

УДК 621. 8. 053.8

А. М. Керопян, к.т.н., доц., Московский государственный горный университет

E-mail: am_kerop@mail.ru

Определение рациональных значений коэффициентов трения и шероховатостей рабочих поверхностей рельсов и бандажей локомотивов

Выполнены теоретические и практические исследования условий взаимодействия рабочих поверхностей бандажей карьерных локомотивов с рельсами и определены рациональные значения шероховатостей при профилировке рельсов с целью сокращения продолжительности процесса приработки пары колесо – рельс, что влияет на увеличение сроков эффективной эксплуатации карьерного железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: коэффициент трения, шероховатость поверхности рельсов и бандажей локомотивов, комплексный показатель шероховатости, параметры опорной кривой, радиус кривизны вершин неровностей, рациональная шероховатость.

А.М. Keropyan

Determination of Rational Values of the Coefficients of Friction and Roughness of the Surfaces of Rails and Ties Locomotives

Theoretical and practical study of the conditions of interaction work surfaces bandages career locomotives and rail roughness defined rational values when profiling rails to reduce the length of the process of running a pair of wheel - rail, which affects the increase in terms of the efficient operation of rail transport career.

Keywords: coefficient of friction, surface roughness of rails and ties locomotives, comprehensive indicator of roughness parameters reference curve, the radius of curvature of the asperity, rational roughness.

Многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что коэффициент трения между взаимодействующими поверхностями зависит от многих физикомеханических свойств контактирующих поверхностей и, в том числе, от их шероховатости [1,4,7,10,11,20].

Для удобства оценки влияния шероховатости поверхностей в литературе [1] вводится понятие комплексного показателя шероховатости Δ :

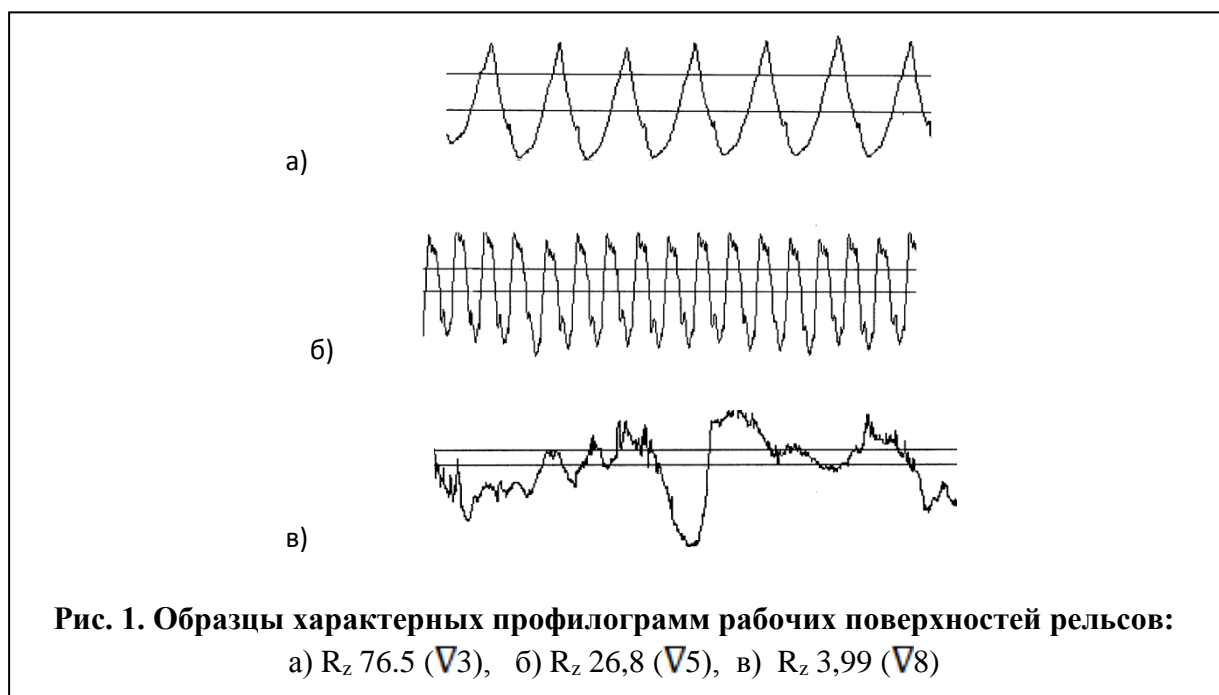
$$\Delta = \frac{h_{\max}}{Rb^{\nu}} \quad (1)$$

где R — расчетный радиус кривизны вершин неровностей, определяемый как среднее геометрическое радиусов кривизны вершин неровностей профилограмм рабочих поверхностей в продольном и поперечном направлениях, $R = \sqrt{r_{\text{прод}} \cdot r_{\text{поп}}}$; h_{\max} — высота наибольшей неровности; b и ν — параметры опорной кривой шероховатой поверхности.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями, выполненными в работах [8, 20], установлено, что при контактировании шероховатых поверхностей выступы более твердой поверхности внедряются в поверхность с меньшей твердостью. Учитывая, что твердость рельсовой стали несколько выше, чем твердость материала бандажа, дальнейшие исследования можно проводить на образцах рельсовой стали [8, 20].

С целью уточнения расчетных значений коэффициентов трения при взаимодействии колеса локомотива с рельсом при разных значениях степени их изношенности нами были подготовлены профилограммы образцов поверхностей катания головок рельсов R65, изъятых из эксплуатации при замене верхнего строения пути на разрезе Бородинский компании СУЭК (г.Красноярск). Запись профилограмм производилась на профилометре мод. 130, ст. точности 1, ТУ 3943-001-7028127 по методике завода изготовителя, изложенной в паспорте 130.0.01-ПС.

Образцы характерных профилограмм приведены на рис. 1.



Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Кл. чистоты	R _z ,мкм	R _a ,мкм	h _{max}	R,мкм	b	ν	Δ	Примечания
∇1	320	-	380	16,23	0,62	1,6	1,45	Минимальная шероховатость (по ГОСТ 2789-73)
∇3	76,5	12,5	94	214,24	0,89	1,629	4,7·10 ⁻¹	Новые профили
∇5	26,8	3,2	28,2	1070	0,94	1,228	2,85·10 ⁻²	Рациональная шероховатость.
∇8	3,99	0,78	4,55	1899	1,78	1,83	1,8·10 ⁻³	Прираб.профили
∇10	1,322	0,367	2,015	2284	1,3	1,34	0,73·10 ⁻³	Прираб.профили

Параметры R, b и ν рассчитаны по методике, приведенной в [20].

Многочисленными исследованиями установлено, что контакт реальных шероховатых поверхностей носит дискретный характер, обусловленный взаимодействием отдельных выступов микронеровностей. Силу трения на каждом выступе контактирующих профилей согласно [1, 10,12.] можно представить в виде двух слагаемых

$$F_i = F_{i \text{ мол}} + F_{i \text{ мех}} \quad (2)$$

где $F_{i \text{ мол}}$ – молекулярная составляющая силы трения, $F_{i \text{ мех}}$ – механическая составляющая силы трения.

Согласно [19, 20] расположение выступов в зоне контакта носит случайный характер и соответствует нормальному закону распределения. При этом, равнодействующая F сил трения в зоне контакта будет равна сумме сил, действующих на единичных неровностях

$$F = \Sigma F_i = \Sigma F_{i \text{ мол}} + \Sigma F_{i \text{ мех}} \quad (3)$$

Таким образом, суммарная сила трения зависит от фактической площади касания контактирующих поверхностей.

Ряд исследователей [11, 14] утверждают, что с увеличением нагрузки коэффициент трения уменьшается, в других работах [9,13] отмечается с увеличением нагрузки его возрастание. Следует отметить, что авторы всех упомянутых работ правы, так как всё зависит от величины шероховатости контактирующих поверхностей и условий контактного взаимодействия поверхностей.

Как было отмечено выше, шероховатость поверхности характеризуется комплексным показателем шероховатости Δ. При малых значениях комплексного показателя, т.е. при высоком классе чистоты поверхностей, доминирующим фактором является молекулярная

составляющая силы трения. В зоне контакта преобладают упругие деформации [1], в связи с чем механическая составляющая сил трения мала по сравнению с молекулярной составляющей и составляет около 5% от суммарного коэффициента трения [4,с.68]. При увеличении Δ в зоне контакта превалируют пластические деформации [1], и, как следствие, молекулярная составляющая сил трения уменьшается, и основной коэффициент трения обеспечивается за счет механической, или как еще называют, деформационной составляющей сил трения. **Кроме того, следует отметить, что близкие по классу чистоты, но разные по технологической обработке (различная величина Δ) поверхности, имеют различные значения коэффициента трения [4,с.93].**

В зависимости от показателя Δ , контурной нагрузки p_c и физикомеханических свойств контактирующих материалов (μ - коэффициента Пуассона, $\mu=0,3$; E – модуля упругости, $E = 2,1 \cdot 10^5$) в литературе [1] приведены формулы для определения характера деформации в зоне контакта:

- для упругого ненасыщенного контакта

$$0 \leq \frac{p_c(1-\mu^2)}{E} \leq 6 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta^{1/2} \quad (4)$$

-для упругого насыщенного контакта

$$6,0 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta^{1/2} \leq \frac{p_c(1-\mu^2)}{E} \quad (5)$$

-для пластического насыщенного контакта

$$0,0625 \leq p_c / HB \leq 0,32\alpha HB \quad (6)$$

где α - коэффициент гистерезисных потерь при одноосном растяжении (сжатии). Для закаленной стали $\alpha = 0,02$ [1,с.30].

Контурная нагрузка определяется формулой

$$p_c = N/A_c \quad (7)$$

где N – нагрузка, приходящаяся на одно колесо локомотива, Н; A_c – контурная площадь контакта колеса с рельсом. По экспериментальным данным [6] для нагрузки 135 000 Н (при осевой нагрузке 270000 Н, характерной для условий работы карьерных локомотивов) $A_c = 390 \text{ мм}^2$, тогда $p_c = 346,2 \text{ Н/мм}^2$.

Выполненные нами расчеты показали, что для класса чистоты поверхности $\nabla 7$ и выше деформации носят упругий ненасыщенный характер (формула (4)), а для грубо обработанных поверхностей чистотой

У5 и ниже взаимодействие имеет признаки, свойственные пластическому насыщенному контакту, согласно формуле (6). Поэтому коэффициенты трения для упругого ненасыщенного контакта и пластического насыщенного контакта, соответственно, определяются приведенными ниже формулами [1]

$$f_1 = \frac{2,4\tau_0(1-\mu^2)^{0,8}}{p_c^{0,2}\Delta^{0,4}E^{0,8}} + \beta + 0,24\alpha_{\phi}p_c^{0,2}\Delta^{0,4}\left(\frac{1-\mu^2}{E}\right)^{0,2} \quad (8)$$

$$f_2 = \tau_0/HV + \beta + 0,9\Delta^{1/2}(p_c/HV)^{1/2} \quad (9)$$

где τ_0 — тангенциальная прочность на срез адгезионной связи*; β — пьезокоэффициент молекулярной составляющей трения [1,с.205], характеризующий увеличение прочности на срез от нормального давления [1,с.279]; $\alpha_{\phi} \approx 2,5\alpha$ - коэффициент гистерезисных потерь при скольжении неровности, $\alpha = 0,02$ [1,с.29-30];

Коэффициенты τ_0 и β определяются экспериментальными исследованиями. Для грубых стальных поверхностей - $\tau_0 = 129,6$ МПа (пластический контакт), для чистых - $\tau_0 = 840$ МПа (упругий контакт), $\beta = 0,072$ [1(с.6, с.30), 7, 15, 16, 17, 21]; p_c —контурное давление; E — модуль упругости материала; μ — коэффициент Пуассона; HV —твердость материала.

Следует отметить, что при высокой чистоте (малой шероховатости) взаимодействующих поверхностей коэффициент трения повышается за счет увеличения молекулярной составляющей в связи с повышением прочности адгезионной связи.

Анализ формулы (8) позволяет установить, что для ненасыщенного упругого контакта при увеличении p_c и комплексного показателя шероховатости Δ молекулярная составляющая коэффициента трения уменьшается, что является подтверждением мнения авторов [11,14].

Здесь следует отметить, что последнее слагаемое в (8) характеризует механическую (деформационную) составляющую коэффициента трения, которой для материалов с высоким модулем упругости, например для металлов, можно пренебречь [4,с.30].

*) Под тангенциальной прочностью адгезионной связи понимаются контактные касательные напряжения, обусловленные молекулярным взаимодействием в зонах фактического касания. [18, с.53]

Из формулы (9) следует, что для пластического насыщенного контакта при увеличении контурного давления и комплексного показателя

шероховатости коэффициент трения увеличивается, что подтверждает правоту авторов работ [9,13].

Из выполненного исследования можно сделать вывод, что при высоких классах чистоты поверхности, т.е. при низкой шероховатости, с увеличением осевой нагрузки на колеса локомотивов коэффициент трения, и, следовательно, коэффициент сцепления, будут уменьшаться, а при контактировании грубо обработанных поверхностей - с увеличением осевой нагрузки коэффициент трения, а значит и коэффициент сцепления, будут увеличиваться.

Для определения характера изменения коэффициента трения для диапазона шероховатостей рабочих поверхностей системы колесо – рельс рассчитаем по формулам (8) и (9) их значения. Результаты расчетов приведены в табл.2.

Таблица 2

Класс чистоты	Коэффициент трения f		Фактич. площ. контакта, мм ²	Тип контакта	Комплекс. показатель	Тип профиля
	HВ380	HВ450				
∇1	*)	*)	-	-	1,45	-
∇3	0,996	0,731	119	Пластический насыщенный	$4,7 \cdot 10^{-1}$	Новый
∇5	0,558	0,492	239	Пластический насыщенный	$2,85 \cdot 10^{-2}$	Приработанный, обр.срац. шерох.
∇8	0,478	0,478	66**	Упругий нена-сыщенный	$1,8 \cdot 10^{-3}$	Приработанный
∇10	0,581	0,581	-	Упругий нена-сыщенный	$0,73 \cdot 10^{-3}$	Приработанный

*) При данной шероховатости, реализация контакта нецелесообразна вследствие значительных локальных напряжений в зоне взаимодействия бандажа с рельсом.

***) С увеличением класса чистоты поверхности, увеличиваются радиусы кривизны вершин шероховатостей и, как следствие, увеличивается шаг неровностей, при этом количество контактирующих точек, приходящееся на единицу контурной площади, уменьшается, вследствие этого – уменьшается фактическая площадь контакта. Это подтверждается в работе [22].

На рис. 2 показана зависимость изменения коэффициента трения от комплексного критерия шероховатости Δ при осевой нагрузке 270 кН, характерной для карьерного железнодорожного транспорта. Анализ зависимости изменения $f_{от} \Delta$ показывает, что при переходе от упругого контакта (зона АВ) к пластическому (зона ВС) коэффициент трения переходит через минимум (точка В). Точка В графика является точкой экстремума функции f , что соответствует минимальному значению коэффициента трения f_{min} , и, следовательно, коэффициента сцепления колеса локомотива с рельсом.

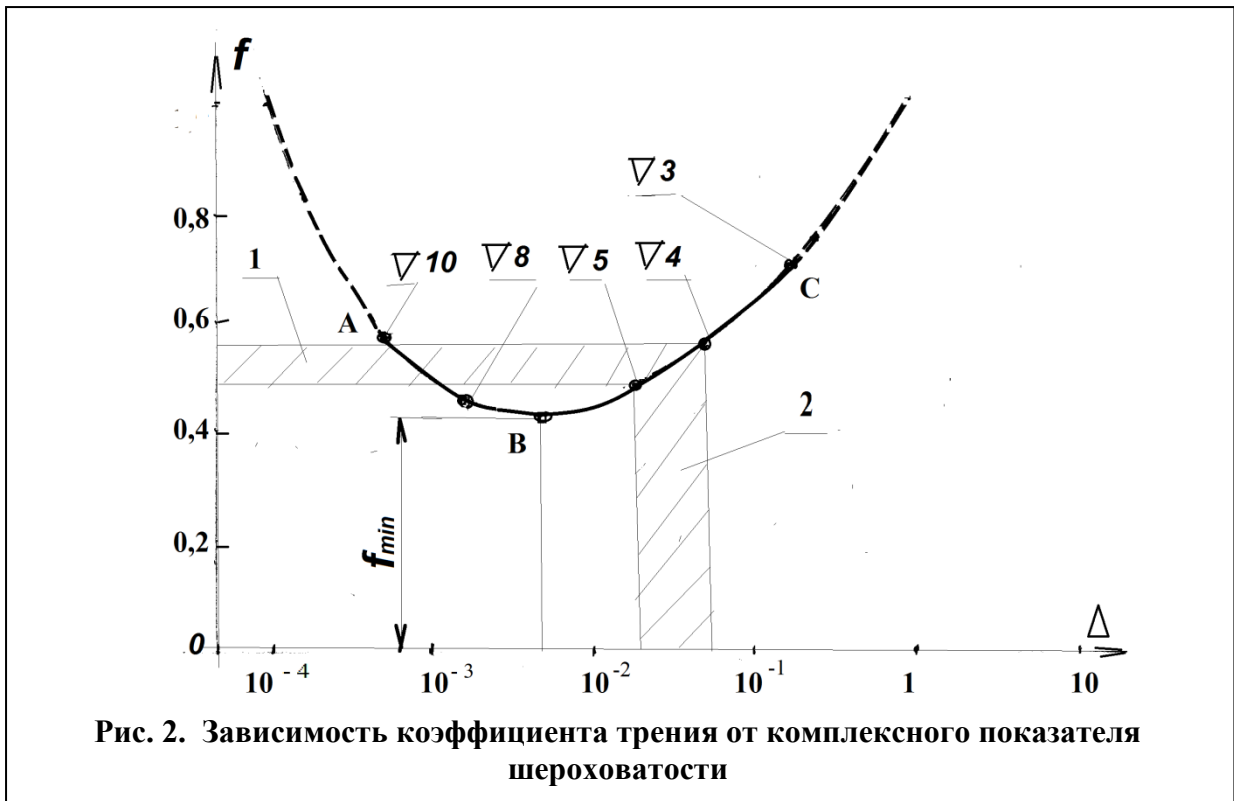
В машиностроении при проектировании узлов трения для уменьшения износа и увеличения долговечности, например – подшипников

скольжения, основным критерием является минимизация коэффициента трения. Многочисленными исследованиями установлено, что по окончании приработки при неизменных условиях работы на взаимодействующих поверхностях устанавливается одинаковая, **равновесная**, шероховатость, не зависящая от величины и характера первоначальной, а зависящая от условий изнашивания [18,с.342].

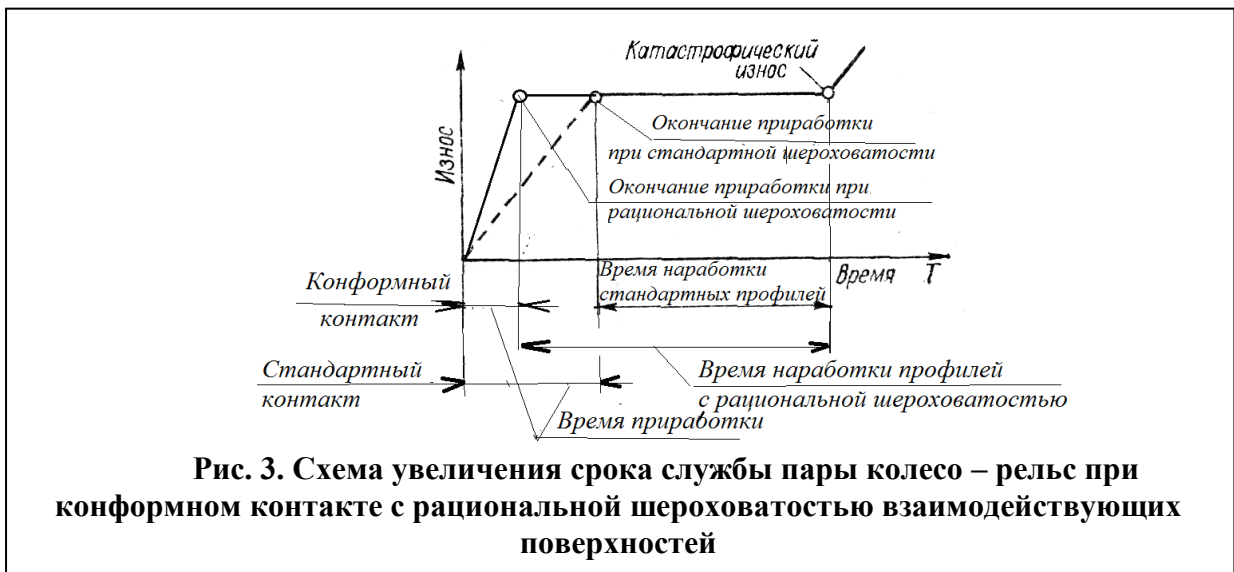
Для пары колесо – рельс основным критерием эффективного функционирования является, пропорциональный коэффициенту трения, коэффициент сцепления. Следовательно, для обеспечения нормальных условий работы необходимо установить для взаимодействующих поверхностей такую шероховатость, при которой будет обеспечиваться основная функция системы колесо – рельс, т.е. передача вращающего момента от колеса к рельсу и обеспечение соответствующего тягового усилия локомотива.

Установление рациональной шероховатости рабочих поверхностей пары колесо – рельс позволит теоретически спрогнозировать ожидаемое расчетное значение коэффициента сцепления карьерного локомотива.

Учитывая результаты экспериментальных исследований [5,с.222] необходимо отметить, что при малых значениях комплексного показателя Δ , т.е. при высокой чистоте контактирующих поверхностей, при идентичных условиях взаимодействия, температура в зоне контакта значительно выше, чем при взаимодействии грубо обработанных поверхностей. Однако, с другой стороны, учитывая условия эксплуатации карьерных локомотивов (например, повышенные углы подъема выездных траншей) нельзя исключить вероятность повышенных скоростей пробуксовки колес локомотива, что приведет к дополнительному повышению температуры в зоне контакта системы колесо – рельс и повышению интенсивности износных процессов.



Поэтому считается возможным ограничить шероховатость контактирующих рабочих поверхностей классом чистоты $\nabla 4 - \nabla 5$ (зона 2, рис.2). Это предположение подтверждают расчеты по определению фактической площади контакта для класса чистоты $\nabla 5$, выполненные по методике, приведенной в работе [20]. Данную шероховатость для взаимодействующих поверхностей системы колесо – рельс целесообразно считать *рациональной*.



При профилировке с обеспечением конформного контакта рабочих поверхностей рельсов шероховатостью $R_z 40 - 20$ мкм, что соответствует классу чистоты $\nabla 4 - \nabla 5$, продолжительность процесса приработки пары

колесо – рельс будет сокращена (рис. 3), что в свою очередь продлит срок эффективной эксплуатации карьерного железнодорожного транспорта.

Выводы

1. При высоких классах чистоты поверхности, т.е. при низкой шероховатости, с увеличением осевой нагрузки на колеса локомотивов коэффициент трения, и, следовательно, коэффициент сцепления, будут уменьшаться, а при контактировании грубо обработанных поверхностей - с увеличением осевой нагрузки коэффициент трения, а значит и коэффициент сцепления, будут увеличиваться.

2. Установлено рациональное значение шероховатости при профилировке рельсов в пределах R_z 40 – 20 мкм, что способствует сокращению продолжительности процесса приработки пары колесо – рельс, что в свою очередь продлит срок эффективной эксплуатации карьерного железнодорожного транспорта. Установление рациональной шероховатости рабочих поверхностей пары колесо – рельс в свою очередь позволит определить ожидаемое расчетное значение коэффициента трения бандажа карьерного локомотива с рельсом.

3. При профилировке рабочих поверхностей рельсов шероховатостью R_z 40 – 20 мкм, что соответствует классу чистоты $\nabla 4$ - $\nabla 5$, продолжительность процесса приработки пары колесо – рельс будет сокращена, что в свою очередь продлит срок эффективной эксплуатации карьерного железнодорожного транспорта.

4. Целесообразно провести экспериментальные исследования в условиях карьера тяговых агрегатов и тепловозов для определения коэффициентов в уравнении регрессии зависимости коэффициента сцепления от коэффициента трения.

Список литературы

1. **Крагельский И.В., Михин Н.М.** Узлы трения машин. Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
2. **Попов В.А.** Влияние фрикционных процессов на реализацию сцепления колесных пар локомотивов с рельсами. //Дисс. на соиск. уч. степ.к.т.н. - М., МИИТ, 1984.
3. **Протасов А.В.** Повышение коэффициента сцепления колес локомотива избирательной дозировкой вводимых в зону контакта магнитных порошков. //Дисс. на соиск. уч. степ.к.т.н. Ворошиловград, Ворошиловградский маш. завод, 1984.
4. **Комбалов В.С.** Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. – М.: Наука. 1974. 112 с.