой мощности, перерабатыва-

ющих 500...600 ваг/сутки, останется оснащенной только немеханизированными тормозными средствами ввиду низкой экономической эффективности их механизации [7, 8, 10].

В этих условиях, необходимо на основе глубокого изучения протекающих процессов при взаимодействии колеса и рельса разработать пути сокращения повреждений вагонов и повышения безопасности работы сортировочных устройств. Первоначальным шагом является обоснование допустимой длины торможения отцепов на немеханизированной тормозной позиции (длины юза). Для этого важно определить, какие факторы и как влияют на допустимую длину юза, чтобы температура в пятне фрикционного контакта не превышала критическую.

Выделяют следующие критические температурные точки:

1. Температура начала протекания тепловых процессов, приводящих к остаточным напряжениям: 300...550°C.

2. Температура начала пластического деформирования (пластического течения материала), приводящего к образованию ползунов и наваров: 400...700°C (в зависимости от нагрузки колеса на рельс).

3. Явно опасная температура в пятне контакта: 800°C и более.

4. Температура закалывания стали: 470...1200°C.

Известно, что температура эвтектичного превращения стали составляет 727°C. При больших скоростях нагрева и охлаждения стали, имеющих место на пятнах контакта колес с рельсами для заметного прохождения процессов изменения структуры требуется, чтобы максимальная температура на пятне контакта была на десятки градусов больше температуры эвтектичного превращения, то есть примерно 800°C.

Таким образом, температура в пятне фрикционного контакта «колесо-рельс» 400°C и выше нежелательна для колеса. Следовательно, для предотвращения термомеханических повреждений поверхности катания колес вагонов при движении колеса юзом необходимо, чтобы температура в пятне контакта «колесо-рельс» не превышала эту величину.

При движении колеса вагона по рельсу юзом образуется большое количество теплоты. Общая интенсивность теплового потока  $q_0$  (Вт/м<sup>2</sup>), возникающего во фрикционном контакте при трении скольжения колеса по рельсу

при движении юзом (при условии мгновенного возрастания теплового потока) определяется как

$$q_0 = \frac{\varphi_k \cdot P_k \cdot \bar{v}}{A_{a1}}, \quad (1)$$

где  $\varphi_k$  – коэффициент трения скольжения;

$P_k$  – нагрузка колеса на рельс, Н;

$\bar{v}$  – средняя скорость движения отцепа юзом, м/с;

$A_{a1}$  – номинальная площадь контакта фрикционного элемента и контртела (контакт колеса с рельсом), м<sup>2</sup>.

Образуемый тепловой поток неравномерно распределяется между колесом, рельсом, третьим телом (смазка, песок, остатки грузов) и окружающей средой. Из (1) видно, что на величину  $q_0$  оказывают влияние такие образующие факторы, как нагрузка колеса на рельс, связанная с осевой нагрузкой, скорость движения вагона при входе на башмак, коэффициент трения скольжения, площадь фрикционного контакта, зависящая от степени износа колеса, и другие факторы.

На величину скорости движения вагонов, скатывающихся с горки, в свою очередь влияют конструкция профиля горки, улучшенные ходовые свойства вагонов на роликовых подшипниках, род вагона, масса. Конструкция же тормозного башмака не претерпела никаких изменений за последние 100 лет. Согласно [9] допустимая скорость входа на тормозной башмак составляет 4,5 м/с (3,5 м/с). В [6] установлено, что недопустимые термомеханические повреждения колес перерабатываемого на сортировочных горках подвижного состава при башмачном торможении можно ожидать при скоростях движения юзом даже до 1 м/с. В связи с этим допустимая величина длины юза, установленная в [9] равной 15-20 м, сегодня не соответствует современным требованиям и требует пересмотра.

Произведем расчет  $q_0$  по формуле (1), используя данные результатов замеров скоростей входа отцепов на башмак при торможении на парковой немеханизированной тормозной позиции сортировочной горки малой мощности, величин образовавшихся ползунов. Результаты расчетов сведены в табл. 1, данные которой показывают, какое значительное количество теплоты образуется во фрикционном контакте «колесо-рельс» при движении колеса по рельсу юзом на башмачной тормозной позиции горки.

**Результаты расчёта общей интенсивности теплового потока, возникающего во фрикционном контакте «колесо-рельс» при движении юзом на тормозной позиции**

Коэффициент трения скольжения $\varphi_k$	Нагрузка колеса на рельс $P_{\text{к}}, \text{Н}$	Скорость движения юзом, м/с			Номинальная площадь контакта фрикционного элемента и контррельса $A_{\text{ал}}, \text{м}^2$	Общая интенсивность теплового потока $q_0, \text{МВт/м}^2$
		$V_{\text{вх}}$	$V_{\text{вых}}$	$\bar{V}$		
0,14	125 000	3,50	0	1,75	0,00175	17,5
		4,00	1,90	2,95		29,5
		4,15	2,20	3,17		31,7
		4,30	2,47	3,38		33,8
		4,40	2,64	3,52		35,2
		4,50	2,80	3,66		36,6
		5,00	3,56	4,28		42,8
		5,20	3,83	4,51		45,1
		5,30	3,96	4,63		46,3
		5,5	4,23	4,86		48,6

Количество теплоты, переданное в колесо и вызывающее его нагрев в зоне пятна контакта, зависит от продолжительности торможения или длины юза. Исходя из условия не превышения порогового значения допустимой температуры нагрева колеса вагона при торможении  $t_{\text{доп}} = 400^\circ\text{C}$  ( $673,16^\circ\text{K}$ ) максимально возможная длина юза  $l_{\text{юз}}$  (в метрах) определяется по формуле

$$l_{\text{юз}} = \frac{\pi \cdot \bar{V}}{a_1} \cdot \left[ \frac{(t_1 - t_0) \cdot \lambda_1}{2 \cdot \alpha_p \cdot q_0} \right]^2. \quad (2)$$

где  $t_1$ ,  $t_0$  – пороговое значение температуры нагрева поверхности катания колеса и температура окружающей среды, соответственно, К.  $t_1 = 673,16^\circ\text{K}$  и  $t_0 = 303,16^\circ\text{K}$  (летние условия);

$\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности стали колеса, Вт/(м·К),  $\lambda_1 = 43,44$  Вт/(м·К);

$\alpha_p$  – доля теплового потока, поступающего в колесо;

$a_1$  – коэффициент температуропроводности стали колеса,  $\text{м}^2/\text{с}$ . Для стали с учетом её удельной теплоёмкости и плотности  $a_1 = 11,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Произведем расчет допустимой длины юза по формуле (2) при скоростях входа колеса на башмак, равных 3,5 м/с, 4,5 и 5,5 м/с (табл. 1), когда доля теплового потока  $\alpha_p$  изменяется от 0,02 до 0,27. Результаты расчетов при  $q_0 = 36,6 \text{ МВт/м}^2$  ( $V_{\text{вх}} = 4,5 \text{ м/с}$ ,  $\varphi_k = 0,14$ ) приведены в табл. 2.

Основываясь на полученных значениях, построен график зависимости допустимой длины юза от количества передаваемой в колесо теплоты (рис. 1).

Таблица 2

**Расчет длины юза при изменении доли теплового потока, поступающего в колесо тормозимой колесной пары**

Промежуточные результаты расчетов по формуле (2)			Доля теплового потока, поступающего в колесо колесной пары вагона $\alpha_p$	Допустимая длина юза $l_{\text{юз}}, \text{м}$
$\pi \cdot \bar{V} / a_1$	$(t_1 - t_0) \cdot \lambda_1$	$2 \cdot q_0, \text{МВт/м}^2$		
1 008 364,85	15 910	73,2	0,02	119,1
			0,03	52,9
			0,04	29,8
			<b>0,048</b>	<b>20,7</b>
			0,05	19,1
			0,06	13,2
			0,07	9,7
			0,08	7,4
			0,09	5,9
			0,1	4,8
			0,15	2,1
			0,2	1,2
			0,25	0,8
			0,27	0,7

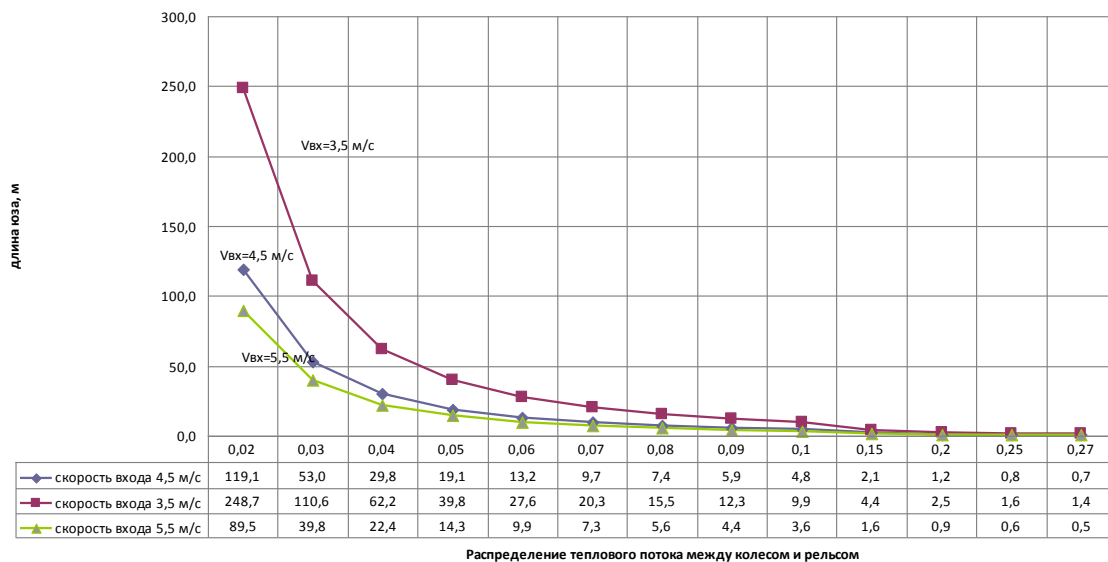


Рис. 1. График изменения длины юза  $l_{юз}$  в зависимости от величины  $\alpha_p$

В процессе торможения по мере нагрева стали обода колеса доля теплового потока, поступающего в колесо, увеличивается, в результате длина юза с максимальной величины в начале процесса торможения резко сокращается до примерно 14-19 м при возрастании  $\alpha_p$  с 0,02 до 0,05 (см. рис. 1). Далее величина допустимой длины юза плавно уменьшается от 14 до 0,5 м.

Если колесо будет двигаться юзом более максимально возможной величины, установленной по выражению (2), то произойдет нагрев контактного пятна свыше 400°C (температура начала протекания необратимых процессов в материале колеса) и на поверхности катания такого колеса может, например, образоваться участок с большей твердостью стали из-за закаливания, что приведёт к появлению термомеханического повреждения, например, выщербины. Во избежание таких явлений следует в процессе

расформирования составов на немеханизированных сортировочных горках уменьшать длину юза до установленной величины.

Известно, что коэффициент трения скольжения  $\varphi_k$  для металлических пар может колебаться от 0,1 до 0,16. При малых значениях  $\varphi_k$  образуется мягкое торможение (по мокрым рельсам), среднее торможение (сухой рельс), при больших – жесткое торможение (сухие рельсы и низкая температура). С увеличением скоростей движения и давления коэффициент трения начинает медленно уменьшаться. Общая интенсивность теплового потока, возникающего во фрикционном контакте при трении скольжения колеса по рельсу при движении юзом, в различных условиях с учетом изменения коэффициента трения скольжения  $\varphi_k$  и допустимая длина юза, приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Расчёт общей интенсивности теплового потока, возникающего во фрикционном контакте «колесо-рельс», и длины юза при изменении коэффициента трения скольжения колеса по рельсу**

Параметры и промежуточные результаты расчетов по формуле (2)								Длина юза $l_{юз}$ , м
$\varphi_k$	$P_k$ , кН	$\bar{v}$ , м/с	$A_{a1}$ , м <sup>2</sup>	$q_0$ , МВт/м <sup>2</sup>	$\pi \cdot \bar{v} / a_1$	$(t_1 - t_0) \cdot \lambda_1$	$\alpha_p$	
0,1	125	3,66	0,00175	26,1	1007054,96	15910	0,048	40,5
0,11				28,8				33,4
0,12				31,4				28,1
0,13				34,0				23,9
<b>0,14</b>				<b>36,6</b>				<b>20,7</b>
0,15				39,2				18,0
0,16				41,8				15,8

Графическая интерпретация зависимости длины юза от условий трения колеса и рельса

при изменении коэффициента  $\varphi_k = 0,1 \dots 0,16$  показана на рис. 2.

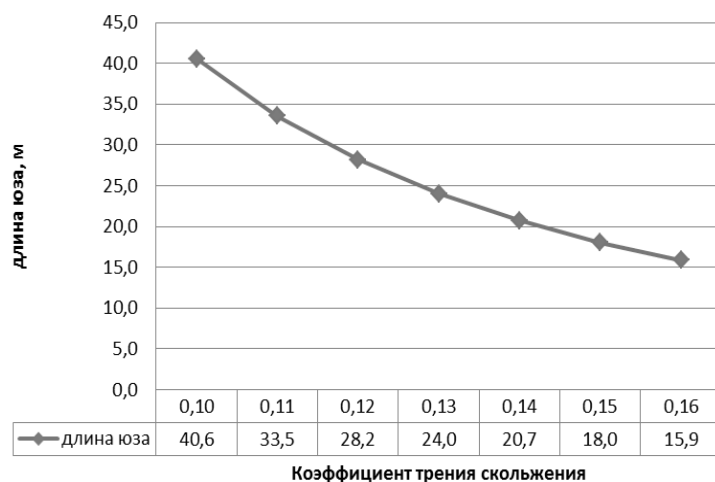


Рис. 2. Зависимость длины юза  $l_{\text{юз}}$  от величины коэффициента трения скольжения  $\varphi_k$

Данные табл. 3 и рис. 2 показывают, что при жестком торможении (ориентировочно  $\varphi_k = 0,16$ ) длина юза составляет примерно 16 м, при средних условиях (ориентировочно  $\varphi_k = 0,14$ ) длина юза достигает 20 м, что соответствует нормативным требованиям [9]. Полученное значение  $l_{\text{юз}} = 20,7$  м является точкой преломления процесса, показанного на рис. 1 ( $v_{\text{вх}} = 4,5$  м/с,  $\alpha_p = 0,048$ ).

Исследуем величину длины юза при изменении скорости движения вагона и коэффициента трения скольжения. Скорость движения отцепа при входе на башмачную тормозную позицию сортировочной горки будем варьировать от 3,5 до 5,5 м/с. Результаты расчетов допустимой длины юза отцепа при его торможении с помощью башмаков в зависимости от изменения скорости входа вагона на тормозной башмак сведены в табл. 4.

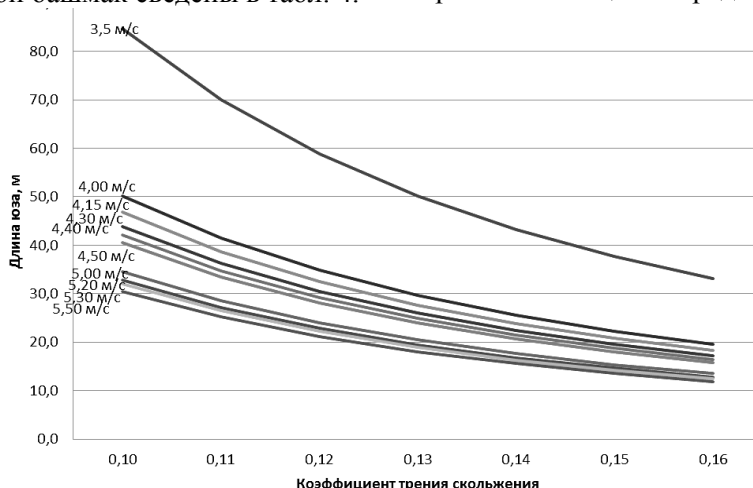


Рис. 3. График зависимости величины допустимой длины юза от скорости движения вагонов, скатывающихся с сортировочной горки

Выполненные исследования позволяют сделать следующие основные выводы:

Таблица 4  
Изменение допустимой длины юза в зависимости от скорости движения вагона, м

$\varphi_k$	Длина юза при $v_{\text{вх}}$ , м/с									
	3,50	4,00	4,15	4,30	4,40	4,50	5,00	5,20	5,30	5,50
0,10	84,6	50,2	46,8	43,9	42,1	40,6	34,6	32,9	32,0	30,5
0,11	70,0	41,5	38,7	36,3	34,8	33,5	28,6	27,2	26,4	25,2
0,12	58,8	34,9	32,5	30,5	29,2	28,2	24,0	22,8	22,2	21,2
0,13	50,1	29,7	27,7	26,0	24,9	24,0	20,5	19,5	18,9	18,0
0,14	43,2	25,6	23,9	22,4	21,5	20,7	17,6	16,8	16,3	15,6
0,15	37,6	22,3	20,8	19,5	18,7	18,0	15,4	14,6	14,2	13,6
0,16	33,1	19,6	18,3	17,1	16,4	15,9	13,5	12,8	12,5	11,9

Расчеты выполнены при  $\alpha_p = 0,048$ . График зависимости длины юза от изменения скорости движения вагонов при различных условиях торможения отцепов представлен на рис. 3.

1. При башмачном регулировании скорости движения вагонов, распускаемых с сортиро-

вочных горок, в пятне контакта «колесо-рельс» образуется высокая температура, приводящая к термомеханическим повреждениям поверхности катания колес вагонов. Важно, чтобы эта температура не превышала критическую величину для стали колеса. На степень нагрева фрикционного контакта «колесо-рельс» при движении колеса юзом наибольшее влияние оказывают такие образующие факторы, как скорость движения вагона, осевая нагрузка, коэффициент трения скольжения, толщина обода колеса (у нового площадь контакта меньше, чем у изношенного), состояние геометрии рельсовой колеи, температура окружающей среды и др. Обоснование допустимой длины юза при торможении вагонов на немеханизированных тормозных позициях значительно усложняется вследствие изменчивого характера таких параметров, как коэффициент трения скольжения, величина теплового потока, поступающего в колесо вагона при торможении, скорость движения, причем эти параметры изменяются непосредственно в процессе торможения, то есть речь идет о дифференциальных вычислениях.

2. Нормативные значения допустимой длины юза  $l_{\text{пс}} = 15 \dots 20$  м, приведенные в [9], определены для скоростей движения вагонов на немеханизированных тормозных позициях, не превышающих 4,5 м/с (по конструкции башмака) для жестких условий торможения при  $\varphi_k = 0,16$  и более ( $l_{\text{пс}} = 15$  м) и средних условий при  $\varphi_k = 0,14$  ( $l_{\text{пс}} = 20$  м).

3. На современном этапе эксплуатации сортировочных устройств скорости движения вагонов, свободно скатывающихся с сортировочной горки, значительно возросли под действием выявленных причин. Принятые в настоящее время нормативы допустимой длины юза требуют пересмотра в сторону уменьшения. Так, в исследовании установлено, что при повышенных скоростях движения (до 5,5 м/с) необходимо ограничивать длину юза при башмачном торможении до 10 м (для жестких условий торможения) и 15 м (для средних). При мягких условиях торможения длина юза может достигать 30 м и более. В этом случае требуется даже увеличивать силу трения скольжения, как и происходит на практике. Расчеты выполнены для полногрузного четырехосного вагона массой брутто 100 т при действии летних благоприятных условий ( $t_{\text{окр}} = 30^\circ\text{C}$ ).

4. Уменьшение допустимой длины юза до 10...15 м приведет к снижению мощности тормозных позиций, поэтому требуются дополни-

тельные исследования по проверке достаточности наличной мощности тормозных средств немеханизированных сортировочных горок и разработки мероприятий для приведения её в соответствие с потребной.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Луговцов, М. Н. Сортировочные станции [Текст]: учеб. пособие / М. Н. Луговцов и др. – Гомель: БелГУТ, 2009 – 248 с.
2. Луговцов, М. Н. Проектирование сортировочных горок [Текст] / М. Н. Луговцов, В. Я. Негрей. – Гомель: УО «БелГУТ», 2005. – 170 с.
3. Контактно-усталостные повреждения колес грузовых вагонов [Текст] / Под ред. С. М. Захарова. – М.: Интекст, 2004 – 160 с.
4. Берент, В. Я., Снижение повреждаемости колес вагонов на сортировочных горках [Текст] / В. Я. Берент, А. В. Николаев, И. П. Старшов // Вестник ВНИИЖТ. – 2009. – № 2. – С. 34-39.
5. Мурадян, Л. А. Исследование действующих условий эксплуатации и анализа причин сокращения ресурса работы железнодорожных колёс [Текст] / Л. А. Мурадян, В. Г. Анофриев // Вестник Днепро. нац. ун-та ж.д.тр-та им. ак. В. Лазаряна. – 2010. – Вып. 34. – С. 206-210.
6. Жаров, И. А. Расчет температур на пятне контакта колеса с рельсом при юзе и боксовании [Текст] / И. А. Жаров // Том 24: Трение и износ. – ВНИИЖТ, 2003. – № 3. – С. 248-259.
7. Ключевое звено перевозочного процесса. О программе совершенствования работы и развития сортировочных станций на 2006-2015 гг. [Текст] / И. М. Яриков, и др. // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 1. – С. 41-47.
8. Павлов, Л. Н. Автоматизация и механизация процессов на сортировочных станциях. Зарубежный опыт [Текст] / Л. Н. Павлов // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 1. – С. 55-61.
9. Правила и нормы проектирования сортировочных устройств на железных дорогах союза СССР [Текст]: ВСН 207-89, МПС СССР, – М., 1992 г. – 104 с.
10. Разработка технико-экономического обоснования и Программы развития сортировочных горок на станциях Белорусской железной дороги [Текст]: Программа развития, УП «Белжелдорпроект». – Минск, 2011. – 94 с.
11. Протокол Совещания у заместителя Начальника Белорусской железной дороги Балахонова В. В. от 21.04.2011 № 141 [Текст], г. Минск.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. В. Я. Негреем (Беларуссия)*

Поступила в редколлегию 10.12.2013.

Принята к печати 11.12.2013.