

2. О количественной оценке качества электрической энергии в сетях промышленных предприятий / Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. // Гірничча електромеханіка та автоматика: Науково-технічний збірник. – 2010. – Вип. 84.-С.9-16
3. О влиянии гармонического состава питающего напряжения на энергетические показатели асинхронного двигателя /Качан Ю.Г., Николенко А.В., Кузнецов В.В. // Гірничча електромеханіка та автоматика: науково-технічний збірник. – 2009. – Вип. 83.-С.113-118.
4. ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения». ИПК. Издательство стандартов.-1998.-15 с.
5. Влияние качества электрической энергии на надежность асинхронных двигателей / Жеженко И.В., Саенко Ю.Л., Горпинич А.В. //Промислова енергетика та електротехніка, 2004 – №1.С.15-21.

**Рецензент профессор кафедри Електричні машини та апарати
Донецького державного технічного університету**

УДК 622.625-28-83-592.112

**А.Н. Коптовец, канд. техн. наук, П.А. Дьячков, В.В. Яворская,
Г.В. Денисенко**

(Украина, Днепрпетровск, Государственный ВУЗ «Национальный горный университет»)

КИНЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРЕНИЯ ПРИ СТРУКТУРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ СОСТОЯНИЙ ТОРМОЗА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА РЕЛЬСОВОГО И МОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА

Рабочим процессом тормоза колодочно-колесного типа есть тяжелонагруженные режимы трения. Тормоз включает привод тормозного нажатия, передачу его и тормозной механизм с трибоэлементами и является трибологической системой. Характеристики трения определяют изменение переменных состояния тормоза.

Цель работы – определение вида структурной неопределенности при идентификации состояний тормоза для адаптивного управления трибологической системой.

В современной научной практике известны [1, 2] следующие факторы, обуславливающие силы трения: 1) скорость скольжения; 2) удельное нормальное давление; 3) температура; 4) фактическая площадь контакта; 5) форма и конфигурация поверхности трения; 6) наличие продуктов износа; 7) упруго-вязкий характер деформации поверхностей трения, зависящий от механических свойств элементов трущейся пары и обуславливаемый модулями продольной и поперечной упругости; 8) характер поверхности или физическое состояние поверхностного слоя элементов трущейся пары, определяемый плотностью материала; 9) степень свободы элементов трущейся пары, зависящая от способа закрепления; 10) влажность поверхности трения; 11) удельная теплоемкость; 12) коэффициент теплопроводности; 13) температуропроводность; 14) коэффициент теплоотдачи; 15) коэффициент динамической вязкости.

На протяжении всей истории развития локомотивной тяги первые испытания в системе «колодка-колесо» с целью установления вида и параметров эм-

пирической зависимости коэффициента трения тормозной колодки о бандаж колеса от скорости движения были проведены в 1865–1882 годах Боше (Bochet) [3], Н.П. Петровым [4], Франке (Franke G.) [5]. Обобщение, анализ и сравнение этих испытаний с современными результатами экспериментов приведены в работах [6, 7].

До 1947 г. было предложено 13 эмпирических соотношений между коэффициентом трения и скоростью скольжения [8]. Зависимость коэффициента трения для тормозных колодок подвижного состава железнодорожного транспорта выражается формулой гиперболического вида

$$\vartheta = A \frac{K + B}{K + C} \frac{V + D}{V + E}, \quad (1)$$

где A, B, C, D, E – постоянные коэффициенты; K – тормозное нажатие; V – скорость движения.

Натурные тормозные испытания выполнены на опытном кольце ЦНИИ МПС В.Ф. Егорченко [9]. При этом коэффициент трения определяли по кривой изменения скорости движения V заторможенного вагона в предположении равнозамедленного движения, вычисляя тормозную силу как разность замедляющей силы и силы сопротивления движению. Для каждого отрезка $\Delta V = 10$ км/ч определяли средний коэффициент трения. Тормозное нажатие вычисляли как произведение силы на штоке тормозного цилиндра на передаточное число тормозной передачи. При этом аппроксимация экспериментальных зависимостей характеристики тормоза, вид эксперимента, обработка и представление его результатов построены без определенных предпосылок.

На определенных этапах развития тормозного оборудования подвижного состава железных дорог последующими ходовыми испытаниями уточняются параметры характеристики тормоза без изменения вида зависимости. Принятые в теории тяги поездов тормозные расчеты по приведенному коэффициенту трения определяют формулу в виде

$$\vartheta = f_1(V) f_2(K). \quad (2)$$

наиболее удобной для усреднения ϑ графоаналитическим методом для каждого значения K при закрепленных значениях V [10].

Экспериментальные исследования, организованные подобно испытаниям ЦНИИ МПС, обладают недостатками, которые снижают уровень обобщения их результатов. Так коэффициент трения при измерении силы сопротивления движению или тормозной силы экипажа не отражает силы трения в тормозных механизмах. При определении тормозного нажатия не учтено изменения передаточного отношения от упругих деформаций передачи.

Коэффициент трения отражает не только свойства тормозной колодки и бандажа колеса, но и свойства тормозной системы определенного типа. Последовательность опытов в порядке возрастания тормозного нажатия способствует

накоплению в результатах измерения влияния неконтролируемых параметров: фрикционного нагрева, износа и т.п., которые повышаются от заезда к заезду. При многофункциональных связях в трибологической системе, которой является тормоз, нет оснований полагать, что отношения в отдельных случаях и среднее отношение зависимости идентичны. Поэтому следует пользоваться некоторыми средними значениями исследуемых параметров, не считая их средними арифметическими, что позволяют современные методы планирования экспериментов, математической статистики и теории вероятностей.

Контурное давление между поверхностями контактирующих тел

$$p_c = \frac{N}{A_c}, \quad (3)$$

где N – нормальная нагрузка, вызывающая сближение между поверхностями взаимодействующих тел; A_c – контурная площадь касания поверхностей.

Для вычисления триботехнических параметров получено [1] выражение сближения между поверхностями контактирующих тел в зависимости от контурного давления при упругом ненасыщенном контакте

$$h = R \left[\frac{5 p_c (1 - \nu^2) \Delta^{\frac{2}{\epsilon}}}{\epsilon (\epsilon - 1) k_1 E} \right]^{\frac{2}{2\epsilon + 1}}, \quad (4)$$

$$\Delta = \frac{R_{\max}}{R b^{\frac{1}{\epsilon}}}. \quad (5)$$

Если для тормозного механизма принять тормозное нажатие K в виде нормальной нагрузки пары трения N , то из (2) с учетом (3,4,5) можно получить аналитическое выражение для определения коэффициента трения тормозной колодки в зависимости от тормозного нажатия.

Рассматривая диссипацию энергии на фрикционном контакте И.В. Крагельский и В.С. Щедров [11] получили выражение для коэффициента трения от скорости скольжения $V_{ск}$

$$f = (a + bv) \exp(-cV_{ск} + d), \quad (6)$$

где a, b, c, d – параметры, характеризующие трение.

Параметр a зависит от модуля упругости материалов трущихся поверхностей, скорости релаксации напряжений и шероховатостей. Параметр b зависит от вязко-пластичных свойств материалов, параметр c является произведением декремента затухания колебаний на коэффициент вязкости контактных слоев, b и c зависят от контактного давления, так как с его увеличением вязкость контакта возрастает.

Недостатками выражения (6) являются невозможность учета влияния давления, размера поверхности трения, сложность определения параметров $a, b,$

c, d, зависящих от трибологических свойств рабочего слоя. Эта формула пригодна только для случая, когда скорость скольжения изменяется ступенчато.

Таким образом, математическая теория не рассматривает зависимость коэффициента (силы) трения от скорости скольжения.

На рис. 1 и 2, а проведены результаты стендовых сертификационных испытаний натуральных тормозных колодок российских производителей на соответствие требованиям регламента ФТС ЖТ ТМ 02-98 «Металлопродукция для железнодорожного подвижного состава» и ФТС ЖТ ЦВ-ЦЛ-009-99 «Колодки тормозные композиционные железнодорожного подвижного состава». Испытания выполнены в аккредитованном МСЖД исследовательском центре Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТа) [12]. Результаты аналогичных испытаний зарубежных центров представлены на рис. 2, б [13]. Испытания показывают, что увеличение тормозного нажатия на чугунные колодки не повышает при данных скоростях движения эффективность торможения, так как рост контактного давления снижает величину коэффициента трения.

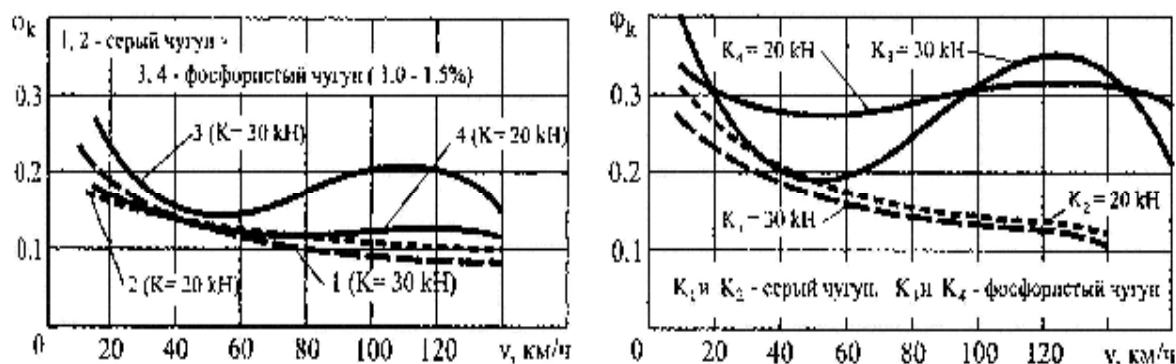


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от скорости движения для вагонных тормозных колодок (а); секционные (б).

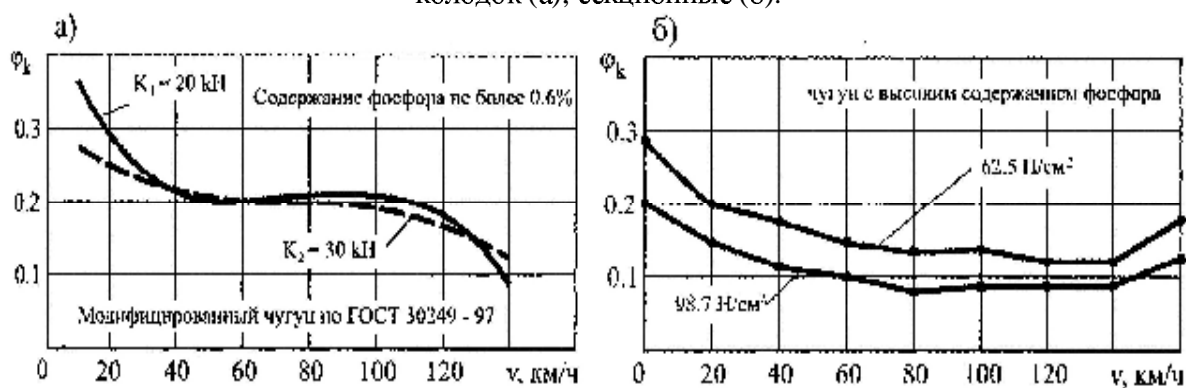


Рис 2. Зависимость коэффициента трения от скорости движения для локомотивных гребневых колодок (а); чугунные колодки по [13] (б).

Результаты стендовых сертификационных испытаний натуральных серийных композиционных колодок из материалов ТИИР-300, ТИИР-303, ТИИР-308 приведены на рис. 3 [14]. Преимущества композиционных материалов в сравнении с чугунными колодками представлены на рис. 4.

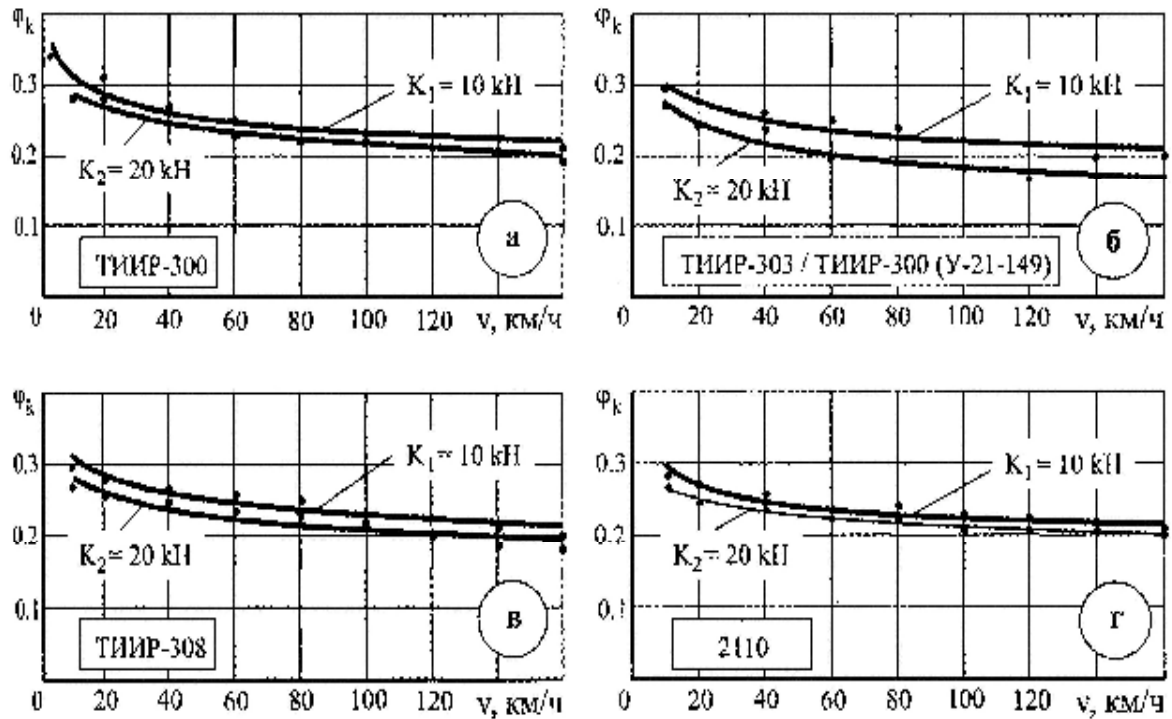


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от скорости движения для композиционных тормозных колодок из сертифицированных материалов при различных тормозных нажатиях: (а, б) – асбестосодержащих; (в, г) – безасбестовых.

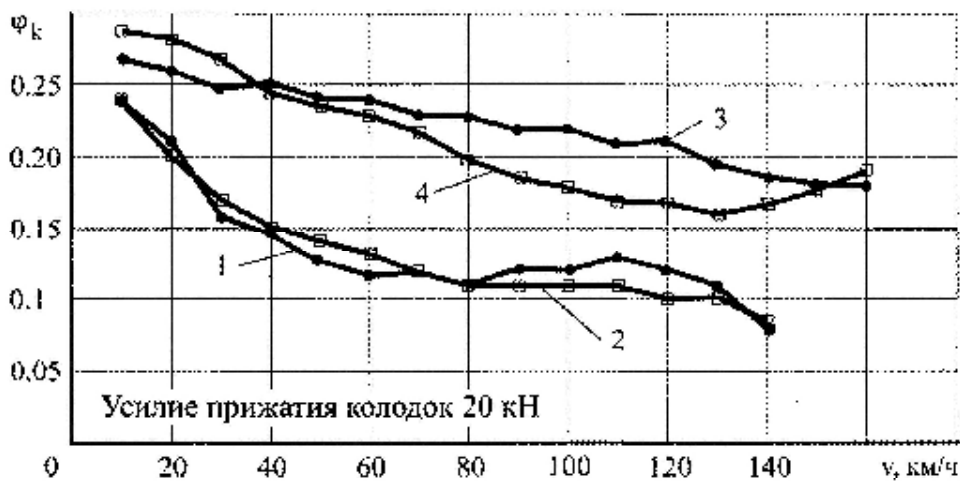


Рис. 4. Зависимости коэффициента трения от скорости движения при нажатии 20 кН: 1 – чугун серый; 2 – чугун фосфорный; 3 – безасбестовая композиция; 4 – асбестовая композиция.

В последние годы применяют металлокерамические тормозные колодки (рис. 5) [15, 13].

На подвижном составе автомобильного транспорта в тормозных механизмах применяют в фрикционной паре чугун – асбокаучуковую композицию, которая отличается стабильностью коэффициента трения. Поэтому в промыш-

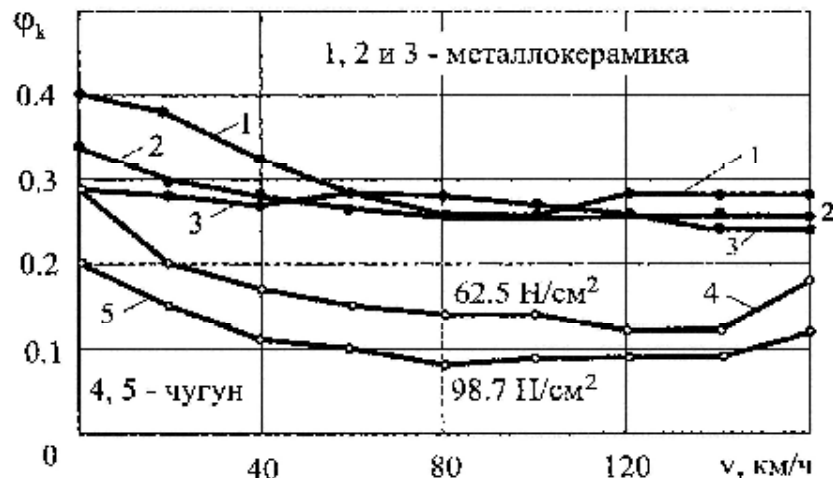


Рис. 5. Зависимости коэффициента трения от скорости движения для металлокерамических тормозных колодок

ленности был введен регламент на нижний предел коэффициента трения [16]:

по ТУ завода им. Лихачева	– 0,42,
по ТУ завода АЗЛК	– 0,45,
по ТУ завода ГАЗ	– 0,36,
по ТУ завода МАЗ	– 0,35,
по ТУ завода КРАЗ	– 0,36.

Для тормозов подъемно-транспортных машин рекомендованы значения коэффициента трения 0,35...0,45 [17], авиационных колес 0,25...0,5 [18].

На шахтном рельсовом транспорте не принято технического нормирования эффективности фрикционных свойств тормозов. С.А. Волотовский [19] предложил определять коэффициента трения чугунной тормозной колодки о стальной бандаж колеса по формуле Ломоносова

$$\vartheta = 0,2 - 0,0015V,$$

где V – скорость начала торможения, км/ч.

В последующих публикациях [20, 21] рекомендуется φ для шахтных локомотивов принимать 0,18 – 0,20.

В то же время В.П. Есаулов утверждает [22], что для всех модификаций чугунов исследуемых им в тормозных колодках «значительное снижение коэффициента трения приходится на скорости от 2 до 10 м/с, при скорости выше 10 м/с он уменьшается гораздо медленнее».

Применение дискриминантного анализа по методу Бокса – Хилла позволило автору в работе [7] построить математическую модель, адекватно описывающую изменения коэффициента трения колодочно-колесного тормоза шахтных локомотивов в зависимости от скорости движения V и усилия нажатия тормозных колодок K

$$\vartheta = 0,731 - 0,202 \cdot 10^{-1} K - 0,85 \cdot 10^{-1} V \pm 0,0015$$

в области экспериментальных условий 1...3 м/с и 4,3...11,5 кН.

При этом план эксперимента предусматривал получение выборки в результате натуральных стендовых и ходовых испытаний тормоза. Текущие значения коэффициента трения определены по формуле Амонтона-Кулона, силы трения и нормального давления тормозной колодки выполнены прямыми измерениями. Проверка адекватности модели выполнена по F-критерию. Стабильность коэффициента трения тормоза φ составляет

$$\varphi_{\text{ст}} = \frac{\varphi_{\text{ср}}}{\varphi_{\text{max}}} = 0,74.$$

Выводы

Таким образом, на железнодорожном и промышленном транспорте в качестве зависимости $\varphi(K, V)$ принята эмпирическая формула гиперболического вида, которая принята на основании феноменологических представлений, что является причиной неустойчивых решений в разных областях экспериментальных условий. При этом φ относится к фрикционной паре «колодка-колесо», не рассматривая структуру тормоза как трибологической системы. Средние арифметические значения измерений при нелинейной зависимости исследуемых параметров не обоснованы. Метод дискриминантного анализа позволяет обосновать вид зависимости φ для определенной области изменений K и V .

Падающая зависимость φ от K характеризует влияние контурного давления при упругом контакте, что находит подтверждение в задачах трибологии. Зависимость φ от V в трибологии не имеет физических моделей и математического описания.

При торможении чугунными колодками имеет место самая высокая интенсивность снижения φ от V при скорости движения до 5 м/с. Изменение материала тормозной колодки приводит к повышению коэффициента трения по величине и стабилизации его в зависимости от скорости движения.

В мировой практике для тормозов подвижного состава всех видов транспорта ставится одна и та же цель снижения зависимости коэффициента трения от скорости движения до полной стабильности его, то есть научная задача управления силой трения тормоза.

Уже полечены новые теоретические и экспериментальные на основе статистических натуральных испытаний результаты, которые позволяют развивать математические и статистические методы моделирования при отсутствии априорных гипотез об исследуемом объекте.

Тормоз, как трибологическая система, обладает видом структурной неопределенности по количеству и составу входных переменных в моделях зависимостей силы (коэффициента) трения, как выходных переменных. Это дает основания решением задач идентификации, теории управляемого движения и теории тяги, механики адаптируемых материалов разработать вычислительные алгоритмы моделирования динамических процессов управления трением по величине и функции скорости.

Список литературы

1. Справочник по триботехнике / Под. общ. ред. М. Хебты, А.В. Чичинадзе.: В 3 т. Теоретические основы. Т. 1 – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
2. Вершинский С.В., Данилов В.А., Челноков И.И. Динамика вагона. – М.: Транспорт, 1978. – 221 с.
3. Bochet. Nouvelles recherches experimentales sur le flottement de glissement. Annales des mines, t. XIX, 1861. P. 27-120.
4. Петров Н.П. О непрерывных тормозных системах. // Изв. С.Пб. Технол. ин-та: Науч. тр. – С. Пб., 1878. – С. 45-62.
5. Franke G. Über die Abhängigkeit der gleitenden Reibung von der Geschwindigkeit. Civilingenieur, Band 23, 1882, S. 206.
6. Коптовец А.Н. Обоснование рабочих, эксплуатационных характеристик и совершенствование полочно-колесного тормоза рудничных локомотивов: Автореф. дис.... канд. техн. наук. – Д., 1982. – 23 с.
7. Коптовец А.Н. Выбор формы связи между параметрами трения в тормозном механизме с применением дисприминантного анализа. // Подъемно-транспортная техника. 2007. № 4, – С. 27-32.
8. Мур Д. Основы и применение триботоники. – М.: Мир, 1978. – 487 с.
9. Егорченко В.Ф. Трение железнодорожных тормозных колодок. //В кн.: Тормозные исследования НИИЖТа. – М.: Наука, 1936. – С. 166-182.
10. Бармин Ю.И. Методика составления эмпирической формулы для коэффициента трения тормозных колодок о бандаж. – ВКН: Тр. / Хабаровский ин-т инж. ж.д. трансп. – 1964. Вып. 36. – С. 18-21.
11. Крагельский И.В., Щедров В.С. Развитие науки о трении. М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 234 с.
12. Вуколов Л.А., Жаров В.А. Сравнительные характеристики тормозных колодок различных поставщиков // Вестн. ВНИИЖТ. № 2, 2005. – С. 18-28.
13. Zander С.Р. Metal-ceramic braking clamps on powerful locomotives. Glasers Annalen. № 4, 2001. P. 157-165.
14. Налев И.А., Дружков Д.А., Страхов Н.А. Опыт разработки и производства железнодорожных композиционных тормозных колодок в ОАО «ФРИТЕКС».
15. Ehlers Н. – R. et al. Potential and limits of opportunities of the block brake. Glasers Annalen. № 6/7, 2002. – P. 290 – 300.
16. Технические условия автозаводов СССР. Автомобили СССР. Каталог-справочник. Т. 3. М.: НИИИАвтопром, 1969. – 67 с.
17. Александров М.П. Тормоза подъемно-транспортных машин. Изд. 3-е, доп. и перераб. – М.: Машиностроение, 1976. – 383 с.
18. Зверев И.И., Коконин С.С. Проектирование авиационных колес и тормозных систем. – М.: Машиностроение, 1973. – 222 с.
19. Подземная электровозная тяга. – Харьков: ГОНТИ, 1939. – 31 с.
20. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. – 3-е изд. – М.: Углетехиздат, 1955. – 34 с.
21. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1981. – 28 с.
22. Есаулов В.П. Пути повышения тормозной эффективности и износоустойчивости вагонных железнодорожных чугунных тормозных колодок: Дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Д., 1972. – 203 с.

Рецензент **вагбоуван кафедрѣ триботѣ механики**

Даржавнаго выцого навукальнаго вакладу **Нацѣональнѣй триботѣ унѣверситет**
б р тѣмѣ наук профессор Савуец В П