

УДК 622.683:679.8

СВЯЗЬ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ КОНТАКТА СИСТЕМЫ КОЛЕСО–РЕЛЬС С УКЛОНОМ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

*Керопян А.М., д.т.н., профессор кафедры «Инжиниринг технологического оборудования»
Герасимова А.А., к.т.н., доцент, ученый секретарь кафедры «Инжиниринг
технологического оборудования» (allochka@rambler.ru)*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Проведены исследования влияния руководящего уклона промышленного железнодорожного пути на температуру в зоне контакта колеса карьерного локомотива с рельсом. В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что величина руководящего уклона промышленных железнодорожных путей влияет на изменение температуры в зоне контакта системы колесо–рельс локомотивов и характеризуется температурным коэффициентом уклона k_y . Для определения значений k_y на шахтном локомотиве модели SCHÖMA-350 (Германия) были проведены экспериментальные исследования на предприятии ОАО «МОСМЕТРОСТРОЙ» в условиях шахт строящихся станций Московского метрополитена. При разных скоростях движения и уклонах рельсового пути измерялись температура и скорость скольжения в зоне контакта системы колесо–рельс. Установлено, что с увеличением уклона рельсового пути температура в зоне контакта системы колесо–рельс увеличивается, поэтому допустимая скорость пробуксовки тяговых колесных пар локомотива с приработанными профилями в условиях карьеров будет выше. Показано, что новые профили рабочих поверхностей колеса и рельса, исходя из критерия непревышения температуры в зоне контакта 300 °С для условий, характерных параметрам открытых горных работ, не обеспечивают рациональные условия эксплуатации. Величина температурного коэффициента уклона k_y в интервале уклонов карьерных рельсовых путей от 0 до 10 % равна $k_y = 0$. Показано, что определять температуру в зоне контакта системы колесо–рельс для условий открытых горных работ следует по формулам, рекомендованным для железных дорог общего пользования. Результаты расчетов, выполненных по разработанной методике, показывают удовлетворительную сходимость с результатами экспериментальных исследований. Погрешность аппроксимации коэффициента влияния горных условий КГУ в диапазоне от 25 до 45 % не превышает ± 5 %. Результаты исследований, проведенных по разработанной методике, в зависимости от области интересов приняты к использованию на предприятиях ОАО «Урал-асбест» и ООО «ЗУМК-Инжиниринг» (Группа предприятий Западно-Уральского концерна, Россия).

Ключевые слова: промышленные железнодорожные пути, открытые горные работы, пятно контакта, температура системы колесо–рельс, руководящий уклон, температурный коэффициент уклона, коэффициент влияния горных условий, карьерный локомотив, скорость проскальзывания.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-5-355-363

Одним из критериев оценки энергетических процессов, происходящих в пятне контакта системы колесо–рельс при передаче вращающего момента, является температура, которая также характеризует изменение механических свойств материалов взаимодействующих тел, что, как следствие, характеризует их работоспособность и долговечность.

Для расчета температуры на взаимодействующих поверхностях колеса и рельса для железных дорог общего пользования рекомендуется формула [1, 2], которую после небольших преобразований можно представить в виде

$$\theta = \frac{0,0576 K_{(н/пр)} f U_{ск} \sqrt{a_1 V_{дв}}}{\lambda (2a)^{0,5} A}, \quad (1)$$

где θ – температура в зоне контакта системы колесо–рельс, °С; $K_{(н/пр)}$ – коэффициент условий контактирования неприработанных (н) и приработанных (пр) профилей, Дж ($K_H = 4/3 \pi a^2 b \sigma_{max}$ – для новых профи-

лей, $K_{пр} = \pi a^2 t \sigma_{max}$ – для приработанных профилей); f – коэффициент трения; $U_{ск}$ – скорость относительного скольжения, %, $U_{ск} = \frac{V_{ск}}{V_{дв}} \cdot 100$; a_1 – коэффициент температуропроводности, м²/с (для стали $a_1 = 11,9 \cdot 10^{-6}$); λ – теплопроводность, Вт/(м·°С) (для стали $\lambda = 44,0$); a – полуширина (большая полуось) площадки контакта, м; b – малая полуось площадки контакта, м; t – ширина зоны контакта (для приработанных профилей), м; A – контурная площадь контакта, м²; $V_{дв}$ – скорость движения локомотива, м/с; $V_{ск}$ – скорость скольжения (пробуксовки) обода колеса локомотива, м/с; σ_{max} – максимальное контактное напряжение в зоне контакта, МПа.

Цель работы – исследование влияния руководящего уклона¹ промышленного железнодорожного пути на

* Руководящий уклон является наибольшим затяжным уклоном пути, а для карьеров – обычно подъемом пути выездной траншеи. Согласно действующим правилам, величина руководящего уклона может достигать до 80 ‰ (80 промилле) [3, 4].

температуру в зоне контакта колеса карьерного локомотива с рельсом.

Для локомотивов промышленного железнодорожного транспорта, эксплуатируемых в частности в условиях открытых горных разработок, применение формулы (1) нецелесообразно, так как не учитываются характерные для промышленного транспорта условия – повышенные уклоны рельсовых путей, достигающие до 60 ‰. Поэтому авторами предлагается вычислять температуру в зоне контакта системы колесо–рельс по формуле

$$\theta = \frac{0,0576K_{(н/пр)}fK_{гy}U_{ск}\sqrt{a_1V_{дв}}}{\lambda(2a)^{0,5}A}, \quad (2)$$

где $K_{гy}$ – коэффициент, учитывающий влияние горных условий эксплуатации.

Номинальные размеры пятна контакта можно определять по формулам Герца-Беляева [3 – 5], тем не менее, при выполнении расчетов применялись более точные данные, полученные экспериментальным путем в работе [2].

Коэффициент влияния горных условий эксплуатации определяется как

$$K_{гy} = (1 + k_y i), \quad (3)$$

где k_y – температурный коэффициент, зависящий от уклона рельсового пути; i – величина уклона карьерного рельсового пути, ‰.

С учетом (3) получим

$$\theta = \frac{0,0576K_{(н/пр)}f(1 + k_y i)U_{ск}\sqrt{a_1V_{дв}}}{\lambda(2a)^{0,5}A}. \quad (4)$$

Исследования, выполненные в работе [2], проводились в условиях железных дорог общего пользования, максимальная крутизна расчетных уклонов которых для более 80 % общей протяженности не превышает 9 ‰ [6]. Поэтому для уклонов до 10 ‰ принимаем $k_y = 0$. Для этих условий эксплуатации $K_{гy} = 1$ и расчеты температуры можно выполнять по формуле (1).

Из формулы (4) можно получить зависимость коэффициента k_y от параметров процесса взаимодействия системы колесо–рельс карьерных локомотивов

$$k_y = \frac{\theta\lambda(2a)^{0,5}A - U_{ск}0,0576Kf\sqrt{a_1V_{дв}}}{0,0576U_{ск}Kif\sqrt{a_1V_{дв}}}. \quad (5)$$

Для определения значений k_y на шахтном локомотиве модели SCHÖMA-350 (Германия) были проведены экспериментальные исследования на предприятии ОАО «МОСМЕТРОСТРОЙ» в условиях шахт строящихся станций Московского метрополитена. При разных скоростях движения и уклонах рельсового пути

измерялись температура и скорость скольжения в зоне контакта системы колесо–рельс (рис. 1). Температура измерялась инфракрасным термометром «testo 845» (тепловизор), скольжение – по методике, изложенной в работе [7].

Результаты измерений приведены в табл. 1.

Значения коэффициентов, требуемые для выполнения расчетов по формуле (4), приведены в табл. 2.

Формула (4) позволяет учесть степень влияния на температуру θ в зоне контакта системы колесо–рельс ряда факторов, таких как, например, контурная площадь контакта A , осевая нагрузка P , скорость скольжения $U_{ск}$, коэффициент трения f , скорость движения $V_{дв}$ и величину уклона i карьерного рельсового пути. Результаты обработки экспериментальных данных приведены в табл. 3.

С физической точки зрения коэффициент $K_{(н/пр)}$ представляет собой величину энергии, выделяющейся в зоне контакта пары колесо–рельс при коэффициенте трения $f = 1$ и скорости относительного скольжения $U_{ск} = 100$ ‰. Исходя из этого, коэффициентом $K_{(н/пр)}$ можно воспользоваться при анализе влияния различных параметров, определяющих условия контактирования колеса и рельса, на величину энергии, выделяющейся между взаимодействующими поверхностями



Рис. 1. Устройство для измерения температуры и скорости скольжения в зоне контакта системы колесо–рельс:

a – общий вид; *б* – установка инфракрасного термометра «testo 845»

Fig. 1. Device for measuring the temperature and sliding speed in the contact zone of wheel–rail system:

a – general view; *b* – installation of infrared thermometer “testo 845”

Таблица 1

Экспериментальные значения скорости пробуксовки и температуры в зоне контакта системы колесо–рельс локомотива SCHÖMA-350

Table 1. The experimental values of slipping speed and temperature in the contact zone of the wheel – rail system of locomotive SCHÖMA-350

Исходные данные		Данные экспериментов (средние значения)	
$V_{дв}$, м/с(км/ч)	i , ‰	$U_{ск}$, ‰	θ , °С
1,39 (5,0)	5,0	3,4	82,0
1,39 (5,0)	25,0	7,8	195,0
1,39 (5,0)	45,0	12,3	330,0
2,78 (10)	5,0	5,6	191,0
2,78 (10)	25,0	13,2	465,0
2,78 (10)	45,0	17,5	650,0

при движении в режиме тяги [2]. Далее в тексте принято: $K_{(н/пр)} = K_{пр} = K$.

В работе [2] приведены значения коэффициента K в зависимости от осевой нагрузки P , размеров контурной площадки контакта A и степени приработанности профилей контактирующих поверхностей колеса и рельса. Там же показано, что с увеличением осевой нагрузки коэффициент K увеличивается и одновременно происходит увеличение выделяемой в зоне контакта энергии. При этом, с увеличением площади контакта, удельное значение выделяемой в зоне

взаимодействия колеса и рельса энергии существенно уменьшается. Следовательно, можно утверждать, что у приработанных профилей (т. е. у профилей, обеспечивающих конформный контакт) в зоне контакта количество выделяемого тепла будет существенно ниже, чем у новых профилей.

Анализируя формулу (4) легко заметить, что с уменьшением коэффициента условий контактирования K , относительной скорости скольжения $U_{ск}$, коэффициента трения f и увеличением площади контакта взаимодействующих поверхностей A температура в зоне контакта θ должна уменьшаться, а с увеличением уклона карьерного рельсового пути – повышаться.

Полученная с учетом данных, приведенных в табл. 3, зависимость температурного коэффициента k_y от уклона рельсового пути показана на рис. 2.

По рис. 2 можно получить функциональную зависимость аппроксимации k_y :

$$k_y = (i - 5)tg\alpha_{cp}, \tag{6}$$

где α_{cp} – среднее значение угла наклона аппроксимированного графика температурного коэффициента k_y , определенное методом наименьших квадратов.

Подставив в (3), получим

$$K_{гy} = [1 + (i - 5)tg\alpha_{cp}i]. \tag{7}$$

После преобразования имеем

$$K_{гy} = 1 + i^2tg\alpha_{cp} - 5itg\alpha_{cp}. \tag{8}$$

Таблица 2

Коэффициенты для расчета температуры в зоне контакта системы колесо–рельс

Table 2. Coefficients for calculating the temperature in the contact zone of wheel–rail system

P , кН	Вид профиля	$a \cdot 10^{-3}$, м	$A \cdot 10^{-4}$, м ²	K , Дж	a_1 , м ² /с	λ , Вт/(м·°С)
175	Приработанный	3,30	2,65	605	$11,9 \cdot 10^{-6}$	44,0

Таблица 3

Расчетные значения коэффициентов k_y и $K_{гy}$ по данным эксперимента

Table 3. Calculated values of the coefficients k_y and $K_{гy}$ according to the experimental data

Исходные данные		Данные экспериментов		Результат обработки данных	
$V_{дв}$, м/с(км/ч)	i , ‰	$U_{ск}$, ‰	θ , °С	$k_y \cdot 10^{-3}$	$K_{гy} = 1 + k_y i$
1,39 (5,0)	5,0	3,4	82,0	$\approx 0(0,05)$	1,0
1,39 (5,0)	25,0	7,8	195,0	1,5	1,0375
1,39 (5,0)	45,0	12,3	330,0	2,5	1,1125
2,78 (10)	5,0	5,6	191,0	$\approx 0(0,1)$	1,0
2,78 (10)	25,0	13,2	465,0	1,33	1,0333
2,78 (10)	45,0	17,5	650,0	2,13	1,0959

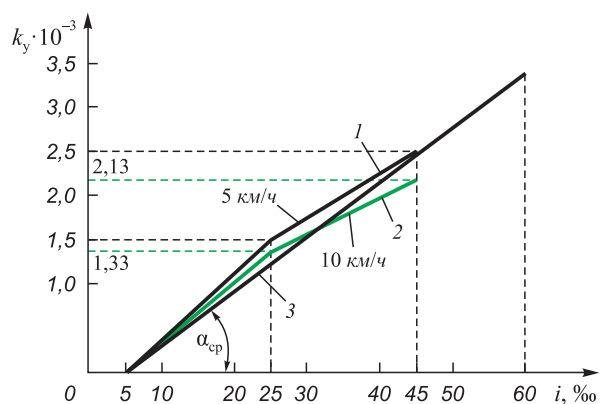


Рис. 2. Зависимости температурного коэффициента k_y от уклона рельсового пути:

1, 2 – экспериментальные; 3 – аппроксимированная

Fig. 2. Dependences of temperature coefficient k_y on the slope of the track:

1, 2 – experimental; 3 – approximated

С учетом результатов, полученных после обработки экспериментальных данных, можно определить величину тангенса угла α_{cp}

$$\operatorname{tg} \alpha_{cp} = 6,3 \cdot 10^{-5}; \alpha_{cp} = 0,0036^\circ. \quad (9)$$

Подставив значение (9) в (8), получим

$$K_{ry} = 1 + 6,5 \cdot 10^{-5} i^2 - 3,15 \cdot 10^{-4} i. \quad (10)$$

На рис. 3 приведены графики зависимости коэффициента K_{ry} от величины уклона рельсового пути.

Анализ результатов экспериментов, приведенных в табл. 3, при температурном пороге в 300 °С [8, 9] показывает, что разница при замене параболической функции на прямолинейную (см. рис. 3) составляет $\Delta K_{ry} = 0,5$, при этом погрешность составит не более 15 °С или 5 %.

В табл. 4 приведены значения теоретического (расчетного) и аппроксимированного коэффициентов K_{ry} и показана погрешность аппроксимации Δ .

В работах [10,11] показано, что при контактом взаимодействии пары колесо–рельс, сопровождаемом

Таблица 4

Значения теоретического и аппроксимированного коэффициентов K_{ry}

Table 4. Values of theoretical and approximated coefficients K_{ry}

$i, \%$	5	10	25	45	60
$K_{ry \text{ теор.}}$	1,00000	1,00315	1,03150	1,11340	1,20790
$K_{ry \text{ аппр.}}$	–	1,000	1,048	1,106	1,150
$\Delta, \%$	–	–0,315	+1,600	–0,660	–4,790

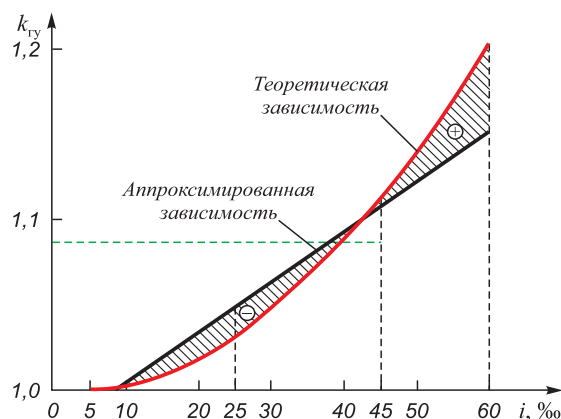


Рис. 3. Зависимости теоретического и аппроксимированного коэффициентов влияния горных условий K_{ry} от уклона карьерного рельсового пути

Fig. 3. Dependences of theoretical and approximated coefficients of the impact of mining conditions K_{ry} on the slope of career track

повышенными осевыми нагрузками, характерными для локомотивов, эксплуатируемых в условиях открытых горных работ, деформации выступов шероховатых поверхностей носят пластический характер. В связи с этим, номинальная площадь контакта взаимодействующих поверхностей, определяемых по формулам Герца-Беляева [4], принимается равной величине контурной площади [12].

С учетом результатов комплекса работ, проведенных рядом исследователей [13 – 16], и принимая во внимание результаты исследований структуры загрязнений карьерных рельсовых путей, приведенных в работах [17 – 19], а также исходя из критерия непревышения в зоне контакта колеса с рельсом температуры в 300 °С, полученного в работах [7, 8, 17], из формулы (2) можно определить допускаемые значения скорости проскальзывания $U_{ск}$ колес карьерных локомотивов

$$U_{ск} = \frac{\theta \lambda (2a)^{0,5} A}{0,0576 K K_{ry} f \sqrt{a_1 V_{дв}}}. \quad (11)$$

Значения температур, определенные по формуле (4) для уклонов в пределах $i = 0 - 10 \%$, приведены в табл. 5.

Сравнительные значения температуры в зоне контакта колеса с рельсом при осевой нагрузке $P = 270 \text{ кН}$ для уклонов 0 – 10 и 45 % при скорости локомотива 15 км/ч (4,17 м/с) приведены в табл. 6.

Как было отмечено выше, из табл. 6 следует, что с увеличением уклона рельсового пути температура в зоне контакта системы колесо–рельс также увеличивается. Очевидно, что допускаемая скорость пробуксовки тяговых колесных пар локомотива с приработанными профилями в условиях карьеров будет выше (табл. 7).

Результаты расчетов, приведенные в табл. 7, показывают, что новые профили рабочих поверхностей колеса

Величина температуры в зоне контакта колеса с рельсом при осевой нагрузке $P = 270$ кН для уклонов в пределах $i = 0 - 10$ ‰*

Table 5. Value of the temperature in the contact area of the wheel and the rail at axial load: $P = 270$ kN for drafts within $i = 0 - 10$ ‰**

$P, \text{кН}$		Профили новые															
		$a = 8,53 \cdot 10^{-3} \text{ м}; A = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; K = 2301 \text{ Дж}$															
$U_{\text{ск}}, \%$		$f = 0,1$				$f = 0,2$				$f = 0,3$				$f = 0,4$			
		2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
$V_{\text{дв}}, \text{м/с (км/ч)}$																	
1,39 (5)		94	188	281	375	188	375	563	750	281	563	844	1126	375	750	1126	1501
2,78 (10)		133	265	398	531	265	531	796	1061	398	796	1194	1592	531	1061	1592	2122
4,17 (15)		162	325	487	650	325	650	975	1300	487	975	1462	1949	650	1300	1949	2599
5,56 (20)		188	375	563	750	375	750	1126	1501	563	1126	1688	2251	750	1501	2251	3001
6,94 (25)		210	419	629	838	419	838	1257	1677	629	1257	1886	2515	838	1677	2515	3353
$P, \text{кН}$		Профили приработанные															
		$a = 4,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}; A = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; K = 1311 \text{ Дж}$															
$U_{\text{ск}}, \%$		$f = 0,1$				$f = 0,2$				$f = 0,3$				$f = 0,4$			
		2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
$V_{\text{дв}}, \text{м/с (км/ч)}$																	
1,39 (5)		36	73	109	145	73	145	218	290	109	218	326	435	145	290	435	580
2,78 (10)		51	103	154	205	103	205	308	410	154	308	462	616	205	410	616	821
4,17 (15)		63	126	188	251	126	251	377	503	188	377	565	754	251	503	754	1005
5,56 (20)		73	145	218	290	145	290	435	580	218	435	653	870	290	580	870	1161
6,94 (25)		81	162	243	324	162	324	486	648	243	486	729	973	324	648	973	1297

* Выделенные цветом участки показывают режимы эксплуатации локомотива, обеспечивающие неперевышение температуры в 300 °С.

** Highlighted areas indicate operating conditions of the engine for the non-exceedance of temperature of 300 °С.

и рельса, исходя из критерия неперевышения температуры в зоне контакта 300 °С для условий, характерных параметрам открытых горных работ, не обеспечивают рациональные условия эксплуатации. Например, при скорости 15 км/ч ($4,17$ м/с) и осевой нагрузке 270 кН для новых профилей при коэффициенте трения $0,2$ и уклоне 50 ‰ допускаемая скорость пробуксовки колесных пар локомотива составляет всего $1,69$ %. Это можно объяснить увеличением скорости пробуксовки, и, как следствие, увеличением количества выделяемого тепла на тяговых колесных парах локомотива в связи с уменьшением проекции сцепного веса локомотива на нормаль к плоскости рельсового пути. Для приработанных профилей, работающих в аналогичных условиях, допускаемая скорость пробуксовки составляет $4,36$ %, т.е. почти в $2,6$ раза больше.

На рис. 4 показаны графики зависимости допускаемой скорости пробуксовки от уклона рельсового пути при температуре 300 °С, скорости 15 км/ч и осевой нагрузке 270 кН для новых и приработанных профилей

колес карьерных локомотивов, построенные по формуле (11).

Изменение температуры в зоне контакта пары колесо–рельс от $U_{\text{ск}}$ при скорости движения 15 км/ч ($4,17$ м/с) для осевой нагрузки 270 кН при уклонах рельсового пути в пределах от 0 до 10 и 45 ‰ показано на рис. 5.

Результаты исследований, проведенных по разработанной методике, в зависимости от области интересов приняты к использованию на предприятиях ОАО «Ураласбест» и ООО «ЗУМК-Инжиниринг» (Группа предприятий Западно-Уральского концерна, Россия).

Выводы. Установлено, что величина руководящего уклона выездной траншеи влияет на изменение температуры в зоне контакта колеса карьерного локомотива с рельсом и характеризуется температурным коэффициентом уклона k_y .

Величина температурного коэффициента уклона k_y в интервале уклонов карьерных рельсовых путей от 0 до 10 ‰ равна $k_y = 0$. Определять температуру в

Таблица 6

Сравнительные значения температуры в зоне контакта колеса с рельсом

Table 6. Comparative values of the temperature in the contact area of the wheel and the rail

P, кН		Профили новые															
270		$a = 8,53 \cdot 10^{-3} \text{ м}; A = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; K = 2301 \text{ Дж}$															
		f = 0,1				f = 0,2				f = 0,3				f = 0,4			
$U_{\text{ск}}, \%$		2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
$V_{\text{дв}}, \text{ м/с}$																	
4,17	i = 0 – 10 ‰	162	325	487	650	325	650	975	1300	487	975	1462	1949	650	1300	1949	2599
	i = 45 ‰	198	401	602	803	355	803	1024	1606	595	1191	1786	2382	794	1588	2382	3176
P, кН		Профили приработанные															
270		$a = 4,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}; A = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; K = 1311 \text{ Дж}$															
		f = 0,1				f = 0,2				f = 0,3				f = 0,4			
$U_{\text{ск}}, \%$		2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8	2	4	6	8
$V_{\text{дв}}, \text{ м/с}$																	
4,17	i = 0 – 10 ‰	63	126	188	251	126	251	377	503	188	377	565	754	251	503	754	1005
	i = 45 ‰	68	136	203	271	135	271	406	542	206	412	618	824	275	550	825	1099

Таблица 7

Значения допускаемой скорости пробуксовки колесных пар локомотива $U_{\text{ск}}, \%$ при осевой нагрузке 270 кН

Table 7. Values of permissible speed of slipping of the locomotive wheel pairs $V_{\text{ск}}, \%$ at the axial load of 270 kN

P, кН		Профили новые											
270		$a_1 = 11,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \lambda = 44,0 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C}); a = 8,53 \cdot 10^{-3} \text{ м}; A = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; K = 2301 \text{ Дж}$											
f		0,1			0,2			0,3			0,4		
$i, \%$		10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50
$V_{\text{дв}}, \text{ м/с (км/ч)}$													
1,39 (5)		6,4	6,14	5,84	3,2	3,07	2,92	2,1	2,05	1,95	1,6	1,53	1,46
2,78 (10)		4,5	4,34	4,13	2,3	2,17	2,06	1,5	1,45	1,38	1,1	1,08	1,03
4,17 (15)		3,7	3,54	3,37	1,8	1,77	1,69	1,2	1,18	1,12	0,9	0,89	0,84
5,56 (20)		3,2	3,07	2,92	1,6	1,53	1,46	1,1	1,02	0,97	0,8	0,77	0,73
6,94 (25)		2,9	2,75	2,61	1,4	1,37	1,31	1,0	0,92	0,87	0,7	0,69	0,65
P, кН		Профили приработанные											
270		$a_1 = 11,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \lambda = 44,0 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C}); a = 4,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}; A = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; K = 1311 \text{ Дж}$											
f		0,1			0,2			0,3			0,4		
$i, \%$		10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50
$V_{\text{дв}}, \text{ м/с (км/ч)}$													
1,39 (5)		16,5	15,87	15,10	8,3	7,95	7,55	5,5	5,29	5,03	4,1	3,97	3,77
2,78 (10)		11,7	11,22	10,68	5,8	5,62	5,34	3,9	3,74	3,56	2,9	2,80	2,67
4,17 (15)		9,6	9,16	8,72	4,8	4,59	4,36	3,2	3,05	2,91	2,4	2,29	2,18
5,56 (20)		8,3	7,93	7,55	4,1	3,97	3,77	2,8	2,64	2,52	2,1	1,98	1,89
6,94 (25)		7,4	7,10	6,76	3,7	3,56	3,39	2,5	2,37	2,25	1,9	1,78	1,69

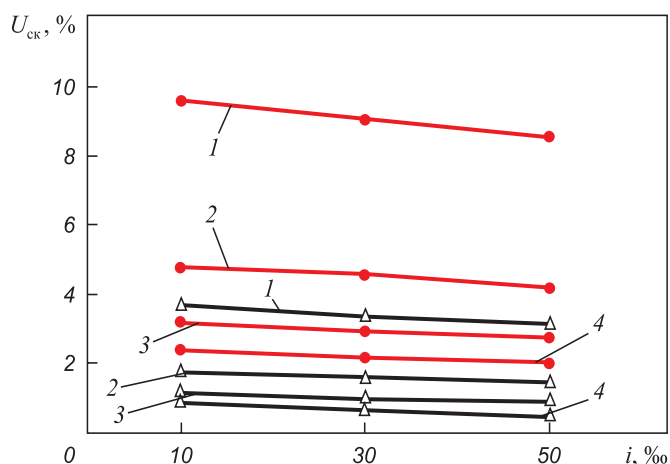


Рис. 4. Графики допускаемой скорости пробуксовки для новых и приработанных профилей колес локомотивов при температуре 300 °С, скорости 15 км/ч и осевой нагрузке 270 кН для диапазона коэффициентов трения f :

1 – 0,1; 2 – 0,2; 3 – 0,3; 4 – 0,4; Δ – новые профили; \bullet – приработанные профили

Fig. 4. Graphs of the permissible speed of slipping for new and worn-out locomotive wheel profiles at a temperature of 300 °C, speed of 15 km/h and an axial load of 270 kN for a range of friction coefficients f : 1 – 0.1; 2 – 0.2; 3 – 0.3; 4 – 0.4; Δ – new profiles; \bullet – run-profiles

зоне контакта системы колесо–рельс для условий открытых горных работ следует по формулам, рекомендованным для железных дорог общего пользования.

С увеличением уклона рельсового пути температура в зоне контакта системы колесо–рельс увеличивается.

Результаты расчетов, выполненных по предлагаемой методике, показывают удовлетворительную схо-

димость с результатами экспериментальных исследований. Погрешность аппроксимации коэффициента влияния горных условий КГУ в диапазоне от 25 до 45 % не превышает +5 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чичинадзе А.В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении. – М.: Наука, 1967. – 231с.
2. Флячинский К.П. Влияние условий взаимодействия колеса и рельса на фрикционные процессы в зоне контакта: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1993. – 175 с.
3. Андреев А.В. Транспортные машины и комплексы для открытой добычи полезных ископаемых. – М.: Недра, 1970. – 429 с.
4. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наукова думка, 1975. – 704 с.
5. Исследование контактной прочности рельсов и колес подвижного состава / Под общ. ред. С.В. Амелина // Тр. ЛИИЖТ. № 210. – Ленинград, 1963.
6. Электроподвижной состав промышленного транспорта: Справочник / Л.В. Баллон, М.Л. Браташ и др. – М.: Транспорт, 1987. – 296 с.
7. Керопян А.М., Бабичев Ю.Е. Универсальное устройство для мониторинга при эксплуатации процесса пробуксовки колес карьерного локомотива и выполнения мероприятий по ее снижению // Горное оборудование и электромеханика. 2015. № 2. С. 24 – 28.
8. Керопян А.М., Шахова К.И. Исследование влияния температуры и состава поверхностных загрязнений в зоне контакта колес карьерных локомотивов на их тяговую способность // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 9. С. 30 – 36.
9. Керопян А.М. Определение рациональных значений коэффициентов трения и шероховатостей рабочих поверхностей рельсов и бандажей локомотивов // Современные технологии в горном машиностроении: Сб. науч. труд. сем. (Москва, 27 – 31 янв. 2014 г.). – М., 2014. С. 344 – 352.
10. Керопян А.М. Условия обеспечения рациональных геометрических характеристик рабочих профилей пары колесо – рельс карьерных локомотивов // Фундаментальные исследования и

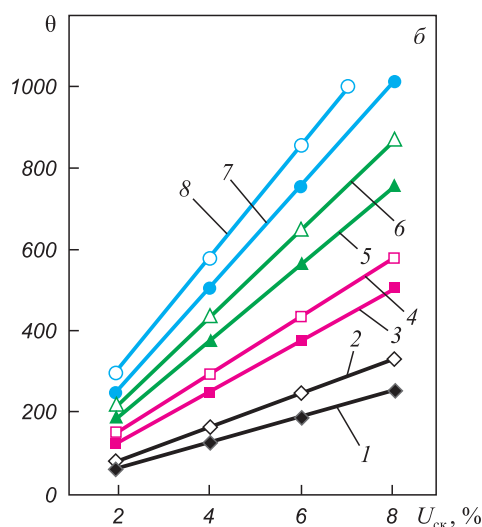
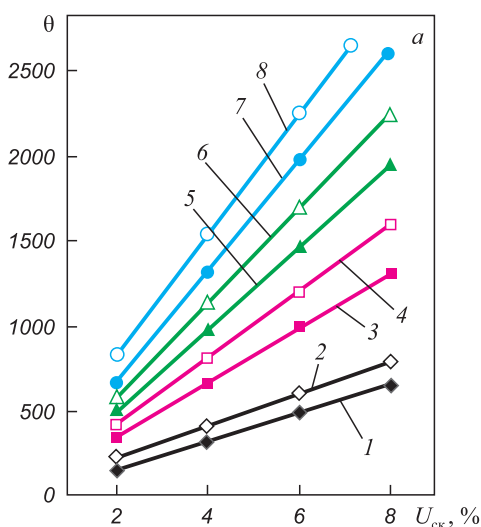


Рис. 5. Изменение температуры в зоне контакта пары колесо–рельс от $U_{ск}$ при скорости движения 15 км/ч для осевой нагрузки 270 кН при уклонах рельсового пути в пределах от 0 до 10 % и 45 % для новых (а) и приработанных (б) профилей:

1 – $f=0,1, i=10$; 2 – $f=0,1, i=45$; 3 – $f=0,2, i=10$; 4 – $f=0,2, i=45$; 5 – $f=0,3, i=10$; 6 – $f=0,3, i=45$; 7 – $f=0,4, i=10$; 8 – $f=0,4, i=45$

Fig. 5. Change of the temperature in the contact zone of wheel–rail pair from the $U_{ск}$ at a speed of 15 km/h for the axial load of 270 kN at the slope of the track in the range from 0 to 10 % and 45 % new (a) and worn-out (b) profiles:

1 – $f=0,1, i=10$; 2 – $f=0,1, i=45$; 3 – $f=0,2, i=10$; 4 – $f=0,2, i=45$; 5 – $f=0,3, i=10$; 6 – $f=0,3, i=45$; 7 – $f=0,4, i=10$; 8 – $f=0,4, i=45$

- инновационные технологии в машиностроении: Тр. III Междунар. науч. конф. (Москва, ИМАШ РАН, 13 – 15 мая 2014 г.). – М., 2014. С. 117 – 119.
11. Демкин Н.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. – М.: Наука, 1970. – 227 с.
 12. Справочное пособие по сопротивлению материалов / М.И. Рудицын и др. – Минск: Высшая школа, 1970. – 516 с.
 13. Лужнов Ю.М. Нанотрибология сцепления колес с рельсами. Реальность и возможности. – М.: Интекст, 2009. – 176 с.
 14. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. – М.: Глав. редак. физ.-мат. литературы, 1976. – 607 с.
 15. Протокол испытаний химического состава образца загрязнений поверхности железнодорожных рельсов Бородинского разреза СУЭК (г. Красноярск) №20572–12 от 27.12.2012 // Аналитический, сертификационный и эколого-аналитический центр «АНСЕРТЭКО» при Московском государственном институте стали и сплавов. – М., 2012.
 16. Gerasimova A. A., Radyuk A.G. The improvement of the surface quality of workpieces by coating // CIS Iron & Steel Review. 2014. P. 33 – 35.
 17. Керопян А.М. Развитие теории взаимодействия и обоснование рациональных параметров системы колесо-рельс карьерных локомотивов в режиме тяги: Дис. ... докт. тех. наук. – Екатеринбург, 2015. – 233 с.
 18. Keropyan A. M. Features of interaction of the traction wheels of an electric locomotive and a diesel locomotive with rails in the conditions of open mountain works // Journal of Friction and Wear. 2016. Vol. 37. No. 1. P. 78 – 84.
 19. Keropyan A. M., Gorbatyuk S.M. Impact of roughness of interacting surfaces of the wheel-rail pair on the coefficient of friction in their contact area // Procedia Engineering, 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016). 2016. Vol. 150. P. 406 – 410.

Поступила 6 декабря 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 5, pp. 355–363.

CONNECTION OF THE TEMPERATURE IN CONTACT AREA OF THE WHEEL-RAIL SYSTEM WITH THE RAILWAY SLOPE OF INDUSTRIAL RAILWAY TRANSPORT

A.M. Keropyan, A.A. Gerasimova

REFERENCES

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

Abstract. The effect of the guiding slope of the industrial railway track on the temperature in the contact area of the wheel of the career locomotive with the rail has been analyzed. As a result of theoretical and experimental studies it was found that the magnitude of the guiding slope of industrial railways affects a temperature change in the system wheel–rail of locomotives and is characterized by a temperature coefficient of the slope k_y . To determine the values of k_y on the mine locomotive of SCHÖMA model – 350 (Germany) the experimental studies were conducted at the enterprise of JSC “MOSMETRO-STROY” in the context of the mines under construction in the Moscow metro. The temperature and sliding velocity in the contact zone of the wheel–rail system was measured at different speeds and inclines of the track. It was found that with increasing of track slope the temperature in contact zone of the wheel – rail system increases. Therefore the permissible speed of slipping of traction wheel pairs of the locomotive with the profiled sections in the quarry conditions will be higher. It was also shown that the new profiles of the working surfaces of wheel and rail, based on the criterion of temperature increase in the contact zone of 300 °C for conditions characteristic for open mining parameters, do not provide rational operating conditions. Value of the temperature coefficient of the slope k_y in the interval of career track slope from 0 to 10 % is equal to $k_y = 0$. The necessity to determine the temperature in the contact zone of the wheel–rail system for conditions of open mining works according to the formulas recommended for railways of general use is shown. The results of calculations performed by the developed technique showed satisfactory convergence with the experimental results. The approximation error of the coefficient of the mining conditions impact K_{mc} in the range of 25 % to 45 % is less than 5 %. The results of studies carried out according to the developed methodology, depending on the area of interest, are accepted for use by the enterprises of OJSC Uralasbest and ZUMK-Engineering LLC (Zapadno-Uralsky Concern Group of Companies, Russia).

Keywords: industrial railway tracks, open pit mining operation, contact patch, temperature of wheel–rail system, guiding slope, temperature coefficient of slope, coefficient of mining conditions impact, mining locomotive, slip speed.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-5-355-363

1. Chichinadze A.V. *Raschet i issledovanie vneshnego treniya pri tormozhenii* [Calculation and investigation of external friction during braking] Moscow: Nauka, 1967, 231p. (In Russ.).
2. Flyachinskii K.P. *Vliyaniye uslovii vzaimodeystviya koleasa i rel'sa na friktsionnyye protsessy v zone kontakta: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Effect of interaction conditions of wheel and rail by frictional processes in the contact zone: Cand. Tech. Sci. Diss.]. Moscow: 1993, 175 p. (In Russ.).
3. Andreev A.V. *Transportnyye mashiny i kompleksy dlya otkrytoi dobychi poleznykh iskopaemykh* [Transport machines and complexes for coal mining]. Moscow: Nedra, 1970, 429 p. (In Russ.).
4. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook on materials strength]. Kiev: Naukova dumka, 1975, 704 p. (In Russ.).
5. *Issledovanie kontaktnoi prochnosti rel'sov i koleas podvizhnogo sastava* [Study of the contact strength of rails and rolling stock wheels]. Amelin S.V. ed. Trudy LIIZhT, no. 210, Leningrad, 1963. (In Russ.).
6. Ballon L.V., Bratash M.L. etc. *Elektropodvizhnoi sostav promyshlennogo transporta: spravochnik* [Electric stock for industrial transport. Reference book]. Moscow: Transport, 1987, 296 p. (In Russ.).
7. Keropyan A.M., Babichev Yu.E. Universal device for monitoring of wheels slipping of the career locomotive and execution of measures for its reduction. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2015, no. 2, pp. 24–28. (In Russ.).
8. Keropyan A.M., Shakhova K.I. Study of the influence of temperature and composition of surface contamination in the contact zone of the wheels of mining locomotives for their traction ability. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2013, no. 9, pp. 30–36. (In Russ.).
9. Keropyan A.M. Determination of rational values of the coefficients of friction and roughness of the working surfaces of rails and ties of locomotives. In: *Sovremennyye tekhnologii v gornom mashinostroyenii: sb. nauch. trud. sem. (Moskva 27 – 31 yanv. 2014 g.)* [Modern technology in mining engineering: collection of scientific works (Moscow 27 – 31 Jan. 2014)]. Moscow: 2014, pp. 344–352. (In Russ.).
10. Keropyan A.M. Conditions to ensure the rational geometric characteristics of the working profiles of the pair wheel – rail of career locomotives. In: *Fundamental'nye issledovaniya i innovatsionnyye tekhnologii v mashinostroyenii: nauch. trudy III Mezhdunarodnoi nauch. konf. (Moskva, IMASH RAN, 13-15 maya 2014 g.)* [Fundamental research and innovative technologies in machine building: scientific works of the 3rd International Scientific Conference (Moscow, IMASH RAN, 13-15 May 2014 g.)].

- mental research and innovative technologies in mechanical engineering: Sci. proceedings of the III Int. Sci. Conf. (Moscow, IMASH RAN, 13-15 may 2014)]. Moscow: 2014, pp. 117–119. (In Russ.).
11. Demkin N.B. *Kontaktirovanie sherokhovatykh poverkhnostei* [Contacting of rough surfaces]. Moscow: Nauka, 1970, 227 p. (In Russ.).
 12. Ruditsyn M.I. etc. *Spravochnoe posobie po soprotivleniyu materialov* [Handbook on strength of materials]. Minsk: Vysshaya shkola, 1970, 516 p.
 13. Luzhnov Yu.M. *Nanotribologiya stsepleniya koles s rel'sami. Real'nost' i vozmozhnosti* [Nanotribology of coupling of wheels with rails. Reality and opportunities]. Moscow: Intekst, 2009, 176 p. (In Russ.).
 14. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: Glav. redakts. fiz.-mat. literatury, 1976, 607 p. (In Russ.).
 15. *Protokol ispytaniy khimicheskogo sostava obraztza zagryazneniy poverkhnosti zheleznodorozhnykh rel'sov Borodinskogo razreza SUEK (g. Krasnoyarsk) no. 20572–12 ot 27.12.2012* [Test report of the chemical composition of sample surface contamination of rails of SUEK Borodino section (Krasnoyarsk, no. 20572–12, 27.12.2012)]. Moscow: Analiticheskii, sertifikatsionnyi i ekologo – analiticheskii tsentr “ANSERTEKO” pri Moskovskom gosudarstvennom institute stali i splavov, 2012. (In Russ.).
 16. Gerasimova A.A., Radyuk A.G. The improvement of the surface quality of workpieces by coating. *CIS Iron & Steel Review*. 2014, pp. 33–35.
 17. Keropyan A.M. *Razvitie teorii vzaimodeistviya i obosnovanie ratsional'nykh parametrov sistemy koleso-rel's kar'ernykh lokomotivov v rezhime tyagi: dis. ... dokt. tekh. nauk* [Development of the theory of interaction and justification of rational parameters of the wheel-rail system of career locomotives in the traction mode: Dr. Tech. Sci. Diss.]. Ekaterinburg, 2015, 233 p. (In Russ.).
 18. Keropyan A. M. Features of interaction of the traction wheels of a electric locomotive and a diesel locomotive with rails in the conditions of open mountain works. *Journal of Friction and Wear*. 2016, vol. 37, no. 1, pp. 78–84.
 19. Keropyan A. M., Gorbatyuk S.M. Impact of roughness of interacting surfaces of the wheel – rail pair on the coefficient of friction in their contact area. In: *Procedia Engineering, 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)*, 2016, vol. 150, pp. 406–410.

Information about the authors:

A.M. Keropyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Engineering of Technological Equipment”

A.A. Gerasimova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Academic Secretary of the Chair “Engineering of Technological Equipment”
(allochka@rambler.ru)

Received December 6, 2016