

УДК 620.178.3

Л. А. СОСНОВСКИЙ, доктор технических наук, В. В. КОМИССАРОВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, С. А. ТЮРИН, кандидат технических наук, ОАО «Гомсельмаш», Гомель

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕНИЯ ПРИ КАЧЕНИИ

Изучено влияние степени проскальзывания λ , варьируемой в диапазоне от 0 до 80 %, на изменение коэффициента сопротивления качению f_r при трении без смазки и со смазочным материалом. Установлено, что функция $f_r(\lambda)$ имеет резкий скачок значений f_r при $\lambda = 3...5\%$ (в 10 и более раз). Показано, что максимальное значение коэффициента сопротивления качению наблюдается при степени проскальзывания порядка 15 %, а затем снижается до двух раз при $\lambda > 60\%$. Рассмотрены особенности изменения температуры в зоне контакта. При трении со смазочным материалом влияние проскальзывания на изменение коэффициента сопротивления качению и сближения осей не обнаруживается.

Введение. Наиболее ответственные системы контактного взаимодействия, такие как зубчатые передачи, система колесо / рельс, подшипники качения и некоторые другие, работают при качении с проскальзыванием. Имеются работы [1–18], в которых в той или иной степени затронуты вопросы влияния проскальзывания на изменения сопротивления контактной усталости, износа, коэффициента трения и т.п.

В работе [1] представлены результаты исследования влияния степени проскальзывания на величину коэффициента трения при испытаниях роликов из колесной и рельсовой сталей (контактное давление 1500 МПа, скорость вращения роликов 400 об/мин) для различных условий – без смазки (1), с водой (2), со смазкой (3), влажные листья (4), сухие листья (5) в зоне контакта (рисунок 1).

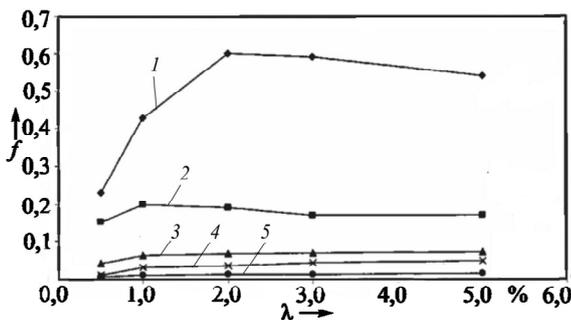


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента трения от степени проскальзывания при различных условиях лабораторных испытаний [1]

Авторы работы [1] сделали заключение, что коэффициент трения значительно зависит от условий трения. Так, при сухом трении его значение выше, чем при использовании смазки или наличии воды в зоне контакта, примерно на 30...90 %.

В таблице 1 дан сравнительный анализ величин коэффициента трения для пары трения колесо / рельс [1–5].

В работах [6, 7] исследовано влияние степени про-

скальзывания от 0 до 12 % на коэффициент трения при испытаниях роликов из колесной и рельсовой сталей для различных модификаторов трения (рисунок 2). Условия испытаний: скорость вращения образцов – 40 км/ч; контактная нагрузка – 3,5 кН; максимальное контактное давление – 672 МПа.

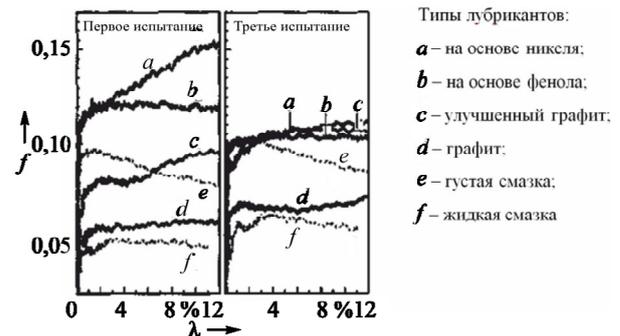


Рисунок 2 – Влияние природы смазочного материала на зависимость коэффициента трения от степени проскальзывания [6, 7]

В работе [8] изучено влияние степени проскальзывания на коэффициент трения для пары колесо / рельс в натуральных условиях в зависимости от условий испытаний (рисунок 3): белые ромбы показывают условия без смазки, белые треугольники – испытания с водой, черные круги – с использованием модификатора трения, крестики – со смазкой.

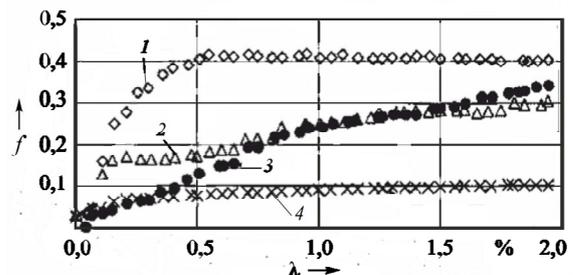


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента трения от степени проскальзывания при натуральных испытаниях пары колесо / рельс [8]

Таблица 1 – Сопоставление коэффициентов трения, полученных различными методами

Источник	Схема испытаний	Нагрузка / контактное давление	Скорость качения, км/ч	Условия испытаний	Максимум коэффициента трения	Степень проскальзывания при максимальном коэффициенте трения, %	Установившийся коэффициент трения (степень проскальзывания 5 %)
[1]	Два ролика	1500 МПа/ 7.7 кН	3,54	Без смазки	0,6	2	0,54
			3,54	Вода	0,2	1	0,17
			3,54	Смазка	0,07	1	0,06
[2]	С использованием реальной тележки	44 кН	10–70	Без смазки	0,57–0,5	2	0,57–0,5
		67 кН	10–70	Без смазки	0,55–0,44	1-2	0,52–0,44
		44 кН	120–240	Вода	0,13–0,07	0,5–1	0,12–0,065
		67 кН	80–240	Вода	0,11–0,05	0,5–1	0,105–0,05
		67 кН	140–300	Смазка	0,055–0,045	1	0,052–0,044
[3]		135 кН	140–300	Смазка	0,05–0,04	1	0,048–0,037
[4]	Трибоаилер (испытания в натуральных условиях)	Нет данных	Нет данных	Без смазки	0,52	1	0,5
	Трибометр	Нет данных	Нет данных	Без смазки	0,7	2–5	0,7
[5]	Испытания на экспериментальном пути в реальных условиях	Нет данных	Нет данных	Без смазки	Величина коэффициента трения 0,2–0,4		
				Вода	Величина коэффициента трения 0,05–0,2		
				Смазка	Величина коэффициента трения 0,05–0,07		
				Листья	Величина коэффициента трения 0,025–0,10		
[1]	Два ролика	1500 МПа/ 7,7 кН	3,54	Без смазки	0,6	2	0,54
			3,54	Вода	0,2	1	0,17
			3,54	Смазка	0,07	1	0,06

В [9] отмечено, что сцепление колес с рельсами осуществляется за счет сил трения, основу которых, согласно [11], составляют адгезионные связи, под которыми понимают молекулярные связи – от прочных металлических до слабых Ван-дер-Ваальсовых. Процесс трения рассматривается как непрерывное формирование и разрушение фрикционных связей, при этом учитывается и вклад механической составляющей – за счет механического зацепления микронеровностей или при наличии абразивных частиц. Д. П. Марков в работах [9, 12, 16] развивает фоновую теорию трения, согласно которой силы трения создаются на атомарном уровне. В подтверждение этой теории в [9] приводятся зависимости коэффициента трения от твердости колесно-рельсовых роликов при различной степени проскальзывания (рисунок 4).

Автор [9] заключает, что при любом соотношении твердостей колесно-рельсовых роликов коэффициент трения (величина сцепления) фактически не зависит от твердости и шероховатости, а обусловлен уровнем загрязненности поверхности.

В [9, 13] представлена методика определения коэффициента трения и построены зависимости коэффициен-

та трения от степени проскальзывания, полученные в лабораторных условиях для роликов из колесно-рельсовых сталей (рисунок 5). Условия испытаний: нагрузка – 1000 Н; скорости вращения нижнего ролика – 300 и 1000 об/мин, верхнего ролика – 270 и 900 об/мин; ширина роликов – 6–10 мм; максимальное контактное давление по Герцу – 560–800 МПа; без смазки.

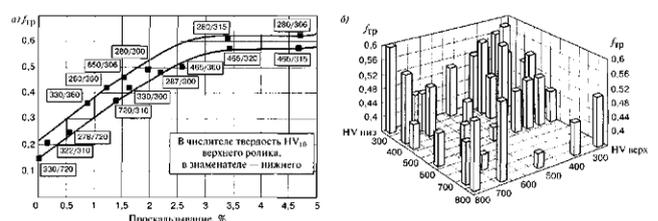


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента трения от твердости колесных и рельсовых роликов при проскальзывании 0–5 % (а) и при чистом скольжении (б) [9]

Кривые 1 и 2 на рисунке 5 имеют характерный горб в начале кривой, который исчезает на закаленных роликах (кривая 3), а также при повторных испытаниях на тех же образцах. При уменьшении проскальзывания зависимость

коэффициента трения от времени снижается и растягивается во времени. Значения, наиболее близкие к эксплуатационным, коэффициент трения принимает после перехода через горб, обусловленный процессами деформационного упрочнения.

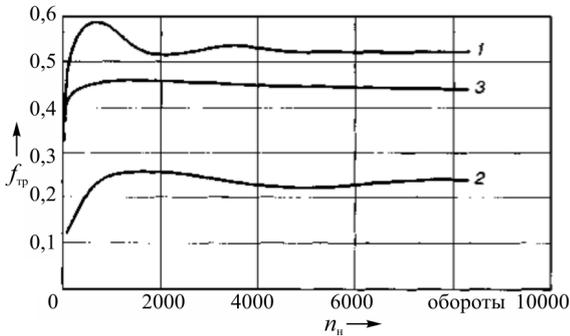


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента трения от степени проскальзывания [13]:

- 1 – ролики не обработанные, степень проскальзывания 2,6 %;
- 2 – то же, степень проскальзывания 0,15 %;
- 3 – закаленные ролики, степень проскальзывания 1,5 %

В целом проанализированные исследования проведены применительно к различным типоразмерам и материалам испытываемых пар трения, как правило, в ограниченном диапазоне изменения проскальзывания от 0 до 5 % (иногда до 40 %). При этом отмечается, что критическое проскальзывание, соответствующее максимальному коэффициенту трения, варьируется от 0,2 до 5 %, а дальше с ростом коэффициента проскальзывания остается почти неизменяемым до чистого скольжения.

В этой связи целью данной работы являлось изучение влияния степени проскальзывания до 80 % на характеристики трения, т.е. начиная от чистого качения и заканчивая практически чистым скольжением. Тем самым, представляемые результаты обеспечат возможность установить вид функциональной зависимости коэффициента сопротивления качению от степени проскальзывания в изучаемом диапазоне.

Изучение влияния проскальзывания в паре трения было проведено без смазки и при наличии смазочного материала.

Методика эксперимента. Испытания по изучению закономерностей влияния проскальзывания на изменение характеристик трения при качении проведены по схеме, представленной на рисунке 6.

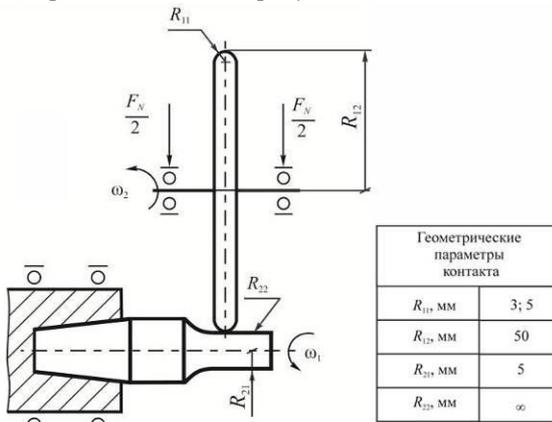


Рисунок 6 – Схема испытаний

При испытаниях вал, закрепленный в шпинделе испытательной машины, вращается с угловой скоростью ω_1 . К рабочей зоне вала контактной нагрузкой F_N прижимается контрообразец (ролик), который вращается с угловой скоростью ω_2 . Испытания проводили на машине для износоустойчивых испытаний СИ-03М при частоте 3000 мин⁻¹ и нормальной температуре и влажности окружающей среды в соответствии с ГОСТ 15150–69. Параметры испытательной машины удовлетворяли всем требованиям стандарта ГОСТ 30755–2001 [19]. Испытания проводились без смазочного материала и со смазкой каплевым способом маслом марки ТАД-17 И. В качестве моментомера применен прецизионный и высокоточный датчик T10F фирмы Hottinger Baldwin Messtechnik, который предназначен для измерения динамических крутящих моментов на вращающихся валах и не содержит подшипников и токосъемных колец. В результате фрикционное и тепловое влияние на подшипниках исключено. Погрешность измерения момента трения составляет 0,1 %. Схема измерения момента трения приведена на рисунке 7.

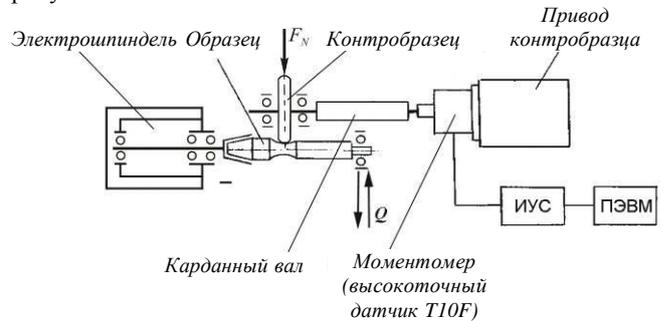


Рисунок 7 – Измерение момента трения на испытательной машине СИ-03М

Испытуемые пары трения образец/контрообразец были изготовлены из сталей 25ХГТ, 18ХГТ и чугуна ВЧТГ. При испытаниях реализовали следующее сочетание исследуемых материалов: сталь 18ХГТ/сталь 18ХГТ, сталь 25ХГТ/сталь 25ХГТ, чугун ВЧТГ/сталь 25ХГТ, чугун ВЧТГ/чугун ВЧТГ.

По измеренным значениям момента трения рассчитывали коэффициент сопротивления качению по формуле

$$f_r = \frac{M_T}{F_N R_{12}}, \quad (1)$$

где M_T – момент трения, Н·м; F_N – контактная нагрузка, Н; $R_{12} = 50 \text{ мм} = 0,05 \text{ м}$ – радиус контрообразца (ролика).

При испытаниях на машине СИ-03 обеспечивается полная автоматизация измерения и регистрации изучаемых параметров. Величину коэффициента проскальзывания вычисляли по формуле

$$\lambda = \left(1 - \frac{\omega_2 R_{12}}{\omega_1 R_{21}} \right) \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где ω_1, ω_2 – частота вращения, об/мин и R_{21}, R_{12} – радиусы, мм, соответственно, образца и контрообразца. Регистрируются значения контактной и изгибной нагрузок, время проведения испытаний, количество циклов нагружения образца, величина сближения осей пары трения и уровень вибрации.

Проверка биения посадочного места под образец

производится при помощи индикаторной головки модели 05101, устанавливаемой на станине стенда посредством штатива ШМ-ПН-8 при вращении вала вручную. Биение посадочного диаметра вала шпинделя не должно превышать 0,05 мм.

Определение погрешности задания коэффициента проскальзывания производится путем программного изменения его величины и соответствующим измерением частот вращения образца и контробразца. Определение погрешности производится в точках 0; 25 %; 50 %; 75 % при заданной частоте вращения привода образца 3000 об/мин и составляет не более 2 % от измеряемого значения.

Определение погрешности измерения момента трения проводится с помощью образцовых гирь 4-го разряда ГОСТ 1328–82.

В работе применена методика испытаний при многоступенчатом нагружении, в соответствии с СТБ 1233–2000 [20].

Результаты испытаний и их обсуждение. Испытания по изучению влияния проскальзывания на изменение характеристик трения были проведены при постоянной контактной нагрузке (рисунок 8) $F_N = 124$ Н (контактные напряжения $p_0 = 2000$ МПа). В процессе эксперимента производилось автоматическое ступенчатое (14 ступеней) изменение величины коэффициента проскальзывания. Продолжительность ступени при постоянном проскальзывании составляло 10 мин (см. рисунок 8). Данные испытания были проведены без смазочного материала и с использованием смазки маслом марки ТАД-17 И, которая подавалась в зону контакта капельным способом.

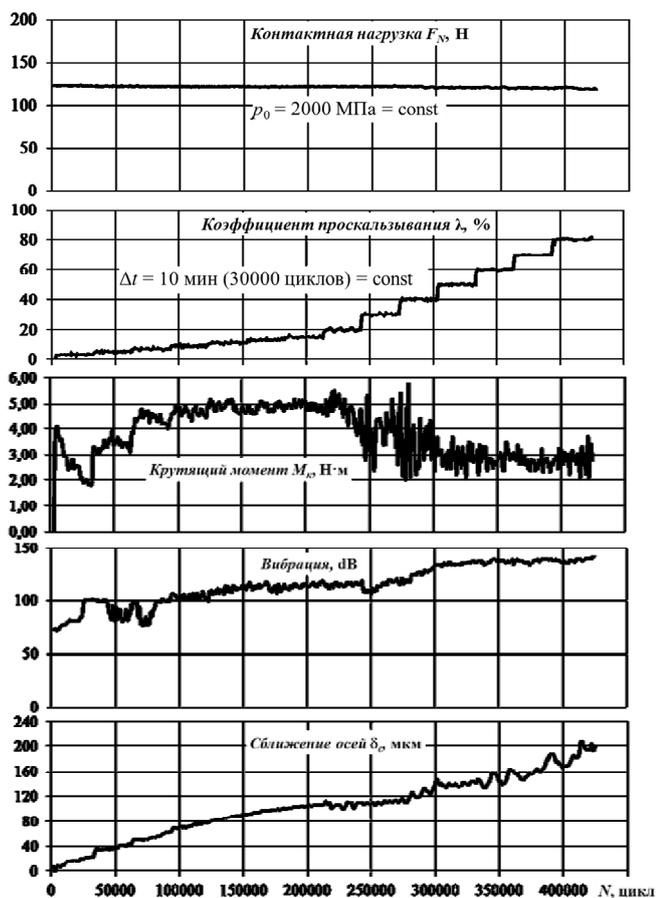


Рисунок 8 – Пример протокола испытаний

В процессе испытаний измерялась величина крутящего момента, сближения осей и общей вибрации в системе в зависимости от количества циклов (см. рисунок 8).

Анализ представленного протокола показывает, что при трении без смазки крутящий момент зависит от количества циклов следующим образом: сначала происходит его повышение, а затем – снижение. Максимальное значение крутящего момента (~5,6 Н·м) наблюдается, как правило, на седьмой ступени изменения проскальзывания (15 %) (при среднем значении количества циклов). При этом для данных условий испытаний с увеличением количества циклов имеет место постоянное повышение сближения осей и вибрации.

С целью изучения особенностей влияния проскальзывания на процессы трения были построены зависимости коэффициента сопротивления качению от коэффициента проскальзывания на ступени (рисунок 9), с указанием области рассеяния и средних значений на ступени при постоянном проскальзывании; осреднение выполняли по 40 точкам.

Анализ рисунков 9–13 показывает, что для различных сочетаниях материалов испытываемых пар трения наблюдается одна общая закономерность: с ростом степени проскальзывания до 15–20 % происходит резкое увеличение коэффициента сопротивления качению до величины 0,55–0,65. Дальнейшее увеличение степени проскальзывания до 80 % приводит к снижению коэффициента сопротивления качению до величины 0,3–0,4.

Изменение сближения осей и общей вибрации в зависимости от коэффициента проскальзывания при трении без смазки носит тот же характер и имеет те же закономерности, как и от количества циклов.

Следует отметить, что наибольший разброс данных при испытаниях наблюдается при сочетании материалов пары трения чугун ВЧТГ/чугун ВЧТГ. По-видимому, это связано с тем, что в данном случае в зоне контакта в определенные моменты времени появляется достаточно большое количество графита, приводящее к резкому снижению величины коэффициента сопротивления качению.

Проведенные тепловизионные исследования при данных испытаниях (рисунки 14–15) показали, что с ростом степени проскальзывания до 60 % происходит возрастание температуры до 97 °С, а затем она незначительно снижается до 80–85 °С при проскальзывании 80 %, и резко снижается при остановке испытаний.

В этой связи можно предположить, что возрастание коэффициента сопротивления качению на начальной стадии обусловлено процессами деформационного упрочнения (обмятием микровыступов, наклепом, формированием характерного рельефа и т.п.), а последующее снижение реализуется за счет развития поверхностной пластической деформации.

При трении со смазкой основные характеристики трения от коэффициента проскальзывания не зависят. Можно отметить только некоторые особенности: средний коэффициент сопротивления качению с увеличением коэффициента проскальзывания сначала возрастает до степени проскальзывания 7–10 %, а затем снижается и остается неизменным.

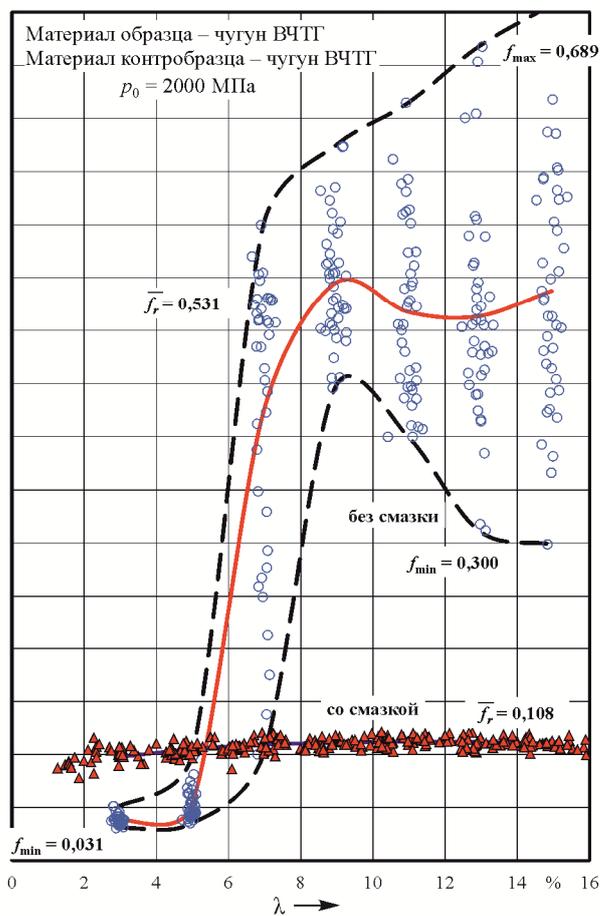
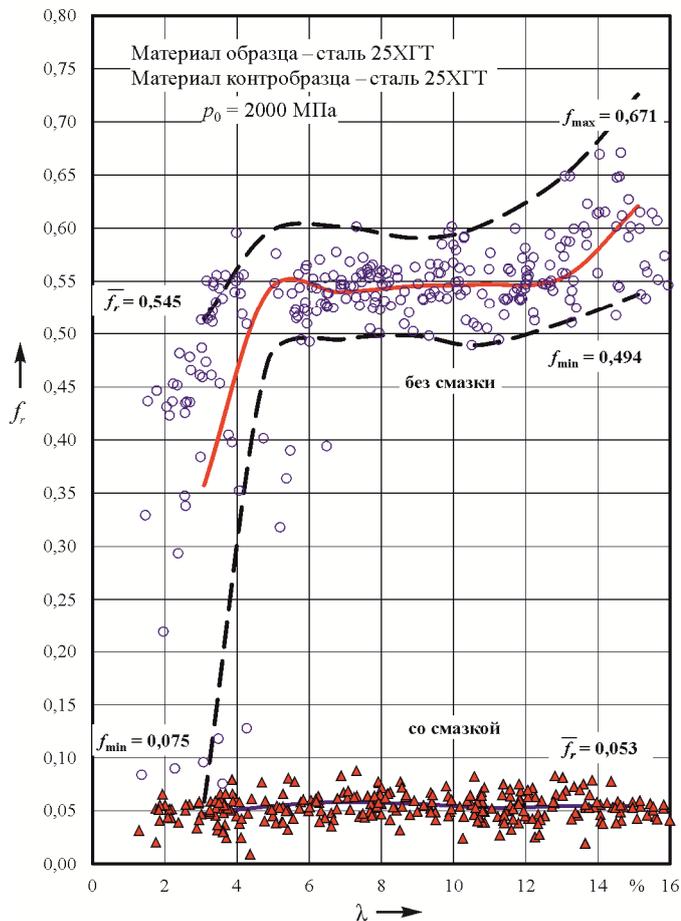
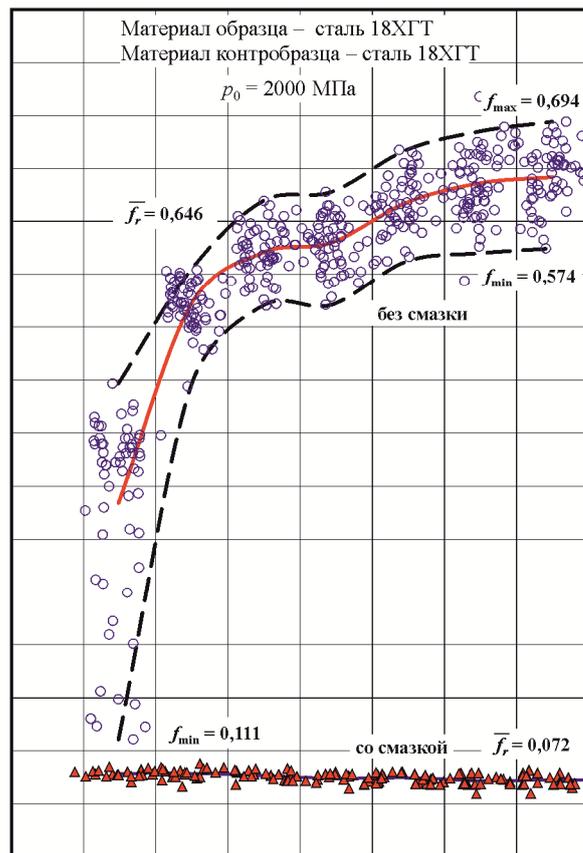
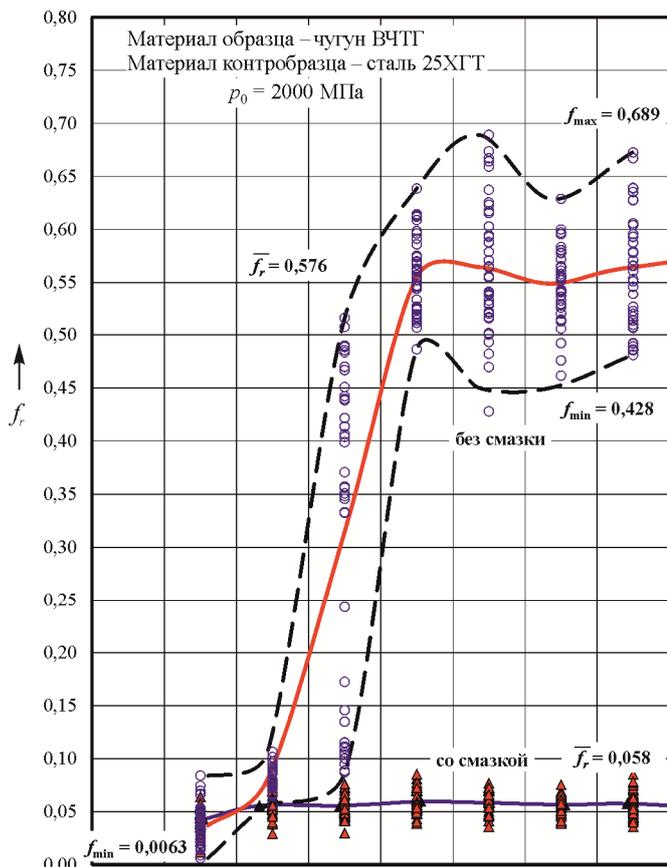


Рисунок 9 – Влияние степени проскальзывания в диапазоне 0–16 % на коэффициент сопротивления качению

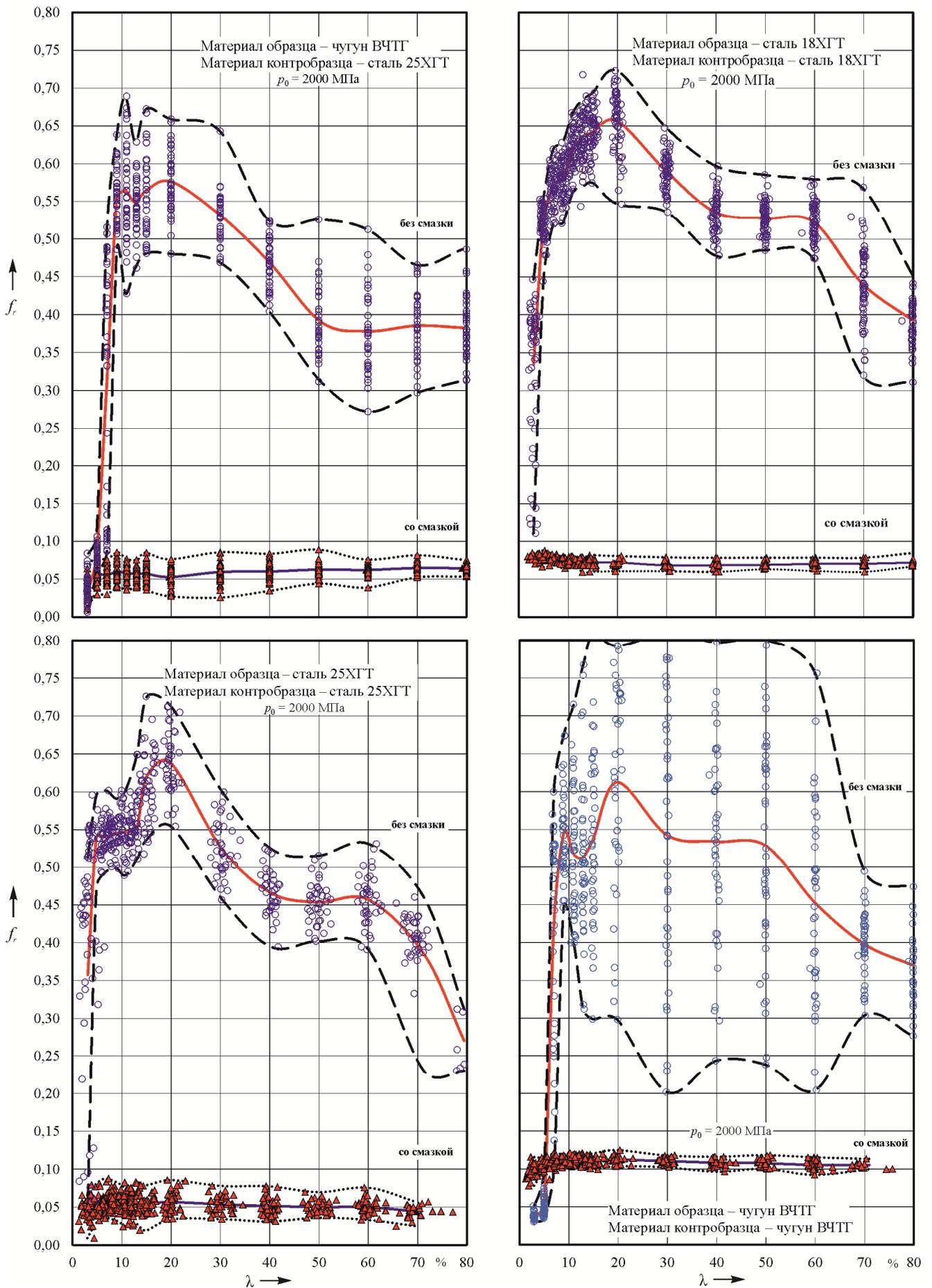


Рисунок 10 – Влияние степени проскальзывания на коэффициент сопротивления качению

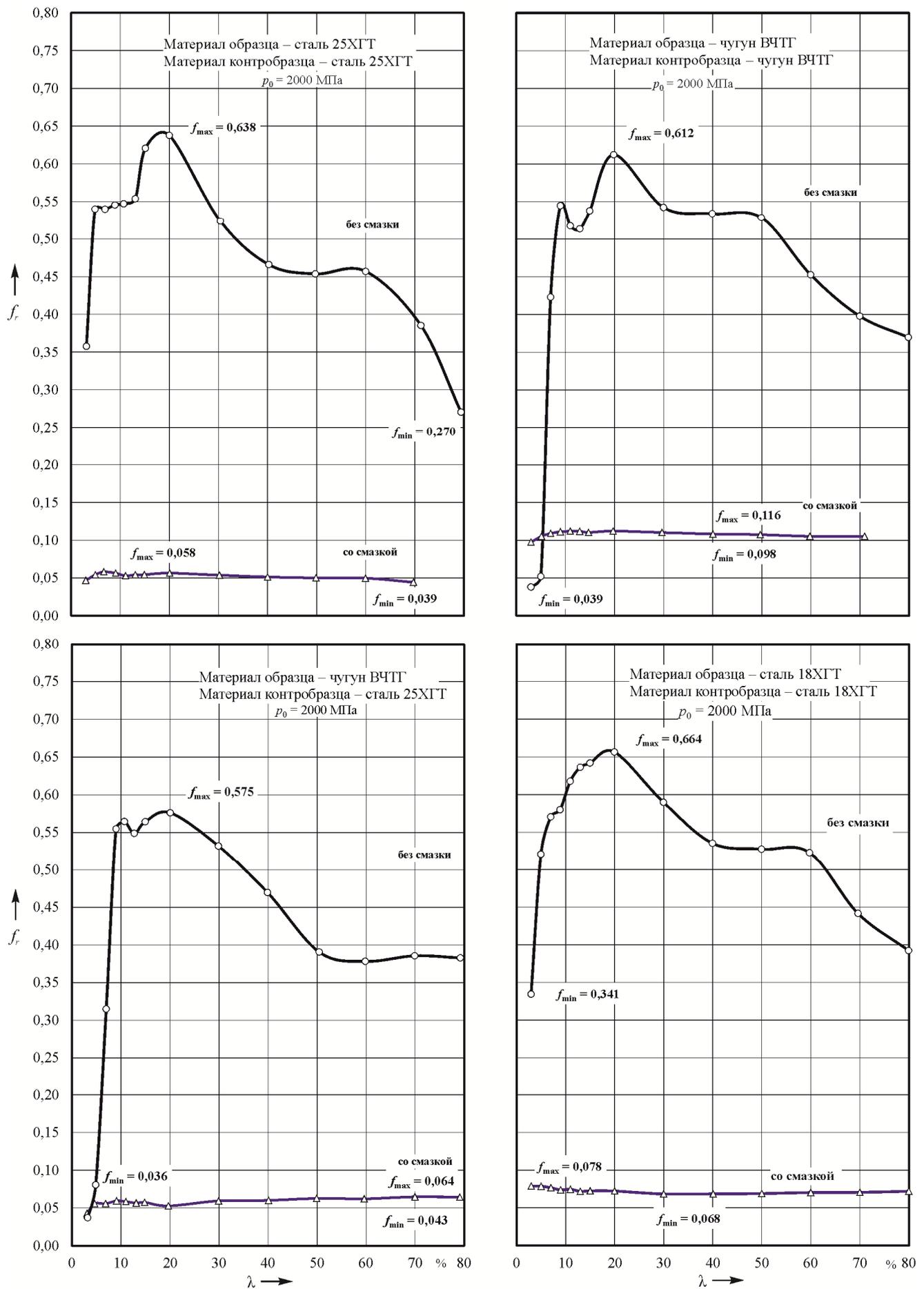


Рисунок 11 – Влияние степени проскальзывания на средний коэффициент сопротивления качению при трении без смазки и со смазкой

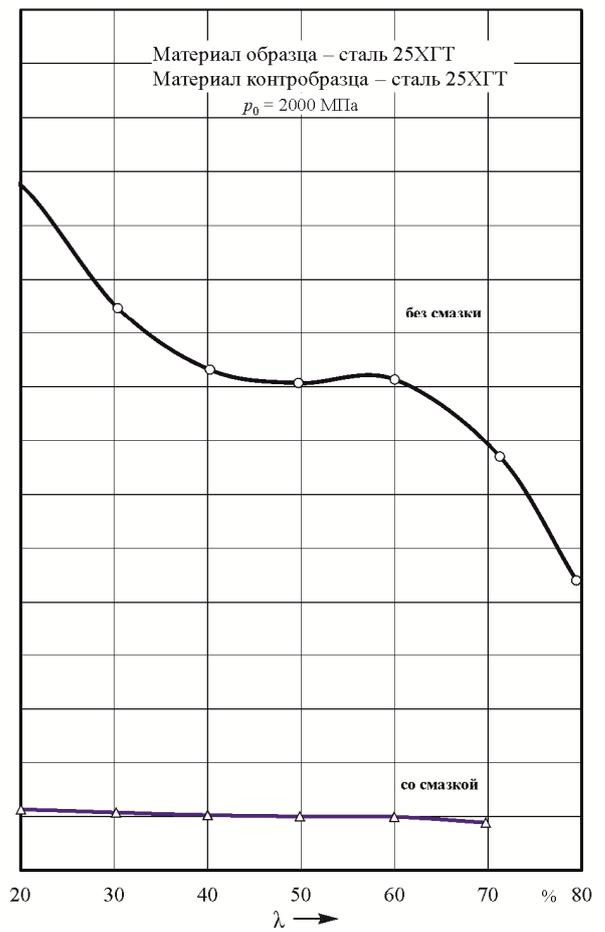
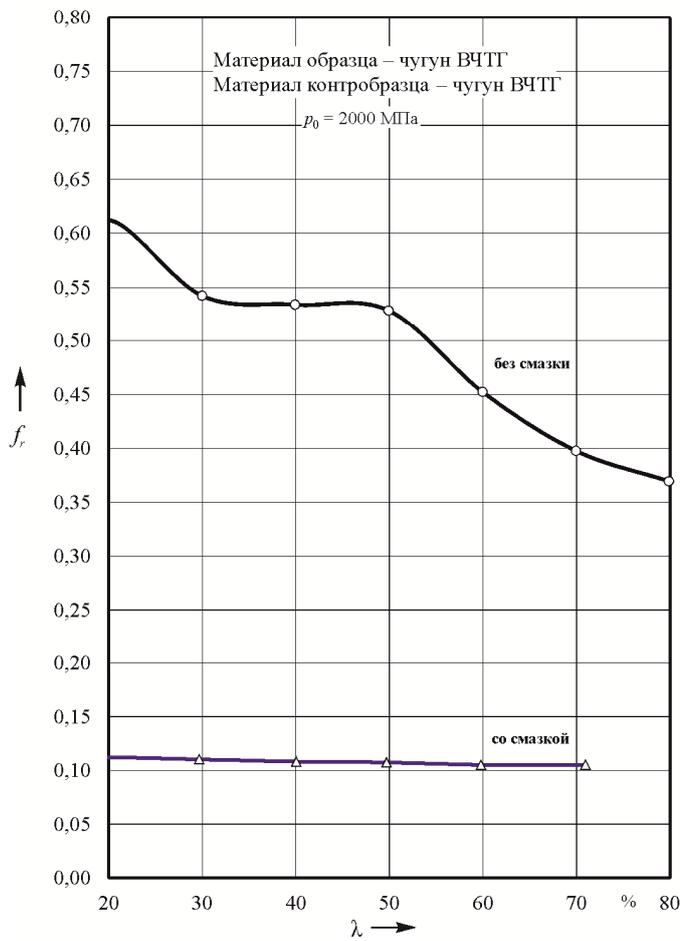
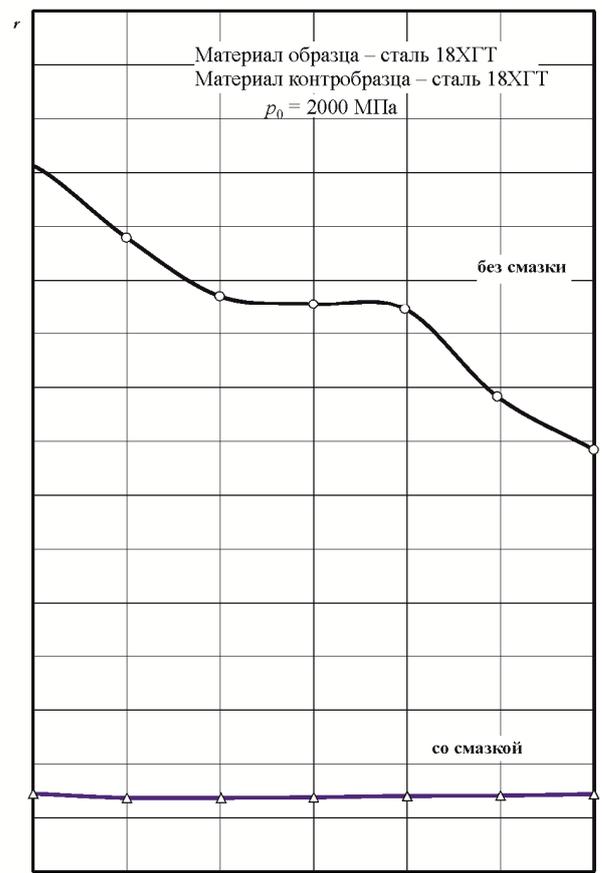
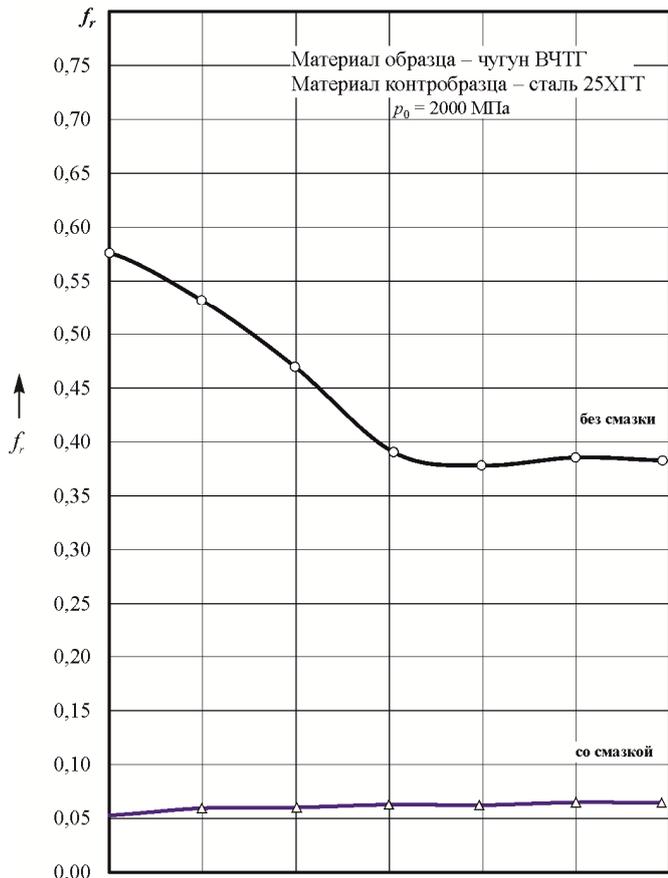


Рисунок 12 – Обработка результатов испытаний

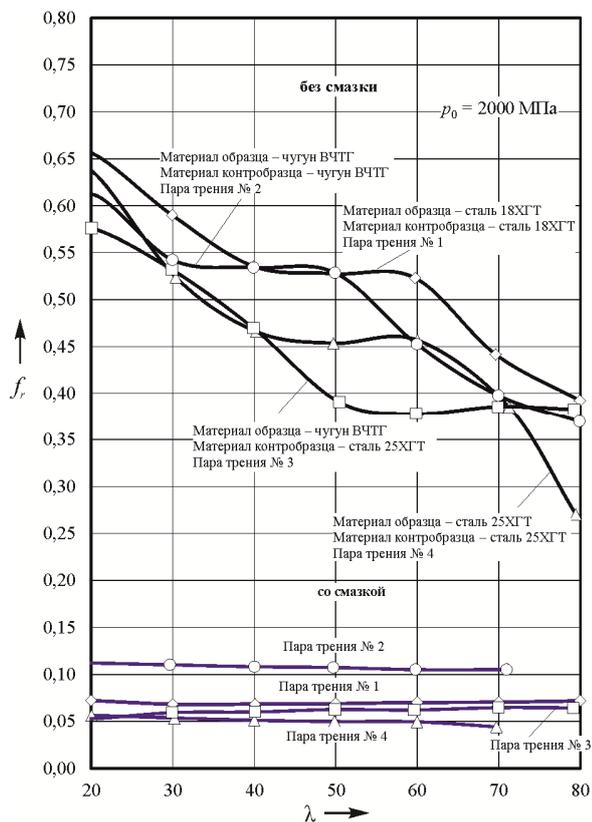


Рисунок 13 – Влияние степени проскальзывания λ на f

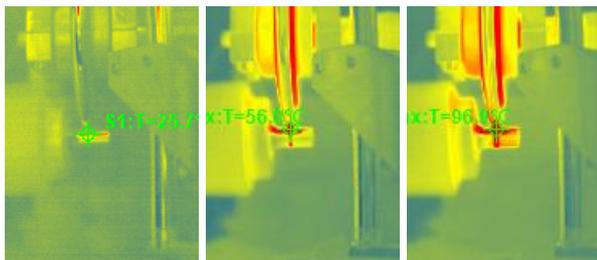


Рисунок 14 – Изменение температуры с ростом степени проскальзывания

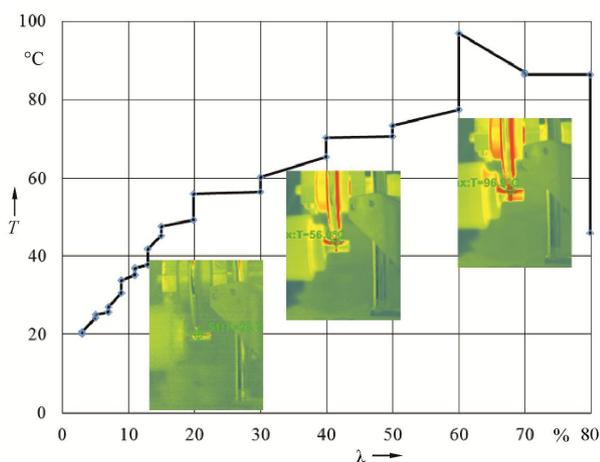


Рисунок 15 – Зависимость температуры в зоне контакта от степени проскальзывания

Заключение. В работе разработана методика испытаний по влиянию проскальзывания на изменение характеристик трения и представлены результаты, полученные по данной методике, для пары трения сталь

25ХГТ/сталь25ХГТ. Установлено, что степень проскальзывания существенно изменяет коэффициент сопротивления качению в паре трения без смазочного материала. При изменении степени проскальзывания в широком диапазоне от 0 до 80 % максимальное значение коэффициента сопротивления качению (0,85) наблюдается при степени проскальзывания порядка 15 %, а затем снижается до двух раз (0,44). При трении со смазочным материалом влияние проскальзывания на изменение коэффициента сопротивления качению не обнаруживается. Также на коэффициент сопротивления качению не влияет время на ступени при постоянном проскальзывании.

Закономерность изменения сближения осей пары трения при трении без смазки вследствие влияния проскальзывания является следующей: чем больше проскальзывание, тем больше сближение осей. При этом изменение сближения осей тем больше, чем больше время на ступени при постоянном проскальзывании. Так, при $\Delta t = 1$ мин сближение осей возрастает от 0 до 20 мкм, при $\Delta t = 5$ мин – от 0 до 160 мкм, а при $\Delta t = 10$ мин – от 0 до 200 мкм.

Влияния проскальзывания и времени на ступени при постоянном проскальзывании на сближение осей при трении со смазкой в условиях проведенного эксперимента не обнаружено.

Список литературы

- 1 Gallardo-Hernandez, E. A. Twin disc Assessment of wheel/rail adhesion / E. A. Gallardo-Hernandez, R. Lewis // Proceedings of 7th international conference on contact mechanics and wear of rail/wheel systems. – Brisbane, 2006. – V. 2. – P. 311–319.
- 2 Zhang, W. / W. Zhang, J. Chen, X. Wu // Wear. – 2002. – V. 253. – P. 82–83.
- 3 Jin, X. S. / X. S. Jin, W. H. Zhang, J. Zeng // Journal of Engineering Tribology. – 2004. – V. 218 (1). – P. 293–303.
- 4 Harrison, H. / H. Harrison, T. McCanney, J. Cotter // Wear. – 2002. – Vol. 253. – P. 114–123.
- 5 Nagese, K. / K. Nagese // Journal of Rail and Rapid Transit. – 1989. – V. 203. – P. 33–43.
- 6 Effect of moderating friction of wheel/rail interface on vehicle/track dynamic behavior / M. Ishida [et al.] // Proceedings of 7th international conference on contact mechanics and wear of rail/wheel systems. – Brisbane, 2006. – V. 1. – P. 227–233.
- 7 Experiments of adhesion between wheel and rail with twin-disk rolling contact testing machine / T. Ban [et al.] // RTTI report. – 2001. – V. 15. – № 4. – P. 45–50.
- 8 Field studies of the effect of friction modifiers on short pitch corrugation generation / D. T. Eadie [et al.] // Proceedings of 7th international conference on contact mechanics and wear of rail/wheel systems. – Brisbane, 2006. – V. 1. – P. 235–243.
- 9 Марков, Д. П. Коэффициенты трения и сцепления при взаимодействии колес с рельсами / Д. П. Марков // Вестник ВНИИЖТ. – 2005. – № 4. – С. 3–9.
- 10 Марков, Д. П. Механизмы сцепления пары колесо – рельс с учетом фоновго трения / Д. П. Марков // Вестник ВНИИЖТ. – 2003. – № 6. – С. 34–39.
- 11 Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под ред. А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 2001. – 664 с.
- 12 Марков, Д. П. Фононное трение / Д. П. Марков // Трение и износ. – 2002. – Т. 23. – № 6. – С. 597–606.
- 13 Марков, Д. П. Взаимосвязь коэффициента трения с проскальзыванием в условиях взаимодействия колеса и рельса / Д. П. Марков // Вестник ВНИИЖТ. – 2003. – № 3. – С. 31–33.

- 14 **Марков, Д. П.** Взаимосвязь коэффициента трения с проскальзыванием в условиях взаимодействия колеса с рельсом / Д. П. Марков // Вестник ВНИИЖТ. – 2003. – № 3. – С. 31–33.
- 15 **Носков, М. М.** Влияние проскальзывания на контактную выносливость рельсовой стали / М. М. Носков, Т. В. Ларин // Вестник ВНИИЖТ. – 1968. – № 2. – С. 23–25.
- 16 **Марков, Д. П.** Трибология и ее применение на железнодорожном транспорте / Д. П. Марков. – М. : Интекст, 2007. – 408 с.
- 17 **Марков, Д. П.** Зависимость коэффициента трения от проскальзывания: упругий или пластический крип? / Д. П. Марков // Трение и износ. – 2003. – Т. 24. – № 4. – С. 391–395.
- 18 **Трубин, Г. К.** Контактная усталость материалов для зубчатых колес / Г. К. Трубин. – М. : Машгиз, 1962. – 404 с.
- 19 Трибофатика. Машины для износоусталостных испытаний. Общие технические требования : ГОСТ 30755–2001. – Введ. 2002–07–01. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2002. – 8 с.
- 20 Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость : СТБ 1233–2000. – Введ. 2000–01–01. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2007. – 8 с.
- 21 **Сосновский, Л. А.** Механика износоусталостного повреждения / Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2007. – 434 с.

Получено 10.04.2016

L. A. Sosnovskiy, V. V. Komissarov, S. A. Tyrin. Experimental analysis of the influence of slippage on the friction characteristics for rolling.

The effect of the slip rate λ , ranging in a wide range from 0 to 80 %, the change in rolling resistance f_r friction coefficient of metal / metal friction pair without lubrication and with lubricant. The features of temperature changes in the contact zone. It is shown that the maximum value of the rolling resistance coefficient of the slip rate is observed at about 15 %, and then reduced to twice. When rubbing the lubricant influence on the change in the slip coefficient of rolling resistance and the convergence of the axes can not be detected.