

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Технические науки»

Научный рецензируемый журнал
№ 2 (30), 2026

Online ISSN 2687-0029

Тверь 2026

Учредитель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Главный редактор: Болотов А.Н., д.т.н., профессор ТвГТУ

Заместители главного редактора:

Измайлов В.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Яблонев А.Л., д.т.н., профессор ТвГТУ

Семенов Н.А., д.т.н., профессор ТвГТУ

Ответственный секретарь: Афанасьева Л.Е., к.ф.-м.н., доцент ТвГТУ

Члены редакционной коллегии:

По направлению «Машиностроение»

Албагачиев А.Ю., д.т.н., профессор ИМАШ РАН

Гершман И.С., д.т.н., профессор ВНИИЖТ

Горячева И.Г., академик РАН, д.ф.-м.н., профессор ИПМех РАН

Козырева Л.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Мигранов М.Ш., д.т.н., профессор МГТУ «СТАНКИН»

Сдобняков Н.Ю., д.ф.-м.н., доцент ТвГУ

Солдатенков И.А., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИПМех РАН

Хопин П.Н., д.т.н., профессор МАИ

По направлению «Недропользование и горные науки»

Березовский Н.И., д.т.н., профессор БНТУ, Республика Беларусь

Валиев Н.Г., д.т.н., профессор УГГУ

Горлов И.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Керопян А.М., д.т.н., доцент, главный научный сотрудник ООО «МНИПИИТИ»

Кондратьев А.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Мисников О.С., д.т.н., доцент ТвГТУ

Рахутин М.Г., д.т.н., доцент НИТУ «МИСиС»

По направлению «Информационные технологии и телекоммуникации»

Бурдо Г.Б., д.т.н., профессор ТвГТУ

Голенков В.В., д.т.н., профессор БГУИР, Республика Беларусь

Дзюба С.М., д.физ.-мат. наук, профессор ТвГТУ

Мешалкин В.П., академик РАН, д.т.н. РХТУ им. Д.И. Менделеева

Палюх Б.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Шпрехер Д.М., д.т.н., профессор ТулГУ

Язенин А.В., д.ф.-м.н., профессор ТвГУ

Адрес редакции: 170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22.

E-mail: vestnik_tstu_tekh@mail.ru

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки» публикует научные статьи и краткие обзоры по разделам «Машиностроение», «Недропользование и горные науки», «Информационные технологии и телекоммуникации». Журнал выходит четыре раза в год.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: ЭЛ № ФС77-74961 от 25 января 2019 года. Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Входит в единый государственный перечень научных изданий «Белый список». Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям:

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации;

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;

2.5.3. Трение и износ в машинах;

2.8.8. Геотехнология, горные машины.

© ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Измайлов В.В.</i> Н.Б. Демкин и его вклад в развитие трибологии	6
<i>Болотов А.Н.</i> Вклад Тверской научной школы по трибологии в создание и изучение магнитных смазочных материалов	18
<i>Раткевич Е.А., Болотов А.Н.</i> Современная трибология: методологические аспекты исследований	41
<i>Гусев А.Ф., Измайлов В.В., Новоселова М.В.</i> Фрикционные характеристики керамических материалов при повышенных температурах.....	52
<i>Новикова О.О., Новиков В.В., Болотов А.Н.</i> Применение характеристик профиля поверхности для моделирования контактного взаимодействия композиционных материалов	59
<i>Измайлов В.В., Новоселова М.В.</i> Удельные и интегральные характеристики фрикционного взаимодействия в контакте технических поверхностей.....	69
<i>Барчуков Д.А., Барабанова Е.В., Афанасьева Л.Е., Смолякова И.А.</i> Возможности атомно-силовой микроскопии в решении задач склерометрии	79

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

<i>Яблонев А.Л., Андрианова А.А.</i> Обоснование скорости витания икринок в инкубационной системе, устанавливаемой на отработанных торфяных месторождениях.....	86
<i>Бочков В.С., Бочкова К.В., Бабенко А.Г.</i> Методика определения уровня загрузки шаровой мельницы	94

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

<i>Глебский М.А., Егерева И.А.</i> Управление ресурсами вычислительной системы для оптимизации работы функционально связанных компонентов программного приложения	103
<i>Горобченко С.Л., Мешков С.А., Вернер Н.Н., Войнаш С.А., Соколова В.А.</i> Системный подход к дальнему прогнозированию развития холодильных компрессоров с использованием анализа ключевого противоречия.....	109

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

<i>Izmailov V.V.</i> , N.B. Demkin and his contribution to the development of tribology.....	6
<i>Bolotov A.N.</i> Contribution of the Tver scientific school of tribology to the creation and study of magnetic lubricating fluids	18
<i>Ratkevich E.A.</i> , <i>Bolotov A.N.</i> Modern tribology: methodological aspects of research.....	41
<i>Gusev A.F.</i> , <i>Izmailov V.V.</i> , <i>Novoselova M.V.</i> Frictional characteristics of ceramic materials at higher temperatures	52
<i>Novikova O.O.</i> , <i>Novikov V.V.</i> , <i>Bolotov A.N.</i> Application of surface profile characteristics to modeling contact interaction of composite materials.....	59
<i>Izmailov V.V.</i> , <i>Novoselova M.V.</i> Specific and integral characteristics of frictional interaction in contact of engineering surfaces.....	69
<i>Barchukov D.A.</i> , <i>Barabanova E.V.</i> , <i>Afanasieva L.E.</i> , <i>Smolyakova I.A.</i> Capabilities of atomic force microscopy in solving sclerometry problems.....	79

SUBSOIL USE AND MINING SCIENCES

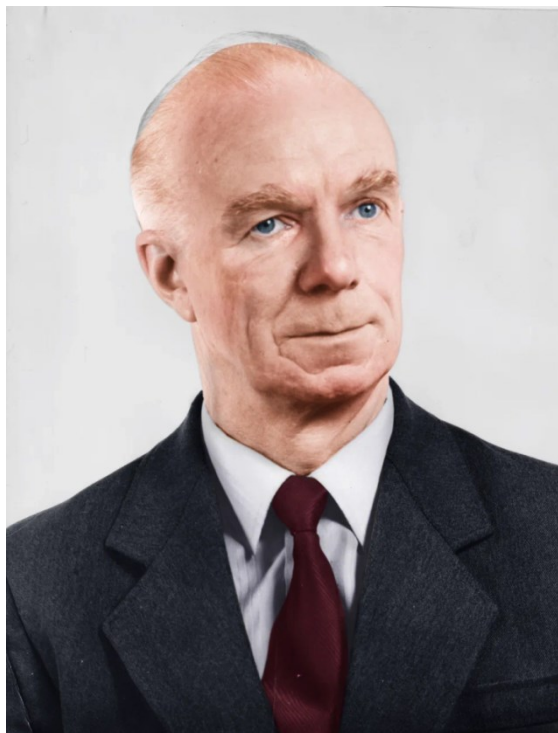
<i>Yablonev A.L.</i> , <i>Andrianova A.A.</i> Justification of the rate of egg hitting in an incubation system installed in depleted peat deposits.....	86
<i>Bochkov V.S.</i> , <i>Bochkova K.V.</i> , <i>Babenko A.G.</i> The method of determining the loading level of a ball mill.....	94

INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

<i>Glebsky M.A.</i> , <i>Egereva I.A.</i> Resource management in computing systems for optimizing the performance of functionally related software application components.....	103
<i>Gorobchenko S.L.</i> , <i>Meshkov S.A.</i> , <i>Werner N.N.</i> , <i>Voinash S.A.</i> , <i>Sokolova V.A.</i> A systematic approach to long-term forecasting of refrigeration compressors using key contradiction analysis.....	109

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ, КОЛЛЕГИ!

Выпуск этого номера журнала посвящаем светлой памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, д.т.н., профессора Николая Борисовича Демкина



Николай Борисович Демкин
09.04.1926–27.09.2010

Девятого апреля 2026 года исполняется 100 лет со дня рождения Николая Борисовича Демкина, доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, основателя научной школы по механике и физике фрикционного контакта в Калининском политехническом институте (ныне Тверской государственный технический университет).

Николай Борисович родился в Рязани, окончил с отличием Рязанский педагогический институт, получив специальность преподавателя физики. После окончания института там же преподавал физику. В 1956 году он поступил в аспирантуру Института машиноведения АН СССР, где его научным руководителем стал Игорь Викторович Крагельский – один из ведущих специалистов в области трения и изнашивания деталей машин. Успешно окончив аспирантуру, Николай Борисович защитил кандидатскую диссертацию, по материалам которой в издательстве Академии наук СССР была опубликована монография «Фактическая площадь касания твердых поверхностей».

С 1960 года Николай Борисович работал в Калининском торфяном институте (ныне Тверской государственный технический университет). С 1965 по 1995 год он был заведующим кафедрой физики, а с 1995 года до последних дней жизни – профессором той же кафедры.

В 1969 году Николай Борисович защитил докторскую диссертацию «Экспериментальное и теоретическое исследование контактирования шероховатых поверхностей применительно к проблемам внешнего трения», по материалам которой им была написана монография «Контактирование шероховатых поверхностей», опубликованная в 1970 году издательством «Наука». В монографии приводились методы расчета всех основных характеристик контакта деталей машин, а также описывались методики и аппаратура для их экспериментального определения.

Имя Н.Б. Демкина и его научные труды получили известность не только в нашей стране, но и за рубежом. Он был членом Американского инженерного общества, Международного совета по трибологии, Российского национального комитета по трибологии, Межведомственного научного совета по трибологии, членом редколлегии международного журнала «Трение и износ».

Кроме научной деятельности, Николай Борисович занимался преподавательской работой, был опытным и высококвалифицированным педагогом и пользовался большим авторитетом среди студентов, аспирантов и всех сотрудников вуза. Это был добрый, отзывчивый и глубоко интеллигентный человек.

Н.Б. Демкин – участник Великой Отечественной войны, награжден двумя орденами и пятнадцатью медалями. За успехи в области науки и высшего образования ему присвоены звания заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации и почетного работника образования Российской Федерации, за выдающиеся достижения он награжден Нагрудным знаком Губернатора Тверской области «За заслуги в развитии Тверской области».

Н.Б. ДЕМКИН И ЕГО ВКЛАД В РАЗВИТИЕ ТРИБОЛОГИИ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., 2026

Рассмотрена модель дискретного контакта технических поверхностей, разработанная Николаем Борисовичем Демкиным в соавторстве с его научным руководителем Игорем Викторовичем Крагельским, которая внесла существенный вклад в развитие трибологии. Благодаря своей гибкости и относительной простоте модель получила широкое распространение при теоретическом описании различных процессов контактного взаимодействия – трения, изнашивания, контактной проводимости, контактной жесткости, герметичности стыков. Сформулированы исходные предпосылки модели и показаны возможности ее применения к расчету основных эксплуатационных характеристик контактных соединений – фактической площади контакта и контактной деформации. Приведены примеры успешного развития модели с учетом новых возможностей технических средств исследования поверхностей – применительно к расчету характеристик контакта с учетом адгезионного взаимодействия, с учетом влияния шероховатости и др.

Ключевые слова: технические поверхности, дискретный контакт, площадь контакта, контактная деформация, теоретическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Девятого апреля 2026 г. исполняется 100 лет со дня рождения Николая Борисовича Демкина – основателя Тверской научной школы по механике и физике фрикционного контакта, признанного авторитета в области науки о контактном взаимодействии, трении и изнашивании.

В трибологию Н.Б. Демкин пришел в середине 1950-х гг. благодаря счастливому стечению обстоятельств. По воспоминаниям самого Николая Борисовича, это случилось в Рязани во время визита в институт, где он преподавал физику, Игоря Викторовича Крагельского – одного из признанных авторитетов в области науки о трении и изнашивании (термин «трибология» появится только спустя десять лет). Пообщавшись с Николаем Борисовичем, И.В. Крагельский предложил ему поступить в аспирантуру Института машиноведения АН СССР, что Николай Борисович и сделал в 1956 г. Его научным руководителем стал И.В. Крагельский, который, как вспоминал Николай Борисович, предлагал аспирантам самостоятельно выбрать тему исследований. Такой темой стала фактическая площадь контакта шероховатых поверхностей деталей машин и связанные с ней характеристики. На эту тему Николай Борисович успешно защитил кандидатскую диссертацию, выполнив оригинальные комплексные теоретические и экспериментальные исследования фактической площади контакта и контактной дефор-

мации шероховатых поверхностей. По сути, им была разработана теоретическая модель дискретного контакта технических поверхностей, которую можно без преувеличения считать пионерской. Хотя методики расчета отдельных характеристик контакта и ранее предлагались в работах отечественных и зарубежных ученых, столь глубокое комплексное теоретико-экспериментальное исследование было выполнено впервые.

По материалам кандидатской диссертации Н.Б. Демкиным в 1962 г. в издательстве Академии наук СССР была опубликована монография [1], в которой, помимо теоретических зависимостей для расчета характеристик дискретного контакта, содержится уникальный экспериментальный материал по измерению фактической площади контакта и его деформации под нагрузкой в зависимости от параметров шероховатости контактирующих поверхностей и механических свойств материалов контактирующих деталей.

Основные положения разработанной Николаем Борисовичем модели дискретного контакта были опубликованы также в совместной с И.В. Крагельским публикации (1960) в авторитетном международном журнале “Wear” [2]. Суть их изложена в аннотации к статье (в русском переводе): «Авторы используют три области контакта: кажущуюся, контурную и реальную. Единичный выступ моделируется как конус со сферической вершиной, деформированной упруго и пластически. Площадь контакта увеличивается главным образом за счет увеличения числа контактирующих выступов. Они расположены на сферических и цилиндрических волнах, которые деформированы упруго. На основе этой модели выведена формула для расчета реальной площади контакта как функции нагрузки, геометрии поверхности и свойств материала».

Введение понятия контурной площади контакта, образованной площадками контакта единичных волн на поверхности, – отличительная особенность модели контакта Крагельского – Демкина, позволившая повысить точность расчетов характеристик контакта.

В зарубежных публикациях обычно в качестве пионерской указывается модель дискретного контакта шероховатых поверхностей Дж. Гринвуда и Дж. Вильямсона [3], по концепции аналогичная модели Крагельского – Демкина, хотя она опубликована через 4 года после монографии Н.Б. Демкина и через 6 лет после основополагающей статьи И.В. Крагельского и Н.Б. Демкина в журнале “Wear”.

По окончании аспирантуры Николай Борисович выбрал в качестве будущего места работы Калининский торфяной институт, ныне Тверской государственный технический университет (ТвГТУ). В 1962 г. он стал преподавателем кафедры физики Калининского торфяного института, а в 1965 – заведующим этой кафедрой.

Возглавив кафедру физики, Николай Борисович не только активно продолжил научные исследования в области трибологии, но и вовлек в них заинтересованных преподавателей, а также аспирантов и студентов, что в итоге привело к формированию в ТвГТУ научного направления «Механика и физика фрикционного контакта».

В 1969 г. Николай Борисович защитил докторскую диссертацию «Экспериментальное и теоретическое исследование контактирования шероховатых поверхностей применительно к проблемам внешнего трения», материалы которой вошли в монографию, изданную в 1970 г. издательством «Наука» [4]. В монографии изложена теоретическая модель дискретного контакта технических поверхностей, позволяющая рассчитать все его основные характеристики, а также описаны оригинальные методики и аппаратура для их экспериментального определения.

К концу 70-х – началу 80-х гг. XX в. в ТвГТУ (тогда Калининском политехническом институте) окончательно сформировалась научная школа Н.Б. Демкина в области механики и физики контактного взаимодействия, трения и изнашивания техни-

ческих поверхностей. Николай Борисович и его ученики продолжали развивать и совершенствовать модель дискретного контакта, но наряду с этим в рамках научной школы сформировались самостоятельные направления исследований: фрикционное взаимодействие дисперсных материалов (И.И. Беркович); контактное взаимодействие, трение и изнашивание электроконтактных соединений (М.А. Коротков, В.В. Измаилов), триботехника магнитопассивных и магнито-жидкостных узлов трения (А.Н. Болотов). По результатам этих исследований защищено пять докторских и более тридцати кандидатских диссертаций.

1. МОДЕЛЬ ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА ТЕХНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КРАГЕЛЬСКОГО – ДЕМКИНА

1.1. Опорная кривая и другие функции распределения

Модель Крагельского – Демкина базируется на аналитическом описании начального участка так называемой относительной опорной кривой профиля шероховатой поверхности (ГОСТ 25142-82), известной в трибологии также как кривая Эббота – Файрстоуна (в ГОСТ Р ИСО 4287-2014 эта характеристика фигурирует под названием «кривая коэффициента смятия профиля»).

Примеры типичных кривых опорных поверхностей приведены на рис. 1 в безразмерных координатах $\varepsilon = f(t_p)$, где $\varepsilon = p/R_p$; $t_p = \frac{\sum_{i=1}^m b_i}{l}$; p – уровень сечения профиля (расстояние между линией выступов профиля и линией, пересекающей профиль эквидистантно линии выступов профиля); R_p – максимальная высота пика (выступа) профиля; $\sum_{i=1}^m b_i$ – опорная длина профиля (сумма длин отрезков b_i , отсекаемых на заданном уровне p в материале профиля линией, эквидистантной средней линии). Согласно ГОСТ 25142-82, опорная кривая строится в пределах базовой длины l_r , т.е. $l = l_r$, тогда как по ГОСТ Р ИСО 4287-2014 $l = l_n$, где l_n – длина оценки.

Как параметр структуры поверхности опорная кривая характеризует распределение материала по высоте шероховатого слоя и может интерпретироваться как интегральная функция распределения ординат профиля на базовой длине или длине оценивания.

Н.Б. Демкин предложил аппроксимировать начальный участок опорной кривой степенной функцией [1, 4]. В современном варианте эта аппроксимация имеет вид [5, 6]:

$$t_p = t_m \varepsilon^v, \quad (1)$$

где t_m – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; v – показатель степени, вычисляемый по формуле

$$v = 2t_m \frac{R_p}{R_a} - 1,$$

где R_a – арифметическое среднее отклонение оцениваемого профиля.

На рис. 1 пунктиром показана степенная аппроксимация начального участка опорной кривой в соответствии с уравнением (1). Очевидно, что формула (1) хорошо описывает начальные участки опорных кривых (фактически до уровня средней линии). Этого вполне достаточно, так как при контактировании шероховатых поверхностей взаимодействуют лишь вершины наиболее высоких выступов, соответствующие начальному участку опорной кривой. Деформация шероховатого слоя на величину $p > R_p$ невозможна в принципе.

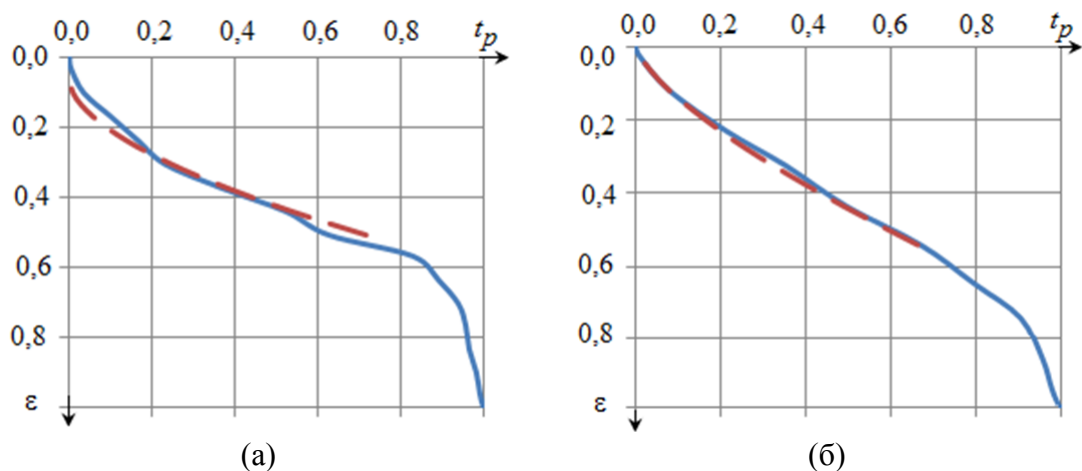


Рис. 1. Опорные кривые профиля шероховатых поверхностей: $v = 1,7$; $t_m = 0,49$ (а); $v = 1,4$; $t_m = 0,50$ (б). Сплошные линии – эксперимент; пунктир – степенная аппроксимация

Одним из достоинств опорной кривой как характеристики рельефа поверхности является то обстоятельство, что относительная опорная длина профиля t_p равна относительной площади сечения материала (опорной площади) A_p на данном уровне p , т.е.

$$t_p = \frac{\sum_{i=1}^m b_i}{l_n} = \frac{A_p}{A_n} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta A_{pi}}{A_n},$$

где ΔA_{pi} – площадь сечения i -го выступа на уровне p ; A_n – площадь рассматриваемого участка поверхности. Иными словами, опорные кривые профиля и поверхности должны совпадать [5], что подтверждает рис. 2, на котором приведены для сравнения экспериментальные опорные кривые поверхности и ее профиля для тех же деталей, что и на рис. 1.

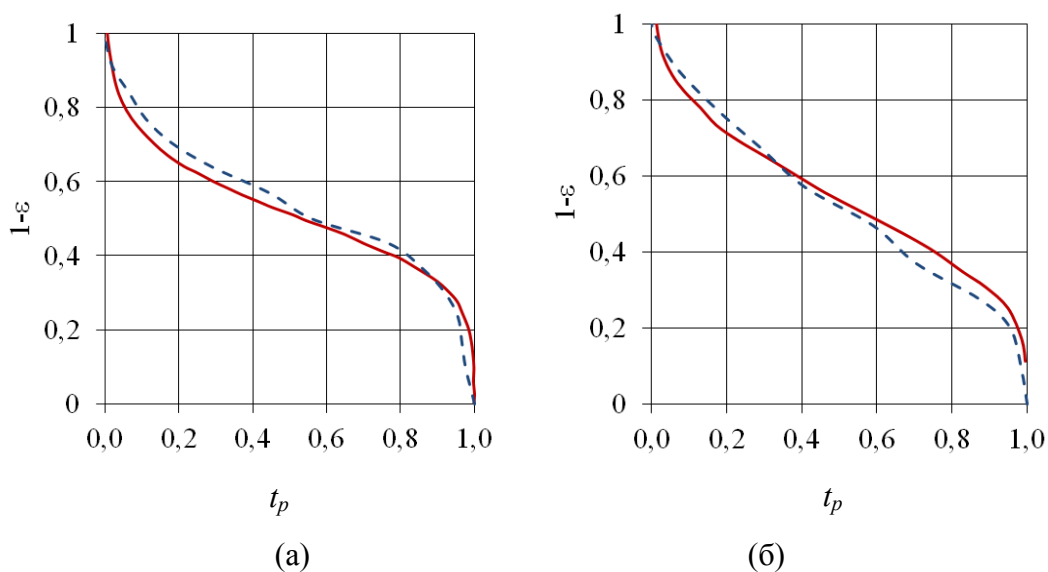


Рис. 2. Опорные кривые для шероховатых поверхностей и их профилей: $v = 1,7$; $t_m = 0,49$ (а); $v = 1,4$; $t_m = 0,50$ (б). Сплошная линия – поверхность; пунктир – профиль

Кроме функции распределения материала по высоте шероховатого слоя (опорная кривая), в модели Крагельского – Демкина используются еще две функции:

1. Функция распределения материала по высоте единичного выступа (функция формы выступа):

$$\Delta A_p = \psi(\delta), \quad (2)$$

где ΔA_p – площадь сечения единичного выступа плоскостью, параллельной средней и находящейся от вершины выступа на расстоянии δ . При контактировании шероховатой поверхности с гладкой плоскостью величина δ равна деформации выступа. Для сферического выступа $\Delta A_{pi} \approx \alpha 2\pi r \delta_i$, где α – коэффициент упругой осадки выступов; r – средний радиус кривизны вершин выступов. Для упругого контакта $\alpha = 1/2$, для пластического $\alpha = 1$, для упругопластического $1/2 < \alpha < 1$. Аналогично $\Delta A_{mi} \approx \alpha 2\pi r Z_i$, где ΔA_{mi} – площадь сечения выступа на уровне средней плоскости; Z_i – высота выступа.

2. Функция распределения вершин выступов по высоте шероховатого слоя

$$\varphi(y) = \frac{dn_r}{n_m dy}, \quad (3)$$

где безразмерная координата $y = Y/R_p$; Y – координата, отсчитанная от линии выступов, n_r и n_m – число контактирующих выступов и число выступов выше средней плоскости соответственно.

В качестве функции $\varphi(y)$ принята простейшая степенная функция $\varphi(y) = Cy^\gamma$. Из условия нормировки $\int_0^1 \varphi(y) dy = C \int_0^1 y^\gamma dy = 1$ следует, что $C = \gamma + 1$. В модели Н.Б. Демкина $\gamma = \nu - 2$, где ν – показатель степени в уравнении (1) опорной кривой. Окончательно $\varphi(y) = (\nu - 1)y^{\nu-2}$.

Из трех функций распределения независимы только две, третья может быть выражена через две заданные. Например, выразим относительную фактическую площадь контакта через функцию формы выступа (см. формулу (2)) и функцию распределения выступов по высоте (см. формулу (3)). Очевидно, что

$$A_p = \int_{n_r} \Delta A_p dn_r.$$

Из уравнения (2) получаем $\Delta A_p = 2\pi r \delta = 2\pi r(p - Y) = 2\pi r R_p(\varepsilon - y)$, где $\varepsilon = p/R_p$. Выразив из формулы (3) величину $dn_r = n_m(\nu - 1)y^{\nu-2}dy$, получим уравнение

$$A_p = 2\pi r R_p n_m (\nu - 1) \int_0^\varepsilon (\varepsilon - y) y^{\nu-2} dy$$

и приведем его к виду

$$A_p = 2\pi r R_p n_m (\nu - 1) \varepsilon^\nu \int_0^1 \left(1 - \frac{y}{\varepsilon}\right) \left(\frac{y}{\varepsilon}\right)^{\nu-2} d\left(\frac{y}{\varepsilon}\right).$$

Интеграл в правой части уравнения $J = \int_0^1 (1 - x)x^{\nu-2} dx = \frac{1}{\nu(\nu-1)}$, поэтому окончательно имеем

$$A_p = 2\pi r \left(\frac{R_p}{\nu}\right) n_m \varepsilon^\nu. \quad (4)$$

Величина R_p/v равна средней высоте выступов. Тогда произведение $2\pi r \left(\frac{R_p}{v}\right) n_m = 2\pi r Z_{cp} n_m = \Delta A_{mcp} n_m = A_m$, где $A_m = t_m A_n$ – суммарная площадь сечения всех выступов на уровне средней плоскости. Окончательно на основании уравнения (4) получим:

$$t_p = \frac{A_p}{A_n} = t_m \left(\frac{p}{R_p}\right)^v,$$

что совпадает с уравнением опорной кривой (1).

1.2. Расчет основных характеристик контакта

Рассмотрим расчет наиболее важных характеристик контакта с помощью модели Н.Б. Демкина на примере упругой деформации единичных неровностей контактирующих поверхностей.

Для наглядности рассмотрим контакт шероховатой поверхности с гладким плоским штампом (рис. 3).



Рис. 3. Схема контакта шероховатой поверхности с гладким плоским штампом: 00 – исходное положение штампа; mm – средняя линия профиля шероховатости

На основании полученного Г. Герцем решения контактной задачи для упругих тел с первоначальным касанием в точке среднее контактное давление на площадках фактического контакта можно представить в виде $p_r = \frac{4}{3\pi} E^* \sqrt{\frac{\delta}{r}}$, где E^* – эквивалентный модуль упругости [6]. Тогда нагрузка на единичный выступ

$$N_i = p_r \Delta A_{ri} = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{E^*}{\sqrt{r}} (p - Y)^{\frac{1}{2}} \pi r (p - Y) = \frac{4}{3} E^* \sqrt{r} (p - Y)^{\frac{3}{2}}, \quad (5)$$

где $\Delta A_{ri} = \pi r \delta_i = \pi r (p - Y)$ – площадь единичного пятна контакта.

Распределение выступов по высоте в соответствии с формулой (3):

$$dn_r = n_m (v - 1) y^{v-2} dy.$$

Подставив значения N_i и dn_r в уравнение (5), получим

$$N = \int_0^\varepsilon \frac{4}{3} E^* \sqrt{r} R_p^{\frac{3}{2}} n_m (v - 1) (\varepsilon - y)^{\frac{3}{2}} y^{v-2} dy.$$

После преобразований имеем

$$N = \frac{4}{3\pi} E^* \left(\frac{R_p}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\pi r \left(\frac{R_p}{v} \right) n_m \right] v(v-1) \varepsilon^{v+\frac{1}{2}} J_v,$$

где $J_v = \int_0^1 x^{v-2} (1-x)^{\frac{3}{2}} dx$; $x = y/\varepsilon$.

Выражение в квадратных скобках равно половине суммарной площади сечения выступов на уровне средней плоскости $A_m = 2\pi r Z_{cp} n_m$, где $Z_{cp} = R_p/v$. В свою очередь $A_m = t_m A_n$. Интеграл J_v представляет собой бета-функцию $B\left(\frac{5}{2}; v-1\right)$. Введя обозначение $K_1 = v(v-1)B\left(\frac{5}{2}; v-1\right)$, запишем выражение для нагрузки на контакт:

$$N = \frac{4}{3\pi} E^* \left(\frac{R_p}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \alpha t_m A_n K_1 \varepsilon^{v+\frac{1}{2}},$$

где для упругого контакта $\alpha = 0,5$.

Обозначив комбинацию $\frac{4}{3\pi} E^* \left(\frac{R_p}{r} \right)^{\frac{1}{2}} = \Omega$, получим

$$N = \alpha A_n t_m \Omega K_1 \varepsilon^{v+\frac{1}{2}}.$$

Выразим отсюда относительную деформацию:

$$\varepsilon = \left(\frac{N}{\alpha A_n t_m \Omega K_1} \right)^{\frac{1}{v+\frac{1}{2}}} = \left(\frac{p_n}{\alpha t_m \Omega K_1} \right)^{\frac{1}{v+\frac{1}{2}}}. \quad (6)$$

Относительную фактическую площадь контакта $\eta_r = A_r/A_n$ найдем, подставив значение ε из формулы (6) в уравнение опорной кривой (1), учитывая, что при упругом контакте¹ $\eta_r = \alpha t_p$:

$$\eta_r = \alpha t_m \varepsilon^v = \left[(\alpha t_m)^{\frac{1}{2v}} \cdot \frac{p_n}{\Omega K_1} \right]^{\frac{2v}{2v+1}}. \quad (7)$$

Среднее фактическое давление в упругом контакте шероховатой поверхности с гладкой плоскостью найдем из очевидного соотношения $\frac{p_r}{p_n} = \frac{A_n}{A_r} = \frac{1}{\eta_r}$:

$$p_r = (\Omega K_1)^{\frac{2v}{2v+1}} \cdot \left(\frac{p_n}{\alpha t_m} \right)^{\frac{1}{2v+1}}. \quad (8)$$

В формуле (8) комплекс Ω и коэффициент K_1 – постоянные величины для данного контакта, а второй сомножитель слабо зависит от нагрузки (номинального

¹ При упругом контакте по теории Герца площадь контакта единичного выступа $\Delta A_{ri} = \pi r \delta_i$, тогда как геометрическая площадь сечения выступа $\Delta A_{si} = 2\pi r \delta_i$. Отсюда $\eta_r = \frac{A_r}{A_n} = \frac{\sum \Delta A_{ri}}{A_n} = \alpha t_p = \alpha \frac{\sum \Delta A_{si}}{A_n}$, где $\alpha = 0,5$.

давления) – в степени 1/5–1/7. В результате при упругом контакте фактическое контактное давление слабо зависит от нагрузки.

При пластическом контакте фактическое контактное давление – величина постоянная, равная твердости (микротвердости) материала: $p_r = H$. Тогда очевидно, что фактическая площадь контакта в случае пластической деформации неровностей шероховатости $A_r = \frac{N}{p_r} = \frac{N}{H}$.

Из уравнения (1) степенной аппроксимации опорной кривой, считая, что при пластической деформации неровностей шероховатости $A_r = A_p$, получим для относительной деформации контакта

$$\varepsilon = \left(\frac{A_r}{t_m A_n} \right)^{\frac{1}{v}} = \left(\frac{N}{H t_m A_n} \right)^{\frac{1}{v}} = \left(\frac{p_n}{t_m H} \right)^{\frac{1}{v}}. \quad (9)$$

Уравнения (6)–(9) позволяют рассчитать основные характеристики дискретного контакта технических поверхностей в зависимости от характеристик их рельефа и физико-механических свойств материалов контактирующих деталей.

2. РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА ТЕХНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КРАГЕЛЬСКОГО – ДЕМКИНА

2.1. Фактическая и физическая площади дискретного контакта

Модель дискретного контакта Н.Б. Демкина и И.В. Крагельского с концепцией трех площадей контакта – номинальной (кажущейся), контурной и фактической – связана с принятым разделением отклонений реальных технических поверхностей от идеальной формы в зависимости от масштаба на макроотклонения, волнистость и шероховатость. Номинальная площадь определяется геометрическими размерами контактирующих деталей; контурная – деформацией контактирующих волн, а фактическая – деформацией контактирующих выступов шероховатости. Отсутствие соответствующего метрологического обеспечения измерения параметров рельефа поверхностей наномасштабного уровня не позволило авторам описываемой модели дискретного контакта распространить ее на так называемую субшероховатость и ввести понятие так называемой физической площади контакта (по терминологии авторов работы [7]).

Современные технические средства измерения параметров рельефа поверхностей на наномасштабном уровне, в первую очередь атомная силовая и сканирующая туннельная микроскопии, такую возможность предоставляют.

Под субшероховатостью подразумеваются неровности поверхности с высотой менее 25–30 нм [8]. Именно таковы минимальные значения высот неровностей, относящихся к микрошероховатости в большинстве международных и национальных стандартов. Нижняя граница высоты неровностей субшероховатости составляет примерно 2 нм. При меньших масштабах могут нарушаться постулаты, лежащие в основе механики сплошных сред, в частности гипотеза сплошности среды, соотношения между напряжениями и деформациями и т.д.

Величина физической площади контакта – наиболее важная характеристика с точки зрения технических приложений контактной механики, так как в конечном счете именно на площадках физического контакта происходят процессы адгезионного и фрикционного взаимодействий, локальное разрушение поверхностей (изнашивание), перенос электрического заряда (контактная электропроводимость) и тепловой энергии (контактная теплопроводность).

Влияние субшероховатости на характеристики контакта технических поверхностей проанализировано в работе [9] на основании концепции Крагельского – Демкина с помощью числовой модели дискретного контакта.

Исходные предпосылки теоретического анализа следующие. Рассматривается дискретный контакт поверхностей с неровностями двух масштабных уровней – шероховатость (первый масштабный уровень) и субшероховатость, или наношероховатость (второй масштабный уровень) (таблица). Соответственно площадь контакта, образованную суммой отдельных площадок контакта выступов первого уровня, будем называть по уже установившейся терминологии фактической площадью контакта A_r ; площадь контакта, образованную суммой отдельных площадок контакта выступов второго уровня, – физической площадью контакта A_f .

Параметры шероховатости и субшероховатости модельных поверхностей

Материалы контактирующих деталей	Шероховатость			Субшероховатость		
	R_p , мкм	r , мкм	ν	R_{ps} , нм	r_s , нм	ν_s
Сталь – сталь	1	100	2	10	200	2
			3			3
Общие параметры: $t_m = t_{ms} = 0,5$; $E^* = E_s^* = 10^{11}$ Па						

Примечание. R_p , R_{ps} – максимальная высота пика (выступа) профиля; r , r_s – радиус кривизны вершин пиков профиля; t_m , t_{ms} – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии; ν , ν_s – параметр степенной аппроксимации начального участка опорной кривой; E^* , E_s^* – эквивалентный модуль упругости (см. п. 1.2). Индекс s относится к параметрам субшероховатости.

Результаты анализа иллюстрируются рис. 4, на котором представлены зависимости относительных площадей контакта – фактической $\eta_r = A_r/A_n$ и физической $\eta_f = A_f/A_n$ – от номинального контактного давления p_n (A_n – номинальная площадь контакта).

Как видно из рис. 4, различие фактической и физической площадей контакта может достигать полутора порядков при малых значениях номинального давления, уменьшаясь с ростом последних.

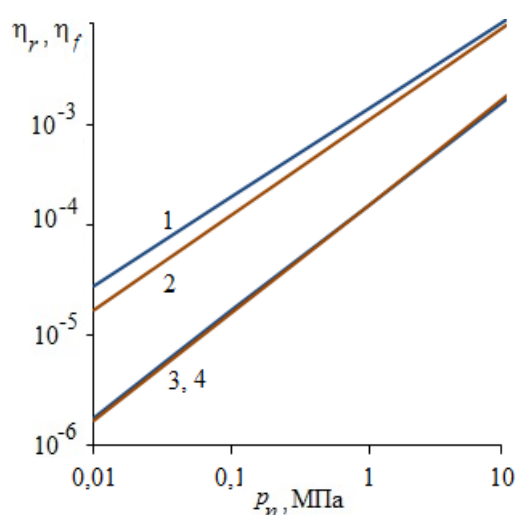


Рис. 4. Зависимости относительных фактической η_r (1, 2) и физической η_f (3, 4) площадей контакта от номинального давления; линии 1, 3 – $\nu = 2$; линии 2, 4 – $\nu = 3$

2.2. Дискретный контакт технических поверхностей с учетом адгезии

Адгезионное взаимодействие контактирующих поверхностей – одна из причин, зачастую главная, возникновения силы внешнего трения.

Классические модели дискретного контакта технических поверхностей, в том числе модель Крагельского – Демкина, не учитывали влияния адгезионного взаимодействия контактирующих тел.

Освоение современными технологиями наномасштабного уровня, тенденция к миниатюризации и микроминиатюризации технических устройств привели, в частности, к бурному развитию нанотрибологии.

На наномасштабном уровне поверхностные силы играют существенную, а порой и решающую роль в процессах контактного взаимодействия, поэтому специалисты в области механики и физики фрикционного контакта вновь обратились к основополагающим теориям адгезионного взаимодействия, разработанным еще в прошлом веке и известным как теория Джонсона – Кендалла – Робертса [10] (ДКР, или JKR, 1971 г.) и теория Дерягина – Муллера – Топорова [11] (ДМТ, или DMT, 1975 г.). Они не утратили актуальности до настоящего времени, широко цитируются и используются в современных теоретических моделях контактного взаимодействия.

Рассмотрим влияние адгезионного взаимодействия на характеристики дискретного контакта технических поверхностей на примере применения ДМТ-модели [12], которая в большей степени соответствует особенностям контакта металлических поверхностей, чем теория ДКР [13].

Относительная деформация контакта ε связана с номинальным контактным давлением p_n зависимостью [12]

$$p_n = t_m \left(\frac{2K_3}{3\pi} E^* \sqrt{\frac{R_p}{r}} \cdot \varepsilon^{v+\frac{1}{2}} - \frac{v\Delta\gamma}{R_p} \varepsilon^{v-1} \right), \quad (10)$$

где $\Delta\gamma$ – энергия адгезии, остальные обозначения те же, что в п. 1.2. В общем случае $\Delta\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}$, где γ_1 и γ_2 – поверхностные энергии контактирующих тел; γ_{12} – энергия межфазной границы. Для одинаковых идеально сопряженных кристаллических решеток и атомарно чистых поверхностей контактирующих тел $\gamma_{12} = 0$, $\gamma_1 = \gamma_2$ и $\Delta\gamma = 2\gamma_1 = 2\gamma_2$.

При $\Delta\gamma = 0$ (отсутствие адгезии) формула (10) совпадает с формулой (6) для модели Крагельского – Демкина.

Относительная фактическая площадь контакта связана с относительной деформацией уравнением опорной кривой $\eta_r = \alpha t_m \varepsilon^v$, поскольку в ДМТ-модели площадь контакта герцевская.

Характерный пример зависимости основных характеристик контакта от номинального давления согласно адгезионной модели дискретного контакта, основанной на ДМТ-теории, приведен на рис. 5. Расчет характеристик контакта выполнен для параметров микрогеометрии поверхности стальных концевых мер длины (так называемой плитки Иогансона), имеющих очень малую шероховатость.

Как следует из рис. 5, при малых значениях внешнего контактного давления p_n величины деформации и площади контакта существенно превышают герцевские значения из-за влияния адгезионных сил притяжения. По мере роста внешнего контактного давления роль адгезионных сил уменьшается и значения характеристик контакта все меньше отличаются от рассчитанных по классической модели дискретного контакта без учета влияния адгезии.

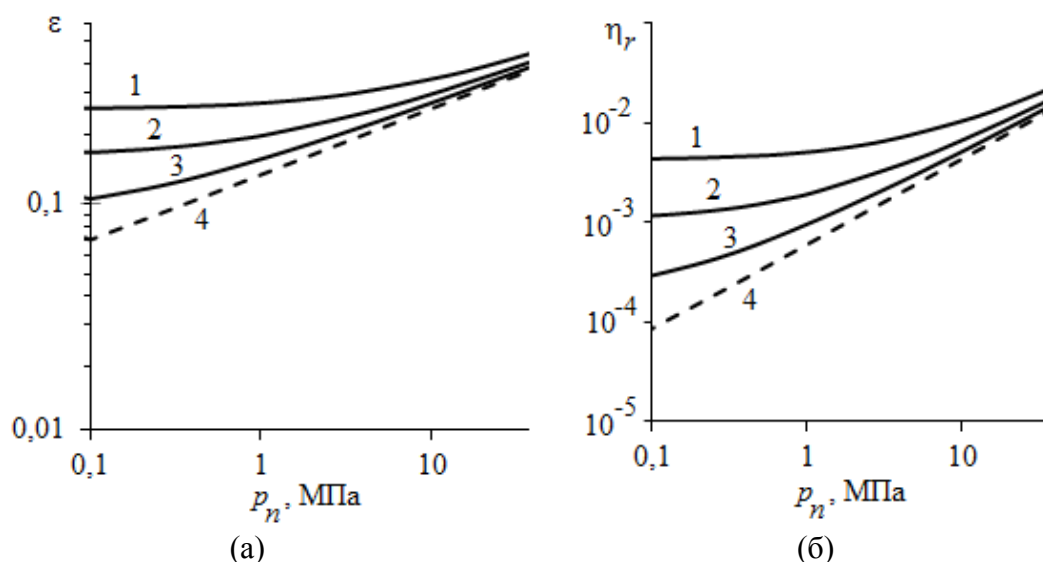


Рис. 5. Влияние адгезионных сил по ДМТ-модели: на относительную деформацию контакта ε (а); относительную площадь фактического контакта η_r (б); 1 – энергия адгезии $\Delta\gamma = 0,5$ Дж/м²; 2 – $\Delta\gamma = 0,25$ Дж/м²; 3 – $\Delta\gamma = 0,1$ Дж/м²; 4 – $\Delta\gamma = 0$ (контакт по Герцу)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как отмечают авторы работы [7], модель дискретного контакта Крагельского – Демкина обладает достаточной гибкостью и простотой, что объясняет ее широкое распространение. Основные параметры модели определяются экспериментально и содержат достаточно обширную информацию о поверхности, что позволяет успешно применять ее к решению многих инженерных задач механики дискретного трения.

Достоинством модели является ее способность к модернизации по мере появления новых технических возможностей для исследования поверхности, как это показано в данной статье на примере учета влияния субшероховатости и адгезионного взаимодействия. Помимо этих примеров, модель Крагельского – Демкина была успешно применена к описанию дискретного контакта сферических и цилиндрических поверхностей [14], контактного взаимодействия в условиях больших номинальных давлений [15], процессам абразивного изнашивания и абразивной обработки материалов [16, 17].

ЛИТЕРАТУРА

1. Демкин Н.Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей. М.: АН СССР, 1962. 112 с.
2. Kragelsky I.V., Demkin N.B. Contact area of rough surfaces // *Wear*. 1960. V. 3. Is. 3. P. 170–187.
3. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces // *Proceedings of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences*. 1966. V. 295. № 1442. P. 300–319.
4. Демкин Н.Б. Контактирование шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 227 с.
5. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.

6. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Основы механики и физики контактного взаимодействия, трения и изнашивания технических поверхностей: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2025. 172 с.

7. Свириденко А.И., Чирик С.А., Петроковец М.И. Механика дискретного фрикционного контакта. Минск: Навука і тэхніка, 1990. 272 с.

8. Григорьев А.Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей. Минск: Беларуская навука, 2016. 247 с.

9. Болотов А.Н., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов в триботехнических системах: монография / под общ. ред. В.В. Измайлова. Тверь: ТвГТУ, 2019. 164 с.

10. Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D. Surface energy and the contact of elastic solids // *Proceedings of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences*. 1971. V. 324. № 1558. P. 301–313.

11. Derjaguin B.V., Muller V.M., Toporov Yu.P. Effect of contact deformations on the adhesion of particles // *Journal of Colloid and Interface Science*. 1975. V. 53. P. 314–326.

12. Измайлов В.В. Расчет характеристик дискретного адгезионного контакта // *Трение и износ*. 2014. Т. 35. № 5. С. 518–526.

13. Shi X., Zhao Y.P. Comparison of various adhesion contact theories and the influence of dimensionless load parameter // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2004. V. 18. № 1. P. 55–68.

14. Demkin N.B., Izmailov V.V., Korotkov M.A. Estimation of the deformation of rough spheres and cylinders in compression // *Wear*. 1976. V. 39. № 1. P. 63–82.

15. Demkin N.B., Izmailov V.V. Plastic contact under high normal pressure // *Wear*. 1975. V. 31. № 2. P. 391–402.

16. Новикова О.О., Болотов А.Н., Новиков В.В. Моделирование износа пары трения «алмазосодержащая минералокерамика – керамика» // *Вестник машиностроения*. 2024. Т. 103. № 4. С. 299–304.

17. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Обработка технической керамики абразивным алмазным инструментом // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 13–21.

Для цитирования: Измайлов В.В. Н.Б. Демкин и его вклад в развитие трибологии // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 2 (30). С. 6–18.

N.B. DEMKIN AND HIS CONTRIBUTION TO THE DEVELOPMENT OF TRIBOLOGY

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

The model of discrete contact between technical surfaces, developed by Nikolai Borisovich Demkin and his scientific adviser Igor Viktorovich Kragelsky, is examined. This model made a significant contribution to the advancement of tribology. Due to its flexibility and relative simplicity, the model has become widely used in the theoretical description of various contact processes, including friction, wear, contact conductivity, contact stiffness, and

joint tightness. The model's underlying assumptions are formulated, and its application to calculating the key performance characteristics of contact joints – the actual contact area and contact deformation – is demonstrated. Examples of successful model development, taking into account new capabilities of surface research tools, are presented, including applications to calculating contact characteristics, taking into account adhesive interactions, the influence of nanoroughness, and others.

Keywords: technical surfaces, discrete contact, contact area, contact deformation, theoretical model.

Поступила в редакцию/received: 02.02.2026; после рецензирования/revised: 10.02.2026;
принята/accepted: 11.02.2026

УДК 621.82

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-2-18-40

ВКЛАД ТВЕРСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ПО ТРИБОЛОГИИ В СОЗДАНИЕ И ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

© Болотов А.Н., 2026

Магнитные смазочные материалы (магнитные смазочные жидкости) представляют собой инструмент для создания инженерных систем следующего поколения – активных, адаптивных и высоконадежных. Их применение наиболее оправдано в специальной технике, где решающее значение имеют не стоимость, а уникальные функциональные возможности: герметичность, управляемость и работа в экстремальных условиях. В серийном машиностроении использование магнитных смазочных материалов пока сдерживается экономическими факторами, однако для ответственных узлов (аэрокосмическая отрасль, энергетика, прецизионное оборудование) оно весьма эффективно. Приведен краткий обзор исследований Тверской научной школы в области магнитных жидкостей, предназначенных для смазывания узлов трения машин. Практическое использование магнитных смазочных жидкостей способствует снижению износа деталей, улучшению энергоэффективности оборудования и повышению его надежности. Раскрыта взаимосвязь между химическим составом смазочных жидкостей, структурной стабильностью и их эксплуатационными свойствами, что позволяет целенаправленно разрабатывать композиции с заданными параметрами, адаптированными под различные условия работы узлов трения. Создан комплексный теоретико-экспериментальный базис для дальнейших исследований в области магнитных смазочных жидкостей. В фокусе внимания – влияние магнитного поля на физико-химические и триботехнические свойства традиционных и нанодисперсных магнитных масел. Особое значение придается анализу наноструктур и механизмов изменения смазочных характеристик под воздействием магнитного поля. Систематизированы основные достижения и обозначены перспективы развития магнитных смазочных жидкостей, что важно для улучшения эксплуатационных свойств в машиностроении и других отраслях.

Ключевые слова: магнитные смазочные жидкости, Тверская научная школа, трибология, магнитные наночастицы, коллоидная устойчивость, магнитожидкостный подшипник.

ВВЕДЕНИЕ

Трибология магнитных смазочных жидкостей представляет собой мультидисциплинарное направление, где изучение взаимодействия магнитных наночастиц с базовыми смазывающими средами играет ключевую роль. Особое внимание уделяется синтезу стабильных магнитных смазочных материалов, которые способны значительно улучшать смазочные свойства, снижая износ и трение деталей в механизмах. Тверской государственный технический университет (ТвГТУ) стал центром интенсивных исследований в данной области, направленных на разработку новых составов и технологий.

Важно отметить, что глобальная динамика публикаций по магнитным жидкостям (ferrofluids) и их смазочным свойствам демонстрирует экспоненциальный рост с 2000 г., обусловленный развитием нанотехнологий и триботехники, с пиком после 2015 г. (таблица).

Динамика публикаций (Scopus/WoS) с 2000 г. по настоящее время

Годы	Количество публикаций, тыс.	Ключевые тренды
2000...2005	1...2	Базовые свойства, первые применения
2006...2010	3...5	Магнитные уплотнения, смазка в вакууме
2011...2015	6...10	Наноструктуры, биомедицина
2016...2020	12...20	Триботехника, энергетика, MR-жидкости
2021...2026	25...40	Высокотемпературные составы, космос

Общий объем к 2026 г. превышает 40 000 работ, с ежегодным приростом 15–25 %; лидеры – Китай, США, Индия (60 % публикаций). Фокус сместился от фундаментальной физики к промышленным смазкам и nanoусиленным системам.

Важность магнитных смазочных жидкостей обусловлена их способностью реагировать на внешнее магнитное поле, что позволяет контролировать и оптимизировать процессы трения и износа. Тверская научная школа сосредоточилась на создании магнитных смазочных жидкостей с улучшенной коллоидной устойчивостью и повышенными смазочными свойствами, что является необходимым условием их долговременного функционирования в технических системах. Исследования включают подбор полимерных стабилизаторов, обеспечивающих надежную дисперсию магнитных частиц и препятствующих их агрегации. Показана роль различных присадок при трении в различных режимах смазки.

В работе рассматриваются методы синтеза магнитных наночастиц, таких как оксид железа, внедренных в минеральные, синтетические и полиальфаолефиновые масла. Особое внимание уделяется физико-химическим характеристикам этих систем, включая размер частиц, степень их намагниченности и химическую пассивацию поверхности. Разработка технологии получения магнитных смазочных жидкостей с

заданными параметрами структуры и стабильности стала фундаментом для изучения их трибологических свойств.

Исследования, проведенные в ТвГТУ, посвящены экспериментальному анализу фрикционных характеристик магнитных смазочных жидкостей [1–4] при различных условиях нагрузки и скоростей скольжения. Результаты показывают, что введение магнитных частиц в традиционные смазочные материалы снижает коэффициент трения и износ, однако эффективность этих процессов напрямую зависит от стабильности дисперсии и взаимодействия частиц с поверхностями. В связи с этим изучается влияние присадок и полимерных стабилизаторов на создание прочных смазочных пленок, обеспечивающих долговременную защиту трущихся поверхностей.

В рамках обзора акцент сделан на взаимосвязи состава магнитных смазок и их трибологических характеристик, что позволяет определить оптимальные параметры для конкретных технических задач. Применение различных типов полимеров для стабилизации магнитных наночастиц рассматривается как перспективное направление, позволяющее расширить функциональные возможности смазочных материалов и повысить их адаптивность к изменяющимся эксплуатационным условиям.

В работах Тверской школы используются оригинальные приборы для комплексных триботехнических исследований, для проведения вискозиметрических исследований с целью оценки влияния условий синтеза и термообработки на вязкость и стабильность магнитных масел, а также для магнитометрии параметров намагниченности и устойчивости нанодисперсий [1, 2, 5]. Дополняют анализ рентгеноструктурные методы, электронная микроскопия и трибологические тесты под реальными условиями эксплуатации. Особое значение имеет соблюдение технологических условий, прописанных в технических требованиях, что гарантирует воспроизводимость свойств и высокое качество магнитных масел.

Рассматривается также технологическая составляющая, связанная с интеграцией магнитных смазок в машиностроительные узлы [5–7]. Были проведены исследования, демонстрирующие улучшение эксплуатационных характеристик узлов трения благодаря управляемому магнитному воздействию, позволяющему регулировать вязкость и адгезионные свойства наносмазок в режиме реального времени. Эта особенность открывает новые возможности для повышения энергоэффективности и надежности машин и механизмов.

Основные направления дальнейших исследований Тверской научной школы включают изучение механизмов формирования смазочной пленки магнитных жидкостей, оптимизацию состава полимерных стабилизаторов и поиск новых видов наночастиц с заданными магнитными свойствами. Приоритетными задачами являются развитие численных моделей взаимодействия магнитных смазочных жидкостей с поверхностями и скольжением, а также интеграция экспериментальных данных для прогноза долговечности компонентов.

Таким образом, анализ существующих работ тверских ученых открывает широкое поле для продуктивных исследований, направленных на разработку инновационных смазочных материалов с магнитными свойствами. Это имеет прямое практическое значение для повышения эффективности и надежности машин, задействованных в сложных технических и производственных процессах.

Целью настоящего обзора является систематизация многолетних исследований Тверской школы, охватывающих полный цикл: от фундаментальных принципов синтеза и стабилизации магнитных смазочных жидкостей через детальное изучение их физико-химических и трибологических свойств до разработки концепций их практического применения и оценки перспектив.

ИСТОРИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ РАЗВИТИЯ ТВЕРСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ПО ТРИБОЛОГИИ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Начнем с истоков Тверской научной школы, которая получила свое развитие в Тверском государственном техническом университете благодаря объединению усилий специалистов в области физики, химии и машиностроения. В конце XX в. здесь возник интерес к новым смазочным материалам, которые могли бы повысить надежность и срок службы узлов трения в условиях растущих эксплуатационных требований к машинам. Первоначально исследования были сосредоточены на традиционных проблемах трибологии, однако стремление к инновациям привело к изучению эффектов взаимодействия магнитных полей с дисперсными системами, что стало трамплином для формирования направления, связанного с магнитными смазочными жидкостями.

На первом этапе развития Тверской научной школы значительное внимание уделялось теоретико-экспериментальному изучению процессов трения и износа, разработке магнитопассивных опор, а также влиянию магнитного поля на свойства жидких сред. Формировалась база знаний, необходимая для понимания межфазных процессов и механизмов изменения вязкости и адгезионных характеристик смазочных материалов под воздействием магнитных сил. Одновременно с этим развивалась экспериментальная база, позволившая получить первые данные об особенностях работы магнитных жидкостей в условиях различных режимов трения.

В последующие годы усилия центра сосредоточились на междисциплинарном подходе к проблеме – объединении материаловедения, магнитной физики и трибологии для проведения комплексного анализа свойств магнитных смазочных жидкостей. Это позволило повысить научный уровень исследований и заложить основу для интенсивных экспериментов с вариацией физических и химических параметров рассматриваемых систем. Важным этапом стало привлечение молодых исследователей, что обеспечило преемственность традиций и расширение спектра применяемых научных методов.

Исторический прогресс Тверской школы тесно связан с мировыми тенденциями развития нанотехнологий и функциональных жидкостей. Усвоение новых научных концепций и адаптация их под локальные условия работы лабораторий позволили обеспечить постоянное обновление подходов к созданию магнитных смазок. Разработка методик оценки и контроля качества, а также последующее внедрение компьютерного моделирования перекликались с актуальными трендами в глобальной трибологической науке, что отражено в актуальных исследованиях университета. Этот сдвиг векторных направлений сформировал основу для глубокой интерпретации свойств магнитных смазочных жидкостей с учетом их практических возможностей.

Исторический контекст развития научной школы в Твери определил комплексную платформу для дальнейшего изучения и оптимизации магнитных смазочных жидкостей на основе междисциплинарного подхода. Особенности формирования школы создали условия и предпосылки для успешного сочетания фундаментальных исследований и технологических разработок, в том числе для современных исследований в этой области.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СИНТЕЗУ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТВЕРСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Современные методы синтеза магнитных смазочных жидкостей в ТвГТУ заключаются в сочетании химического осаждения магнитных наночастиц с последующей функционализацией их поверхности полимерными и поверхностно-

активными стабилизаторами. Основной целью является обеспечение высокой коллоидной стабильности и предотвращение агрегации частиц в смазочной среде.

Процесс осаждения частиц осуществляется в водных или органических средах, где контролируется размер частицы и степень их кристалличности. Далее на поверхность наночастиц наносят тонкие слои поверхностно-активные вещества (ПАВ) или полимеров, обеспечивающих необходимую функциональность и устойчивость.

Важно отметить, что ПАВ, в частности ионогенные и жирнокислотные компоненты, играют важную роль в стабилизации коллоидной структуры и влияют на механическую составляющую износа, улучшая адгезию и распределение масла по контактными поверхностям. Однако их концентрация и химический состав требуют тщательной оптимизации, поскольку избыточное содержание ПАВ может ухудшать смазочные и вязкостные характеристики и способствовать нежелательной агломерации частиц [3].

Авторами экспериментально исследована коллоидная устойчивость магнитных жидкостей на основе слабополярных носителей с неионогенным ПАВ-стабилизатором (олигоэфиром) и наночастицами магнетита и предложен диэлектрический критериальный параметр [8], отражающий относительное различие диэлектрических проницаемостей стабилизатора и дисперсионной среды. Показано, что уменьшение параметра сопровождается ростом адсорбции ПАВ на частицах и увеличением коллоидной устойчивости, а повышение диэлектрической проницаемости среды относительно стабилизатора усиливает десорбцию молекул ПАВ, разрыхляет адсорбционный слой и снижает стерический вклад в стабилизацию, что приводит к ухудшению или потере устойчивости. На этой основе обосновано, что для обеспечения устойчивости диэлектрические проницаемости стабилизатора и дисперсионной среды должны слабо отличаться, и предложенный критерий может служить практическим ориентиром при выборе ПАВ для магнитных жидкостей.

Ключевой технологический этап – синтез полимерных сольватных оболочек непосредственно на поверхности магнитных частиц по предложенной в ТвГТУ технологии – осуществляется в диэфирах карбоновой кислоты с использованием водных растворов 12-оксистеариновой или 12-гидрокси- Δ^9 -9-октадеценовой кислот. Процесс включает нагрев смеси с последующим удалением воды и выдержкой при температуре 110...180 °C в течение 10...40 ч, что обеспечивает формирование устойчивой оболочки и регулирует вязкость готового магнитного масла в диапазоне 0,06...4 Па·с. Такая методика позволяет достичь намагниченности насыщения магнитных наномасел в пределах 25...35 кА/м при высокой седиментационной стабильности и устойчивости к воздействию неоднородных магнитных полей с градиентом до $5 \cdot 10^7$ А/м² [5, 9–11].

Важным элементом методологии является тщательный подбор носителя. В ТвГТУ акцентируют внимание на использовании масел с различной вязкостью и химическим составом, в том числе синтетических базовых жидкостей и минеральных масел, что влияет на взаимодействие с полимерным слоем и магнитными частицами. Это позволяет формировать магнитные смазки с заданными реологическими характеристиками и устойчивостью к температурным воздействиям.

Технологическими методами повышения эффективности магнитных масел являются очистка и защита поверхностей трения [3]. Значительный разброс свойств магнитных смазочных жидкостей от партии к партии заставил исследователей разработать технологические приемы их «доочистки». Эксперименты подтвердили, что на трибосвойства негативно влияют два фактора: избыток свободного (неадсорбированного) ПАВ-стабилизатора в дисперсионной среде и наличие крупных прочных агломератов магнитных частиц.

Удаление избытка ПАВ: методом замены дисперсионной среды (флокуляция с последующей пептизацией в чистом растворителе) удаляли свободный стабилизатор. Это предотвращало активацию им коррозионно-механического износа.

Удаление крупных агломератов: методом магнитной сепарации в неоднородном поле с градиентом $0,5 \dots 3 \text{ А/м}^2$ крупные агломераты осаждались на дно кюветы.

Комбинированная обработка позволила значительно улучшить свойства магнитных смазочных жидкостей на основе диоктилсебагината (ДОС): коэффициент трения уменьшился примерно на 35 % (с 0,25 до 0,17), а диаметр пятна износа – почти на 45 % (с 0,68 до 0,38 мм). Одновременно снизилась вязкость масла.

В результате комбинирование контролируемого синтеза магнитных наночастиц, выбор высокоэффективных полимерных стабилизаторов, жидкости-носителя и оптимизация технологических параметров формируют современные магнитные смазочные жидкости со стабильной структурой и адаптивными свойствами.

СОСТАВ И СТРУКТУРА МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Магнитные смазочные жидкости представляют собой сложные многокомпонентные системы, в основе которых лежит дисперсия магнитных наночастиц в смазочной базе. Основной структурный элемент таких жидкостей – магнитные частицы, чаще всего представляющие собой оксиды железа, такие как магнетит (Fe_2O_3) и маггемит ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Эти наночастицы обладают сильными магнитными свойствами при сохранении низкой токсичности и высокой химической стабильности. Размер частиц обычно варьируется в диапазоне от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров, что обеспечивает большую удельную поверхность и активное взаимодействие с окружающей средой.

Трибологические свойства магнитных смазочных жидкостей носят комплексный и неоднозначный характер, определяясь взаимодействием нескольких факторов: концентрацией и размером магнитных частиц, наличием присадок, свойствами дисперсионной среды и параметрами внешнего магнитного поля. Эксперименты показали [12, 13], что влияние магнитной фазы на износ сильно зависит от твердости материалов пары трения. Для относительно мягких пар, таких как сталь – бронза или сталь – медь, существует оптимальная концентрация магнитных наночастиц около 2 мас.%. В этом диапазоне наблюдается минимальный износ, что объясняется конкуренцией двух процессов. С одной стороны, мелкие частицы магнетита могут внедряться в микродефекты поверхностного слоя или закрепляться на нем за счет адгезии, выполняя функцию упрочняющего наполнителя и увеличивая фактическую площадь контакта. С другой стороны, при более высоких концентрациях частицы начинают агрегировать, формируя конгломераты, которые действуют как абразив, увеличивая износ и повышая коэффициент трения. Для твердых материалов, например пары сталь ШХ15 – сталь ШХ15, упрочняющий эффект выражен слабо и износ с ростом концентрации частиц носит монотонно возрастающий абразивный характер.

Основой для магнитных наночастиц служат носители – минеральные или синтетические масла, полиальфаолефины и эфирные масла, обладающие хорошими смазочными свойствами и термостойкостью. Выбор носителя определяет вязкостно-текучие характеристики смазочной жидкости и влияет на взаимодействие с поверхностью трения. Носитель должен обеспечивать хорошую совместимость с магнитными наночастицами и полимерными стабилизаторами, препятствуя их агрегации и осаждению. Важным параметром является химическая инертность базы по отношению к наночастицам во избежание нежелательных окислительных или гидролитических процессов.

Было установлено [9], что введение магнитного наполнителя в углеводородные масла (ВМ-4, И-20А), как правило, ухудшает их смазочные свойства. Например, коэффициент трения и износ для магнитных масел на основе ВМ-4 были значительно выше, чем у базового масла. Это связывают с высокой испаряемостью и вязкостью таких композиций.

Кремнийорганические жидкости (ПЭС-5, ПЭС-2ВВ) показали одни из лучших результатов. Смазочные свойства магнитных масел на их основе были сравнимы или даже лучше, чем у чистой дисперсионной среды. Они обладают широким температурным диапазоном, низкой испаряемостью и стабильной вязкостью.

Диэфиры карбоновых кислот: ДОС, дибутилсебагината (ДБС), диоктилфталата (ДОФ) – продемонстрировали высокие смазочные свойства, близкие к свойствам своих основ. Особенно выделяется магнитное масло на основе ДОС, которое рекомендовано для практического применения (в том числе в высокоскоростных подшипниках) благодаря оптимальному сочетанию низкой вязкости, умеренной испаряемости и хороших трибологических характеристик. Важно, что свойства магнитных смазочных жидкостей на диэфирах сильно зависят от коллоидной устойчивости: составы с низкой устойчивостью (например, на основе ДБС) показывают износ на 50...60 % выше, чем чистая основа.

Фторорганические жидкости (ПОМ-5) проявили уникальный положительный антифрикционный эффект при введении магнитного наполнителя, особенно в области средних нагрузок. Предполагается, что частицы с особо прочной сольватной оболочкой в этой среде препятствуют агломерации. Однако их противоизносные свойства резко ухудшаются при температурах выше 150 °С из-за термического разрушения оболочек и потери коллоидной стабильности. Главные недостатки – высокая стоимость и сложность введения присадок. Общий вывод: смазочные свойства магнитного масла в первую очередь определяются свойствами его дисперсионной среды. Чем выше трибологические характеристики основы, тем эффективнее будет и магнитная смазочная жидкость.

На трехпальчиковой машине МТП было показано, что повышение качества дисперсионной среды и введение оптимизированных присадок позволяют добиться значительного снижения износа и коэффициента трения при широком диапазоне контактных давлений и скоростей скольжения [14].

Важной особенностью состава магнитных масел является необходимость баланса между вязкостью и намагниченностью. Слишком высокая вязкость, возникающая при использовании полимерных оболочек с большой молекулярной массой, снижает объемную долю магнитных частиц и ухудшает магнитные характеристики, что отрицательно сказывается на триботехнических свойствах.

Состав магнитных масел дополнительно обогащен специально подобранным комплексом присадок, направленных на улучшение антифрикционных и противоизносных характеристик смазочного материала. Эти добавки также способствуют замедлению деградации дисперсионной среды под воздействием температуры и времени, что увеличивает срок эксплуатации смазочной жидкости и сохраняет ее функциональность в разнообразных эксплуатационных условиях [15].

Добавки, включаемые в состав магнитных смазок, выполняют несколько функций. Традиционные противоизносные и антифрикционные присадки могут усиливать защиту поверхностей трения, стимулировать образование прочных смазочных пленок. Однако специфическую роль в магнитных системах выполняет добавление полимерных стабилизаторов, обеспечивающих коллоидную устойчивость.

Структурно полимерные цепи формируют вокруг магнитных частиц оболочку, толщина и плотность которой регулируется по длине и химическому составу молекул. Такая оболочка не только стабилизирует коллоид, но и улучшает совместимость магнитных частиц с органической смазочной средой. В связи с этим формируется микро- и наноуровневая структура, где магнитные частицы распределены равномерно и изолированы друг от друга посредством полимерного слоя. Это обеспечивает стабильность реологических и магнитных свойств в динамических условиях эксплуатации.

В итоге триботехнические характеристики магнитных смазочных материалов определяются синергетическим эффектом, порождаемым взаимодействием компонентов состава, и их реакцией на магнитное поле. Формирование нанокластеров и магнитоуправляемых структур оказывает влияние на вязкость, износостойкость и коэффициент трения, а оптимизация состава смазок с учетом поведения в магнитном поле обеспечивает повышение надежности и эффективности смазывания в различных условиях эксплуатации. Таким образом, комплексный анализ состава магнитных смазочных жидкостей и их поведения под магнитным воздействием – ключевой элемент в создании перспективных высокоэффективных смазочных систем.

АНАЛИЗ КОЛЛОИДНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И РОЛЬ ПОЛИМЕРОВ В МАГНИТНЫХ СМАЗКАХ

Коллоидная устойчивость определяется способностью магнитных наночастиц сохранять равномерное распределение в смазочной жидкости без образования агломератов и выпадения в осадок. Полимерные молекулы, адсорбированные на поверхности частиц, создают стабилизирующий слой, который препятствует их сближению за счет нескольких механизмов. Во-первых, возникает стерическое барьерное воздействие: цепи полимеров образуют физический экран, мешающий контактам между частицами. Во-вторых, в случае ионизированных полимеров или присутствия заряженных групп развивается электростатическое отталкивание, поддерживающее частицы в подвешенном состоянии.

Кроме того, полимерные слои улучшают совместимость частиц с основным масляным носителем, снижая межфазное натяжение и способствуя образованию однородной дисперсии. Такой взаимодополняющий эффект полимерной оболочки помогает противостоять динамическим процессам агрегации, вызванным механическими воздействиями и колебаниями температуры в условиях эксплуатации.

Значение коллоидной устойчивости напрямую связано с эксплуатационными характеристиками магнитных смазочных жидкостей [16]. Неустойчивые дисперсии быстро приводят к выпадению магнитных частиц, что снижает эффективность смазывания и уменьшает способность смазки образовывать прочные пленки на поверхностях трения. Это в свою очередь приводит к увеличению коэффициента трения и ускоренному износу деталей.

Важнейшим эксплуатационным свойством магнитной жидкости является ее структурная стабильность в неоднородном магнитном поле, которое создается в рабочих зазорах триботехнических узлов для удержания смазки. Для количественной оценки этой стабильности авторами разработана специальная методика [17], основанная на использовании прибора с клиновидным магнитным зазором, создающим поле с высокой пространственной неоднородностью. В кювете с исследуемой жидкостью, помещенной в зону максимального градиента поля, происходит перераспределение магнитных частиц: они перемещаются в область с большей напря-

женностью, что фиксируется по росту локальной намагниченности. Динамика этого процесса, а именно скорость достижения равновесного значения намагниченности ($J_{\square\square}$), служит мерой седиментационной устойчивости. На основании экспериментальных данных предложен интегральный критерий устойчивости ω , равный отношению намагниченности исходной однородной жидкости к равновесной намагниченности в неоднородном поле. Жидкости с ω , близким к единице, например на основе ПЭС-5 или ПОМ, демонстрируют высокую устойчивость к расслоению. Исследования выявили критический порог: при градиенте магнитного поля $|\nabla H|$, превышающем $4 \cdot 10^8$ А/м², в жидкости начинается необратимая агрегация частиц, расстояние между которыми сокращается настолько, что силы межчастичного взаимодействия приводят к образованию прочных агломератов и потере коллоидной стабильности.

В трибоузлах требуется защита сопряженной поверхности (обычно изготавливаемой из более мягких, немагнитных сплавов – алюминия, бронзы) от абразивного воздействия таких агломератов. Для этого была успешно апробирована технология микродугового оксидирования (МДО) алюминиевых сплавов (например, Д16) [18]. Полученное корундовое покрытие толщиной ~ 100 мкм имело высокую микротвердость (до 12...20 ГПа у границы с основой) и отличную адгезию. Трибоиспытания пары «сталь У8А – покрытие МДО» под нагрузкой 1,5 ГПа показали исключительно низкие коэффициент трения (0,09) и интенсивность износа ($0,25 \cdot 10^{-9}$), что в разы лучше, чем у пар с бронзой или латуной.

Понимание особенностей взаимодействия полимеров и ПАВ с магнитными наночастицами и механизмов стабилизации является основой для дальнейшего изучения трибологических свойств систем. Коллоидная устойчивость предопределяет эффективность формирования смазочной пленки, ее прочность и способность адаптироваться к изменению условий нагрузки и скорости скольжения. Таким образом, именно стабильность дисперсии магнитных смазок создает фундамент для повышения надежности и долговечности узлов трения, что напрямую влияет на работу систем трения.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАСЕЛ

Ключевой особенностью магнитных масел является их взаимодействие с внешним полем. Магнитное поле не только удерживает смазку в зоне контакта, но и активно влияет на процессы в граничном слое [19, 20].

Особую роль в модуляции трибологических характеристик играет неоднородное магнитное поле. Однако исследования показывают, что это влияние неоднозначно. С одной стороны, неоднородное магнитное поле, создаваемое в зоне контакта, выполняет полезные функции: удерживает смазку на дорожке трения, способствует ее нанесению и восстановлению пленки смазки. Поле вызывает перераспределение ферромагнитных частиц, увеличивая их концентрацию у поверхности трения. Это, в свою очередь, приводит к локальному повышению концентрации свободных молекул ПАВ-стабилизатора, которые адсорбируются на поверхности металла. В результате ускоряется формирование прочной адсорбционной смазочной пленки и усиливается эффект Ребиндера – явление адсорбционного понижения прочности и пластификации поверхностного слоя. Экспериментально подтверждено [14, 21, 22], что увеличение скорости пластификации поверхности стали в градиентном

магнитном поле приводит к снижению силы трения на 10...15 % при невысоких скоростях скольжения.

С другой стороны, в наших работах выявлен принципиально важный магнитотрибологический эффект. Оказалось, что воздействие даже относительно слабых однородных магнитных полей (с напряженностью около $3 \cdot 10^2$ А/м) приводит к ухудшению противоизносных свойств масла. Эффект усиливается с ростом напряженности. Причина кроется в снижении агрегативной устойчивости: в однородном поле усиливается диполь-дипольное взаимодействие частиц, что провоцирует их частичную флокуляцию. Образующиеся агломераты размером в несколько микрон действуют как абразив, резко увеличивая износ поверхностей. Структурные изменения наиболее интенсивны в первые часы после включения магнитного поля, что критично для начального периода работы узлов трения. Значит, положительный эффект от магнитного поля может быть нивелирован при высоких градиентах поля, провоцирующих агломерацию.

Интересно, что попытки обнаружить влияние магнитного поля на молекулярную структуру самой дисперсионной среды (углеводородных и синтетических масел) методами диэлектротомии и ИК-спектроскопии не дали существенных результатов. Изменения поляризуемости или поглощения оказались ничтожными (в пределах погрешности измерений). Это подтверждает, что основные процессы, определяющие трибологию магнитной смазочной жидкости, связаны именно с поведением магнитной дисперсной фазы, а не с изменением свойств жидкости-носителя.

Цикл работ [23, 24] был посвящен экспериментальному исследованию влияния стационарного магнитного поля на квазихрупкое разрушение серого чугуна СЧ35 при вдавливании шарового индентора. Показано, что намагничивание образцов до состояния, близкого к магнитному насыщению, приводит к анизотропии разрушения: более чем в 85 % случаев магистральные радиальные трещины распространяются вдоль силовых линий магнитного поля, тогда как без поля все направления равновероятны. Установлено, что критическая сила внедрения индентора для инициирования разрушения уменьшается с $15,4 \pm 0,9$ кН для размагниченных образцов до $13,4 \pm 0,8$ кН для намагниченных, т.е. требуется примерно на 10...15 % меньшая нагрузка. На основе теории Гриффитса и оценки магнитного давления на стенки микротрещин показано, что вклад магнитных сил может достигать более 10 % от разрушающих напряжений, чем объясняется снижение критического напряжения и преимущественный рост трещин вдоль поля. Сделан вывод о возможности использования магнитного поля как для искусственного стимулирования хрупкого разрушения ферромагнитных деталей, так и для его затруднения, а также отмечена необходимость дальнейших исследований для уточнения механизма разрушения в магнитном поле на более широком классе ферромагнитных материалов.

В наших статьях [25, 26] представлена новая физическая модель адгезионного изнашивания поверхностей из ферромагнитных материалов в условиях воздействия магнитного поля. На основе энергетического подхода предложено учитывать влияние магнитостатических сил на процесс отделения микрочастиц износа. Показано, что магнитное поле повышает критические механические напряжения, необходимые для разрушения адгезионных связей, что приводит к снижению интенсивности износа в 1,5...4 раза. Модель также предсказывает увеличение характерного размера частиц износа в магнитном поле. Полученные теоретические выводы согласуются с известными экспериментальными данными и могут быть использованы для

прогнозирования долговечности триботехнических узлов, работающих в магнитных полях.

В работе [27] экспериментально исследуется эффект изменения топографии поверхности магнитострикционного магнитопласта под действием внешнего магнитного поля. На основе композиционного материала с наполнителем из порошка TeFe_2 , обладающего гигантской линейной магнитострикцией ($\lambda_s = 2 \cdot 10^3$), показано, что магнитное поле напряженностью около 560 кА/м вызывает локальные и интегральные изменения шероховатости поверхности. Установлено, что для относительно гладких поверхностей ($R_a = 0,12 \dots 0,19$ мкм) относительное изменение высотных параметров шероховатости достигает 5...20 %, что в абсолютных величинах соответствует десяткам нанометров. Эффект проявляется только при отсутствии высоких контактных давлений (порядка десятков мегапаскалей) и зависит от состава, концентрации, размеров и ориентации магнитных частиц. Полученные результаты открывают возможности для бесконтактного управления трением, регулирования микродоз газовых потоков и управления смачиваемостью поверхностей в прецизионных технических системах.

Таким образом, параметры поля – его напряженность, однородность и длительность действия – оказывают комплексное влияние на триботехнические показатели магнитных масел и поверхностей трения [14, 15]. Практическое значение этих эффектов для инженерных применений заключается в возможности управления триботехническими характеристиками магнитных смазочных материалов за счет регулирования магнитного поля в реальном времени. Это открывает перспективы создания адаптивных смазочных систем, способных повысить ресурс и надежность работы узлов трения в машиностроении, приборостроении и других отраслях.

ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНЫХ МАСЕЛ ТВЕРСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛОЙ

Поверхностно-активные вещества, включая ионогенные кремнийорганические и жирные кислоты, стабилизируют коллоидную структуру магнитных масел, препятствуя агрегации наночастиц и седиментации наполнителя. Такое стабилизирующее действие снижает коррозионно-механическую составляющую износа металла, что подтверждается снижением микронеровностей и образованием задиров при триботехнических испытаниях. Полимерные оболочки на поверхности ферромагнитных частиц дополнительно уменьшают их склонность к агломерации, повышая как коллоидную устойчивость, так и противоизносные характеристики масла [6, 10, 27–29].

Отдельное внимание уделено коррозионным свойствам магнитных масел [30]. Интересно, что масла на основе кремнийорганических жидкостей (ПЭС-5, ХС-2-1) проявляют крайне низкую коррозионную активность в отношении меди, что объясняется образованием устойчивых сольватных комплексов между ПАВ и дисперсными частицами магнетита и снижением вследствие этого концентрации свободных агрессивных молекул. Причем умеренная контролируемая коррозия может играть положительную роль, способствуя регенерации модифицированных поверхностных слоев и снижению адгезионного износа.

Термостойкость магнитных масел также подвергается укреплению благодаря введению стабильных присадок и полимерных стабилизаторов, что снижает скорость окисления и коксообразования при длительной эксплуатации. Это особенно важно для смазочных материалов, функционирующих в условиях высоких температур и сложного магнитного поля, где стабильная структурная целостность масла обеспечивает сохранение трибологических свойств.

Исследование [31] испаряемости и термоокислительной стабильности проводилось на магнитных маслах на основе ДОС. Было установлено, что введение дисперсных частиц оксида железа, хотя и улучшает магнитные свойства масла, в то же время катализирует процессы окисления и полимеризации углеводородной основы, особенно при наличии двухвалентного железа. В начальной стадии нагрева до 100 °С наблюдается не снижение, а увеличение массы масла за счет активного поглощения кислорода и образования высокомолекулярных, низколетучих соединений. Применение антиокислительных присадок, таких как дифениламин, позволяет замедлить полимеризацию, однако при температурах выше 150 °С их эффективность снижается, что указывает на необходимость разработки новых термостабильных присадок для высокотемпературных применений.

Долговременные трибологические испытания магнитных смазочных жидкостей на основе силиконовой жидкости показали, что после 110...120 ч работы происходит значительное ухудшение смазочных свойств: возрастают момент трения и интенсивность износа пары бронза – латунь. Анализ показал снижение намагниченности насыщения масла, агломерацию магнитных частиц с образованием крупных кластеров размером до 10 микрон, а также разрушение сольватных оболочек, что в совокупности приводит к потере коллоидной стабильности и усилению абразивного износа.

Изучение структурных изменений в магнитных маслах на основе полиэтилсилоксана в процессе трения выявило рост диэлектрической проницаемости и вязкости, связанный, вероятно, с процессами трибокаталитической полимеризации. Инфракрасная спектроскопия подтвердила окисление магнетита в процессе эксплуатации, о чем свидетельствует появление характерных полос поглощения в области.

В работах [12, 21] исследован эффект адсорбционного пластифицирования поверхности стали У10А при использовании магнитных смазочных масел в неоднородном магнитном поле. Экспериментально показано, что нанесение магнитного масла на поверхность приводит к снижению ее микротвердости, причем эффект усиливается при наложении магнитного поля с градиентом, направленным к поверхности. Установлено, что пластифицирующее действие наиболее выражено на глубине до 1...1,5 мкм и достигает насыщения в течение нескольких часов. Магнитное поле ускоряет формирование граничного смазочного слоя за счет направленной концентрации магнитных дисперсных частиц в приповерхностной зоне. Полученные результаты позволяют целенаправленно влиять на триботехнические характеристики узлов трения, смазываемых магнитными жидкостями, и открывают возможности для управления фрикционным взаимодействием в ответственных технических системах.

В целом проведенные исследования позволили выявить ключевые факторы деградации магнитных масел в условиях эксплуатации – это окисление магнитной фазы, агломерация частиц, разрушение стабилизирующих оболочек и термоокислительная деструкция основы. Полученные данные формируют научную основу для целенаправленного проектирования составов магнитных масел с заданным ресурсом и оптимизации условий их применения в ответственных трибосопряжениях, что в конечном счете способствует созданию более надежных, износостойких и энергоэффективных машин и механизмов.

Магнитное масло в первом приближении рассматривается как суперпарамагнитная жидкость [25], процесс намагничивания которой описывается функцией Ланжевена. Учет полидисперсности частиц позволяет по кривой намагничивания

определять размеры наиболее крупных (по начальной магнитной восприимчивости) и наиболее мелких (по касательной к кривой в сильных полях) магнитных частиц.

Экспериментальная кривая намагничивания модели магнитной жидкости имеет некоторое расхождение с теоретической кривой Ланжевена. Расчетные диаметры частиц, определенные по магнитным измерениям, оказались меньше данных электронной микрофотографии. Это объясняется наличием немагнитного слоя олеата железа или окислением магнетита, что снижает эффективную намагниченность частицы, а также межчастичным магнитостатическим взаимодействием и образованием агломератов с компенсированными магнитными моментами, для намагничивания которых требуются более сильные поля.

Влияние трибовоздействий: после 140 ч эксплуатации магнитного масла на перфторполиэфирной основе его кривая намагничивания значительно снизилась, что свидетельствует о частичной потере магнитных свойств. Ухудшение свойств связано с десорбцией/деструкцией молекул ПАВ, окислением магнитной фазы, агломерацией частиц и отделением дисперсионной среды. Аналогичный эффект дало искусственное нагревание масла.

Влияние наполнителей: дисульфид молибдена (MoS_2) неожиданно вызвал повышение намагниченности образца. Исследователи объясняют это увеличением относительной концентрации магнитной фазы из-за седиментации частиц MoS_2 и уменьшением объема дисперсионной среды в отобранной пробе. Феррит бария ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) привел к снижению намагниченности. Предполагается, что монокристаллические частицы магнетита присоединяются к крупным частицам феррита и оседают вместе с ними, уменьшая концентрацию магнитной фазы в объеме.

Избыток олеиновой кислоты (ПАВ) изменяет полярность дисперсионной среды, снижая коллоидную стабильность и приводя к флокуляции. Это проявляется в уменьшении магнитной восприимчивости и более пологой кривой намагничивания. Концентрация магнитной фазы в масле, определенная по намагниченности насыщения, всегда несколько ниже гравиметрической из-за наличия немагнитных оболочек на частицах.

Значит, введение добавок в зависимости от их дисперсности, плотности и магнитного состояния может непредсказуемо изменить магнитные свойства магнитных смазочных жидкостей. При проектировании и эксплуатации узлов трения с магнитной смазкой необходимо учитывать возможную деградацию магнитных свойств и избегать экстремальных условий, приводящих к их необратимой потере.

ВЛИЯНИЕ ПРИСАДОК И НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА СМАЗОЧНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ МАСЕЛ

В магнитных смазочных маслах роль присадок и наполнителей выходит за рамки простого улучшения основных трибологических характеристик; они существенно влияют на структурную организацию магнитных наночастиц и стабильность коллоида. Полимерные присадки создают вокруг частиц стабилизирующие оболочки, которые препятствуют их агрегации и осаждению, сохраняя однородность дисперсии в течение длительного времени эксплуатации. Молекулы присадок, содержащие активные группы, обеспечивают формирование защитных поверхностных слоев на металле, уменьшая взаимодействие металла с абразивными частицами и ограничивая развитие задира даже при высоких нагрузках. Эффективность этих компонентов тесно связана с их способностью взаимодействовать с дисперсионной средой и магнитным наполнителем, при этом происходит комплексное улучшение трибологических свойств.

Неорганические наполнители и присадки включают вещества, такие как оксиды кремния, дисульфид молибдена, графит и различные твердые смазочные материалы в наноформе. Они воздействуют на микроструктуру магнитных смазок, улучшая реологические характеристики и повышая износостойкость за счет формирования прочных защитных пленок на поверхностях трения. Взаимодействие неорганических частиц с магнитными наночастицами часто сопровождается адсорбцией полимерных молекул на границе раздела фаз, что способствует улучшению распределения компонентов и стабилизации системы. Такой синергетический эффект позволяет комбинировать магнитные свойства с высокими противоизносными и антифрикционными характеристиками.

Модификация магнитных масел противоизносными и антифрикционными присадками (такими как МК-01, ДФ-11, «Алфанокс») и твердыми наполнителями (графит, дисульфид молибдена) имеет свою специфику [32]. Для достижения сопоставимого с традиционными маслами эффекта количество вводимой в магнитное масло присадки должно быть в 3...4 раза больше. Это связано с тем, что значительная часть молекул присадки может адсорбироваться на обширной поверхности магнитных наночастиц, вытесняя исходный стабилизатор и снижая свою свободную концентрацию в дисперсионной среде. Твердые наполнители, такие как графит или MoS_2 , в малых количествах (несколько процентов) могут улучшать фрикционные свойства. Однако их введение сопряжено с трудностями: резко возрастает вязкость, что затрудняет управление жидкостью магнитным полем, а немагнитные частицы могут выталкиваться полем из зоны трения. Решением может быть использование композитных частиц с магнитным ядром и твердосмазочной оболочкой.

Вязкость магнитных масел регулируется не только базовой жидкостью, но и наполнителями, которые влияют на структуру жидкокристаллических или вспомогательных комплексов в смазке. Присадки способны изменять текучесть среды, способствуя формированию устойчивых смазочных пленок с необходимой толщиной и механической прочностью. Экспериментальные данные Тверской научной школы свидетельствуют, что добавление определенных полимерных стабилизаторов уменьшает динамическую вязкость при комнатной температуре, облегчая запуск узлов трения, и одновременно повышает вязкость при высоких температурах, что защищает от перегрева и износа.

Экспериментальные исследования с использованием трибометрии и микроскопии подтверждают, что введение модифицированных полимерных присадок в магнитные масла снижает коэффициент трения до 15...25 % по сравнению с базовыми смазками без добавок. Анализ износа с помощью профилометрии и микроскопии поверхностей показывает уменьшение микроповреждений и шероховатости после испытаний, что свидетельствует о сформированных стойких защитных слоях. В ряде исследований Тверской научной школы наблюдался эффект саморегулирования вязкости под влиянием магнитного поля, который усиливается благодаря полимерным и неорганическим компонентам. Это позволяет эффективно адаптировать свойства смазочного слоя под изменяющиеся эксплуатационные условия.

Таким образом, комплексное использование полимерных и неорганических присадок в магнитных смазочных жидкостях, разработанных в ТвГТУ, формирует системы с улучшенными эксплуатационными характеристиками, обеспечивая высокую коллоидную стабильность, адаптивную вязкость, сниженный коэффициент трения и повышенную износостойкость. Эти результаты подтверждают перспективность заданного направления для создания эффективных смазочных материалов нового поколения.

СВОЙСТВА СОЗДАННЫХ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Целью исследований в этом направлении была разработка магнитных смазочных масел (магнитных смазочных жидкостей) на основе диэфиров карбоновых кислот и силоксановых жидкостей с высокими магнитными и триботехническими характеристиками, низкой вязкостью, минимальной испаряемостью и способностью функционировать в широком температурном диапазоне. Особое внимание уделялось улучшению коллоидной стабильности и износостойкости масел при воздействии магнитных полей.

В наших работах [5, 10] изложены результаты создания и исследований магнитных нанодисперсных смазочных масел на основе диэфиров карбоновых кислот (ДОС, ДОФ, ДБС) с улучшенными триботехническими и магнитными свойствами, низкой вязкостью, испаряемостью и широким температурным рабочим диапазоном.

Для получения стабильных магнитных масел с контролируемыми свойствами был использован метод синтеза в эмульсии, что позволило исключить недостатки традиционного метода (по Эльмору), такие как необходимость тщательной промывки осажденного магнетита от солей аммония, риск агрегации незащищенных частиц и снижение коллоидной стабильности. Процесс синтеза включал:

- образование эмульсии из диэфира, ПАВ-стабилизатора (жирной кислоты) и воды при 70...90 °С;

- последовательное введение аммиака и растворов солей железа (II и III);

- адсорбцию ПАВ на поверхности частиц магнетита и переход их в органическую фазу;

- декантирование, промывку дистиллированной водой;

- введение присадок при 40...50 °С с тщательным перемешиванием.

Для повышения устойчивости в магнитных полях применены олигоэфирные стабилизаторы.

Ключевые свойства полученных масел: намагниченность: 25...35 кА/м; низкая вязкость (порядка 0,07...0,2 Па · с при 20 °С); высокая коллоидная устойчивость в магнитных полях, широкий температурный диапазон работы. Вязкость магнитного масла ММ-ДОС снижается в 2...2,5 раза при нагреве от 20 до 100 °С; предельное напряжение сдвига в поле ~0,2 Тл составляет 25 Па. С противоокислительной присадкой масло работает при температурах до 150 °С длительно и до 190 °С кратковременно. Скорость коррозии меди в магнитных маслах на порядок ниже, чем в чистых дисперсионных средах с ПАВ. Это объясняется адсорбцией молекул стабилизатора на поверхности частиц магнетита.

Триботехнические испытания проводились при средних и высоких давлениях. Установлено, что диэфирные магнитные масла превосходят по свойствам масла на силоксановой основе (например, на основе ПЭС-5). Магнитное поле играет ключевую роль, обеспечивая регенерацию смазочной пленки в зоне трения.

Введение наполнителей (медного, тефлонового) и присадок (особенно трикрезилфосфата, фторированных аминов, хлорсодержащего эфира) существенно улучшает противоизносные и противозадирные свойства масел. Наиболее эффективные композиции на основе ДОС с присадками по трибосвойствам превосходят традиционное трансмиссионное масло ТАД-17. Интенсивность изнашивания снижается с повышением твердости более мягкого материала пары трения. Наилучшие результаты (минимальный износ) достигнуты для пар с твердыми материалами (например, корунда), где нивелируется абразивное действие частиц магнетита.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Наиболее перспективно для практического применения магнитное масло на основе ДОС (с присадками или без). Рекомендовано для использования в слабо- и средненагруженных гидродинамических подшипниках скольжения, уплотнениях, а также в узлах, работающих в условиях граничного трения (приборных подшипниках качения, зубчатых передачах), частых пусков/остановов, вибраций. Масло нетоксично, трудновоспламеняемо, сохраняет работоспособность после длительной консервации.

В статьях [27, 30] представлены результаты комплексных исследований, направленных на создание магнитных смазочных масел кремнийорганических жидкостей, в частности полиэтилсилоксана ПЭС-5 и хлорфенилсилоксана ХС-2-1ВВ, обладающих низкой испаряемостью, хорошими реологическими свойствами и широким температурным диапазоном работы.

Технология синтеза магнитных масел включает несколько этапов: получение магнетита методом химической конденсации, пептизацию магнетита раствором ПАВ, удаление воды и летучих компонентов, введение присадок. Полученные масла обладают намагниченностью насыщения до 30...40 кА/м, вязкостью 0,1...0,6 Па · с и сохраняют коллоидную стабильность в гравитационных и магнитных полях.

Хлорсодержащие присадки («Совол», «3Н2ТЭ») оказались наиболее эффективными. Они позволили приблизить трибологические свойства МНЖ1-ПЭС к уровню высококачественного трансмиссионного масла ТМ-5-18. «Совол» также показал способность «исправлять» недостатки МНЖ2-ПЭС, диспергируя агрегаты и вытесняя с поверхности свободную олеиновую кислоту. Для достижения эффекта требовалось введение значительного количества присадки (10...15 %), что объясняется ее конкурентной адсорбцией на поверхности магнитных частиц. Выявлен отрицательный синергетический эффект: при малых концентрациях присадок (особенно «Совола») смазочные свойства ухудшались. Исследователи объясняют это частичным вытеснением молекул ПАВ-стабилизатора (олеиновой кислоты) с поверхности частиц более полярными молекулами присадки. Высвобожденная кислота негативно влияет на трение. Только при более высоком содержании присадки (6...7 %) ее молекулы начинают доминировать на трущихся поверхностях, снижая износ.

Другие присадки (ДФ-11, ЭО-1, МКФ-18) не показали значимого улучшения антифрикционных свойств силоксановых магнитных смазочных жидкостей.

Ресурс работы магнитных силоксановых жидкостей в узле с однократной заправкой оказался на 10 % меньше, чем у трансмиссионного масла, но на 2...3 порядка больше по сравнению с пластичной смазкой. Магнитные масла ММ1-ПЭС и ММ4-ХС с присадками были успешно апробированы, в частности, для смазки шпиндельных узлов опытного оборудования, предназначенного для распиловки, обдирки и огранки природных алмазов. Противники практического применения магнитных смазочных материалов акцентируют внимание на том, что их удельная стоимость из-за сложности и трудоемкости процесса приготовления примерно на два порядка превышает стоимость традиционных масел. Однако для смазки специальных магнитожидкостных узлов трения обычно требуется всего несколько кубических сантиметров магнитного масла.

МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ ПОДШИПНИКИ: ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Магнитожидкостные подшипники [6, 7] относятся к классу подшипников скольжения, в которых роль смазочного и (часто) герметизирующего слоя выполняет магнитная жидкость, удерживаемая в рабочем зазоре магнитным полем. В конструктивном отношении магнитожидкостный подшипник обычно включает вал, неподвижную опору (втулку или корпус), систему постоянных магнитов и магнитопровод, формирующий градиент магнитного поля в зазоре.

Принцип действия таких подшипников основан на сочетании гидродинамического эффекта смазочного клина и магнитного удержания магнитной жидкости в зоне контакта. При вращении вала в зазоре между ним и опорой возникает гидродинамическое давление, как и в классическом масляном подшипнике, однако распределение и устойчивость слоя жидкости дополнительно определяются магнитными силами, действующими на намагниченный объем магнитной жидкости. Градиентное магнитное поле притягивает магнитную жидкость к области максимальной индукции, препятствуя ее вытеснению из зазора и обеспечивая непрерывность смазочного слоя даже при переменных нагрузках и вибрациях. За счет этого одновременно реализуются функции смазки, демпфирования и, при соответствующей конструкции, герметизации.

Ключевым преимуществом магнитожидкостных подшипников является высокая герметичность и возможность работы в средах, где традиционные смазочные материалы менее эффективны или неприменимы. Слой магнитной жидкости в сочетании с магнитным полем образует своеобразный динамический «уплотнительный барьер», препятствующий протечке газов и жидкостей через зазор и защищающий внутренние узлы от загрязнения. Это особенно важно в вакуумной и криогенной технике, в герметичных насосах и электродвигателях, где требуется одновременное обеспечение вращения и герметизации вала. Кроме того, отсутствие жесткого контактного сопряжения тел (вал – втулка) приводит к снижению коэффициента трения, уменьшению интенсивности износа и повышению ресурса опор по сравнению с традиционными подшипниками скольжения.

С точки зрения динамики ротора магнитожидкостные подшипники обеспечивают дополнительное демпфирование колебаний благодаря вязкости магнитной жидкости и особенностям распределения давления в зазоре. Это позволяет уменьшать амплитуду вибраций, сглаживать прохождение критических скоростей и улучшать устойчивость вращения при внешних возмущениях. В ряде конструкций магнитная система проектируется таким образом, чтобы совместно с геометрией подшипника формировать требуемую жесткостно-демпфирующую характеристику, оптимальную для конкретного диапазона скоростей и нагрузок. Однако такие преимущества достигаются при условии правильного подбора магнитной жидкости по вязкости, намагниченности и коллоидной устойчивости, а также при точном расчете магнитной системы.

Для обеспечения эффективной работы магнитожидкостных узлов очень важно уметь оценивать ресурс их функционирования. В работе [16] предложен обобщенный расчетный подход к оценке ресурса магнитожидкостных трибоустройств (подшипников скольжения, уплотнений и др.), работающих в вакууме и газовой среде. Рассмотрены физические механизмы деградации магнитной жидкости, связанные с испарением дисперсионной среды, ростом объемной доли твердой фазы и соответствующим увеличением эффективной вязкости до предельно допустимых значений. На основе статистической теории испарения (подхода Френкеля) и диффузионных моделей массопереноса получены соотношения для скорости испарения в вакууме и в

газовой среде, выраженные через давление насыщенных паров, коэффициенты диффузии, геометрию полости и долю дисперсной фазы. Эти модели позволяют вывести аналитические формулы для времени достижения критической концентрации твердой фазы и, следовательно, для расчета ресурса магнитожидкостных узлов с открытой поверхностью и с частично экранированной (полостью с малым отверстием). В качестве инженерного критерия отказа предлагается использовать достижение предельно допустимой вязкости (через рост объемной доли дисперсной фазы), что дает возможность оценивать срок службы узла по параметрам магнитной жидкости, температурному режиму и конструктивным размерам. На основе анализа полученных выражений сформулированы практические рекомендации по повышению долговечности магнитожидкостных подшипников и уплотнений: снижать интенсивность испарения путем экранирования поверхности, оптимизировать выбор дисперсионной среды с низким давлением насыщенных паров, учитывать чувствительность ресурса к геометрии полости и площади открытой поверхности, а также рассматривать возможность дозаправки масла.

Результаты показывают, что ресурс узлов может достигать десятков лет при низких температурах и малой площади свободной поверхности магнитной жидкости. Повышение температуры и увеличение открытой поверхности приводят к резкому сокращению долговечности.

Основные области применения магнитожидкостных подшипников связаны с задачами, где одновременно требуются высокие требования к герметичности, чистоте среды и надежности опор. Наиболее широко они используются в вакуумной технике: в вакуумных вводах вращения, герметичных приводах, высоковакуумных насосах, где магнитная жидкость позволяет передавать вращение внутрь герметичного объема без использования традиционных манжетных или контактных уплотнений. Перспективным направлением является применение таких подшипников в герметичных электродвигателях и насосах, перекачивающих агрессивные, токсичные или особо чистые среды, поскольку магнитожидкостная опора позволяет устранить потенциальные пути утечки по валу и снизить риск загрязнения продукта.

Кроме вакуумной техники и герметичных насосных агрегатов, магнито-жидкостные подшипники находят применение в прецизионных приводах и высокоскоростных шпинделях, где важно совместить хорошую смазку с минимальным уровнем вибраций и высокой точностью позиционирования. В таких системах магнитожидкостные опоры используются как элементы, обеспечивающие малый и стабильный зазор, низкий уровень шума и возможность работы при высоких скоростях без перехода к традиционным газостатическим или чисто магнитным подшипникам. Отдельный интерес представляет применение магнитожидкостных подшипников в специализированных машинах, работающих в агрессивных или особо чистых средах, таких как химическая промышленность, медицина, микроэлектроника, где устойчивость магнитной жидкости и ее химическая инертность к окружающей среде позволяют создать долговечные и надежные опоры.

Несмотря на очевидные преимущества магнитожидкостных подшипников, их широкому распространению препятствует ряд технологических и эксплуатационных ограничений. Требуется высокая коллоидная стабильность магнитной жидкости, так как осаждение частиц или их агрегация приводит к ухудшению смазочных и герметизирующих свойств, увеличению потерь и возможному выходу узла из строя. Важны также стабильность свойств во времени, термоокислительная устойчивость и совместимость жидкости с материалами уплотнений и деталей подшипника. Конструкция магнитной системы должна обеспечивать достаточную удерживающую

силу без чрезмерных потерь на вихревые токи и нагрев, что усложняет ее проектирование и увеличивает стоимость. Тем не менее в нишах, где критичны герметичность, чистота среды и надежность при высоких скоростях, магнитожидкостные подшипники остаются одним из наиболее перспективных и технологически оправданных решений.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТВЕРСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ ПО ТРИБОЛОГИИ МАГНИТНЫХ МАСЕЛ

Перспективы развития исследований Тверской научной школы по трибологии магнитных смазочных жидкостей связаны с необходимостью решения сложных задач, возникающих на стыке материаловедения, магнитной физики, химии и механики трения. Одним из ключевых вызовов является глубокое понимание взаимосвязи между наноструктурой магнитных систем и их поведением в условиях реальных эксплуатационных нагрузок, включая циклические и переменные воздействия. Кроме того, требуется изучение влияния комплексных факторов среды, таких как температура, давление и химическая агрессивность, на стабильность и эффективность магнитных смазок. Рост требований к экологической безопасности и энергоэффективности также предъявляет новые стандарты к составу и переработке магнитных смазочных жидкостей.

Развитие науки основано на применении передовых методов анализа и синтеза наноматериалов, использовании современных вычислительных моделей для прогнозирования поведения сложных систем, а также интеграции экспериментальных данных с теоретическими разработками. Развитие технологий контроля в реальном времени за состоянием магнитных смазочных жидкостей и динамикой трибологических процессов откроет новые горизонты для создания адаптивных и интеллектуальных смазочных систем. Также расширяется потенциал для внедрения магнитных смазок в высокотехнологичные отрасли, такие как аэрокосмическая, робототехника и микроэлектромеханические системы.

Будущие исследования должны строиться на мультидисциплинарном подходе, объединяющем методы нанотехнологий, прикладной физики, химии полимеров и вычислительного моделирования. При этом важным направлением станет развитие экспериментальных платформ, позволяющих проводить исследования в условиях, максимально приближенных к реальным техническим ситуациям, включая динамическую настройку магнитного поля и комбинированное воздействие механических и химических факторов. Необходимо расширять использование машинного обучения и искусственного интеллекта для анализа больших объемов данных и выявления скрытых закономерностей в поведении магнитных смазочных жидкостей. Такой подход повысит точность прогнозов и эффективность разработки новых материалов.

В совокупности указанные направления исследований обеспечат фундамент для создания магнитных смазочных жидкостей нового поколения с улучшенными эксплуатационными характеристиками и устойчивостью в самых разнообразных условиях эксплуатации, что позволит расширить границы знаний в этой области.

ВЛИЯНИЕ ДОСТИЖЕНИЙ ТВЕРСКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ НА МИРОВУЮ НАУКУ И ИНДУСТРИЮ

Исследования, проведенные представителями Тверской научной школы по трибологии магнитных смазочных жидкостей, привлекли внимание международного сообщества, они способствуют развитию новых подходов к созданию адаптивных

смазочных систем. Полученные фундаментальные знания по взаимодействию магнитных наночастиц с поверхностями трения и их поведению в различных магнитных полях внесли существенный вклад в глобальное понимание механизмов управления трением и износом. Ведущие исследовательские центры в Европе, Азии и Северной Америке используют научные достижения, полученные тверскими учеными.

Итоговая оценка вклада показывает, что Тверская научная школа сформировала уникальный междисциплинарный подход к изучению магнитных смазочных жидкостей, обеспечив глубокое понимание взаимосвязи между структурой, коллоидной устойчивостью и трибологическими свойствами систем. В результате объединения химических, физических и инженерных методов была разработана технология синтеза магнитных жидкостей с контролируемой морфологией и функциональной поверхностной модификацией, что позволило стабилизировать дисперсии и повысить их эксплуатационную стойкость.

Практическое значение достижений Тверской школы состоит в расширении возможностей применения магнитных смазочных жидкостей в машиностроении с улучшением экономичности, надежности и экологичности оборудования. Внедрение уникальных технологий и материалов способствует снижению эксплуатационных затрат и увеличению ресурса узлов трения, а также интеграции смазочных систем в автоматизированные и интеллектуальные производственные комплексы.

Таким образом, труды тверских ученых не только дополнили мировую научную базу новыми теоретическими концепциями и экспериментальными методами, но и создали прикладные решения с высокой технологической ценностью, заложив прочную основу для дальнейших инноваций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения комплексного анализа Тверской научной школы по трибологии магнитных смазочных жидкостей выявлено, что накопленный опыт и научные достижения формируют прочную основу для развития новых направлений в области смазочных материалов с магнитными свойствами. Как показала систематизация исследований, разработанные в ТвГТУ методы синтеза магнитных жидкостей обеспечивают высокую степень контроля над структурой и размером наночастиц, что играет решающую роль в формировании стабильных и эффективных смазочных систем.

Детально рассмотрена роль полимеров в повышении коллоидной устойчивости. Их функциональные свойства позволяют создавать устойчивые к агрегации дисперсии магнитных наночастиц, способствующие долговременной стабильности смазочной пленки и сохранению оптимальных трибологических характеристик. Результаты исследования фрикционных свойств магнитных смазочных жидкостей показали значительное снижение коэффициента трения и износа, достигнутое благодаря взаимодействию магнитных частиц с поверхностями трения и способности этих частиц образовывать адаптивные смазочные слои под воздействием магнитного поля.

Влияние присадок и наполнителей показало возможности дальнейшей оптимизации состава магнитных масел, направленной на улучшение их вязкостно-текучих и противоизносных свойств. Технологические преимущества использования магнитных наносмазок нашли отражение в повышении надежности и ресурсосбережении машиностроительных узлов, что критично для современных производственных систем с жесткими требованиями к эффективности и экологичности.

Ключевым итогом стала оценка влияния Тверской научной школы на мировое научное сообщество и индустрию. Разработки университета получили международное признание, а их применение способствует внедрению интеллектуальных смазочных

материалов в высокотехнологичных отраслях, расширяет границы возможностей современных инженерных систем.

Таким образом, проведенное исследование демонстрирует, что Тверская школа не только внесла существенный вклад в фундаментальные и прикладные аспекты трибологии магнитных смазочных жидкостей, но и создала платформу для дальнейших инноваций, способствующих развитию высокоэффективных и экологически безопасных технологических решений в области машиностроения и материаловедения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Мардян М.В. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 1. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*: Межвузов. сбор. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. 2013. Вып. 6. С. 68–74.
2. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Горлов Д.И. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств нанодисперсных магнитных сред. Часть 2. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*: Межвузов. сбор. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. 2014. Вып. 7. С. 85–89.
3. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., Новиков В.В., Новикова О.О. Технологические методы повышения смазочного действия нанодисперсных магнитных масел // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2017. № 8. С. 361–365.
4. Болотов А.Н., Новикова О.О. Мобильный магнитометр для экспресс-теста намагниченности насыщения магнитных наножидкостей // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2020. № 12. С. 557–570.
5. Болотов А.Н., Новикова О.О. Магнитные нанодисперсные смазочные масла на основе диэфиров карбоновых кислот // *Трение и износ*. 2018. Т. 39. № 5. С. 551–558.
6. Болотов А.Н., Новиков В.В., Павлов В.Г. Магнитожидкостные подшипники скольжения // *Трение и износ*. 2004. Т. 25. № 3. С. 286–291.
7. Болотов А.Н., Хренов В.Л. Триботехника магнитопассивных опор скольжения: монография. Тверь: ТвГТУ, 2008. 124 с.
8. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. О зависимости коллоидной устойчивости магнитных жидкостей от диэлектрической проницаемости стабилизатора и дисперсионной среды // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2017. Т. 60. № 4. С. 75–81.
9. Болотов А.Н., Новикова О.О. Влияние нанодисперсной фазы магнитных масел на их смазочные свойства // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2022. № 14. С. 545–560.
10. Патент РФ 2016055. *Магнитное масло и способ его получения* // Болотов А.Н., Созонтов К.К., Хренов В.Л. Заявл. 01.07.1991. Опубл. 15.07.1994.
11. Патент РФ 2502792. *Способ получения магнитного масла* / Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Мардян М.В., Горлов Д.И. Заявл. 30.10.2012. Опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36.
12. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., Новикова О.О., Новиков В.В. Влияние магнитного поля на поверхностные эффекты при смазке магнитной жидкостью // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 2 (2). С. 14–22.

13. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Исследование триботехнических свойств наноструктурных магнитных смазочных масел с различными дисперсионными средами // *Трение и износ*. 2017. Т. 38. № 2. С. 107–113.
14. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. The influence of a magnetic field on skin effects lubricated by magnetic lubricants // *Materials Science Forum*. 2020. V. 989. P. 97–102.
15. Болотов А.Н., Новикова О.О. Магнитные свойства магнитных нанодисперсных смазочных масел // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2019. № 11. С. 564–573.
16. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Горлов И.В. Исследование структурной стабильности магнитных масел для узлов трения // *Известия МГТУ МАМИ*. 2014. Т. 4. № 2 (20). С. 15–17.
17. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Смазочные масла, полученные модифицированием магнитных наножидкостей // *Материаловедение*. 2019. № 11. С. 29–35.
18. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Применение микродугового оксидирования для получения керамического алмазосодержащего материала // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2006. № 3 (15). С. 13–16.
19. Болотов А.Н., Новикова О.О. Вискозиметрия нанодисперсных магнитных жидкостей и смазочных масел. 1. Приборное обеспечение реологических исследований магнитных нанодисперсных жидких сред // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2021. № 13. С. 44–55.
20. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., Новикова О.О., Новиков В.В. Механические свойства поверхности, смазанной магнитным маслом // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 1 (1). С. 6–11.
21. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Смазочные масла на основе наножидкостей // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2018. № 10. С. 159–168.
22. Болотов А.Н., Лочагин Н.В., Михалев Ю.О. Роль магнитного поля при трении поверхностей, смазываемых магнитным маслом // *Трение и износ*. 1988. Т. 9. № 5. С. 870–878.
23. Bolotov A.N., Afanas'eva L.E., Gul'tyaev V.I., Alekseev A.A. Quasi-Brittle Fracture of Ferromagnetic Material in a Magnetic Field // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2024. V. 53. № 2. P. 114–120.
24. Патент РФ 2760924. Устройство и способ определения устойчивости и структурной стабильности магнитных жидкостей / Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Заявл. 01.03.2021. Опубл. 01.12.2021, Бюл. № 34.
25. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Моделирование разрушения адгезионного контакта в магнитном поле // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 3 (23). С. 32–39.
26. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Life of magnetic-fluid frictional components in gas // *Russian Engineering Research*. 2017. V. 37. № 1. P. 27–31.
27. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Полиэтилсилоксановые магнитные нанодисперсные масла для узлов трения // *Вестник машиностроения*. 2017. № 10. С. 48–55.
28. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Нанодисперсное магнитное масло: взаимосвязь состава жидкой фазы и триботехнических характеристик // *Физико-*

химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2025. № 17. С. 577–584.

29. Болотов А.Н., Афанасьева Л.Е., Мешков В.В. Смазочные свойства нанодисперсных магнитных масел на основе нетрадиционных технических жидкостей // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов.* 2023. № 15. С. 679–691.

30. Болотов А.Н. Новиков В.В., Новикова О.О. Кремнийорганические магнитные нанодисперсные масла триботехнического назначения // *Все материалы. Энциклопедический справочник.* 2017. № 10. С. 38–43.

31. Болотов А.Н. Новикова О.О., Новиков В.В. Магнитные силоксановые наножидкости адаптированные для условий граничного трения // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов.* 2020. № 12. С. 546–556.

32. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Влияние присадок на триботехнические характеристики наноструктурных смазочных магнитных масел // *Трение и смазка в машинах и механизмах.* 2015. № 9. С. 43–47.

Для цитирования: Болотов А.Н. Вклад Тверской научной школы по трибологии в создание и изучение магнитных смазочных жидкостей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки».* 2026. № 2 (30). С. 18–40.

CONTRIBUTION OF THE TVER SCIENTIFIC SCHOOL OF TRIBOLOGY TO THE CREATION AND STUDY OF MAGNETIC LUBRICATING FLUIDS

A.N. BOLOTOV, Dr Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: alnikbltov@rambler.ru

Magnetic lubricants are a tool for creating next-generation engineering systems – active, adaptive and highly reliable. Their application is most justified in special equipment, where decisive importance is given not to cost, but to unique functional capabilities: tightness, controllability and operation in extreme conditions. In serial mechanical engineering, their use is still constrained by economic factors, but for critical components (aerospace industry, energy, precision equipment) they already offer unparalleled solutions today. A brief review of the Tver scientific school in the field of magnetic fluids intended for lubricating machine friction units is presented. The practical use of magnetic lubricants helps reduce wear of parts, improve energy efficiency of equipment and increase its reliability. The relationship between the chemical composition, structural stability and performance properties of magnetic lubricants is revealed, which makes it possible to purposefully develop compositions with specified parameters adapted to various operating conditions of friction units. A comprehensive theoretical and experimental basis for further research in this area has been created. The main achievements are systematized and the prospects for the development of magnetic lubricants are revealed, which is important for improving performance properties in mechanical engineering and other industries.

Keywords: magnetic lubricating fluids, tribology, magnetic nanoparticles, colloidal stability, magnetic fluid bearing, Tver scientific school.

Поступила в редакцию/received: 17.02.2026; после рецензирования/revised: 20.02.2026;
принята/accepted: 24.02.2026

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 2 (30), 2026*

СОВРЕМЕННАЯ ТРИБОЛОГИЯ: МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Е.А. РАТКЕВИЧ, канд. хим. наук, А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ekrasavina26@gmail.com

© Раткевич Е.А., Болотов А.Н., 2026

В статье приводится обоснование необходимости разработки интегрированной мультискальной методологии в трибологии, сочетающей экспериментальные данные, полученные на макро- и микроскопическом уровнях с учетом химических превращений на поверхностях в процессе трения и их обработку методами компьютерного моделирования. Методология позволяет детально исследовать процессы трения и износа на всех структурных уровнях – от атомарного до макроскопического масштаба. Это существенно повышает точность прогнозирования долговечности материалов и открывает новые возможности для проектирования инновационных решений в областях высоких технологий. Оценивались такие методы, как спектроскопия, микроиндентирование, трибометрия и атомно-силовая микроскопия, а также перспективы и возможности применения искусственного интеллекта и машинного обучения для описания трибопроцессов.

Ключевые слова: трибология, макроскопический анализ, микроскопический анализ, атомно-силовая микроскопия, трибометрия, спектроскопия, компьютерное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Современная промышленность, особенно в аэрокосмической и автомобильной отраслях, сталкивается с острой потребностью в материалах, обладающих улучшенными трибологическими характеристиками [1–3]. Это обусловлено стремлением к минимизации энергопотерь от трения и значительному увеличению срока службы механизмов, что является ключевым фактором экономической эффективности. Повышение надежности и долговечности компонентов напрямую влияет на конкурентоспособность продукции и снижение эксплуатационных расходов, а также расходов на ее техническое или сервисное обслуживание.

Актуальность данного исследования подкрепляется глобальными тенденциями к устойчивому развитию и снижению воздействия на окружающую среду. Уменьшение износа и оптимизация смазочных систем способствуют сокращению потребления ресурсов и уменьшению объемов отходов, что соответствует приоритетам современной научной литературы по материаловедению и инженерии поверхностей [4–6]. Таким образом, разработка и внедрение передовых трибологических решений становятся неотъемлемой частью инновационного развития.

Несмотря на значительный прогресс в трибологии, существует значительный методологический разрыв между макроскопическим анализом износа и пониманием микро- и наноструктурных процессов, происходящих на поверхностях контакта [7–12]. Традиционные подходы часто не учитывают сложность взаимодействий на атомарном и молекулярном уровнях, что приводит к упрощенным моделям и систематическим ошибкам в прогнозировании. Это особенно критично для высоконагруженных узлов, где даже незначительные погрешности могут стать причиной преждевременного

выхода из строя. Такой методологический пробел не только снижает точность прогнозирования ресурса механизмов, но и препятствует разработке инновационных материалов с заданными трибологическими свойствами. Отсутствие комплексного подхода к изучению поверхностных явлений ограничивает возможности оптимизации смазочных систем и конструктивных решений, что в конечном счете увеличивает эксплуатационные затраты и снижает общую эффективность промышленного оборудования.

Целями настоящей работы являются систематизация и анализ современных методологических подходов в трибологии, а также разработка интегрированной гибридной стратегии, которая сочетает передовые экспериментальные и вычислительные методы для мультискального моделирования трибологических процессов, что позволит преодолеть существующие ограничения и повысить точность прогнозирования.

Для достижения поставленных целей в работе будут решены следующие научные задачи: проведен историко-методологический анализ эволюции исследовательских практик, дана критическая оценка ограничений традиционных методов, спроектирована гибридная методология с последующей валидацией на промышленных кейсах, а также разработаны стандарты для ее внедрения в исследовательскую практику.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данная работа проводилась в соответствии с подходами, принятыми для систематических обзоров. Целью было выявление и анализ публикаций, посвященных применению трибологических методов, их развитию и эффективности в той или иной области. Для синтеза и интерпретации данных применялся качественный тематический анализ, а для выявления исторической динамики развития методов – хронологический анализ. Исследования группировались и сравнивались по следующим аналитическим категориям: область применения, используемые методы, ключевые выводы и выявленные ограничения. На основе сравнительного анализа была составлена гибридная методология.

Эволюция трибологических методов на протяжении десятилетий демонстрирует поступательный переход от эмпирических наблюдений ко все более комплексным и аналитическим подходам. Интеграция таких передовых техник, как спектроскопия, высокоточная трибометрия и молекулярное моделирование, открывает новые горизонты для глубокого анализа поверхностных взаимодействий и понимания механизмов трения и износа на различных уровнях масштаба. Предлагаемая гибридная методология призвана преодолеть традиционные ограничения за счет синергетического объединения мультифизического моделирования и методов искусственного интеллекта. Такой подход обеспечит высокую прогностическую точность в условиях экстремальных эксплуатационных параметров, что является критически важным для разработки высокоэффективных и долговечных трибологических систем будущего.

Первоначально изучение трения и износа основывалось преимущественно на эмпирических наблюдениях и практическом опыте [3, 13]. Эти качественные подходы позволяли описывать явления поверхностного взаимодействия лишь в общих чертах. Переход к количественным измерениям стал ключевым этапом в становлении трибологии как научной дисциплины. Разработка точных измерительных приборов создала предпосылки для объективного анализа трибологических процессов. Систематизация экспериментальных данных привела к появлению первых математических моделей, описывающих закономерности трения [13, 14]. Важным достижением стало установление количественных зависимостей между силой трения и

нормальной нагрузкой. Эти исследования заложили основу для создания предсказательных методик в трибологии.

Формирование метрологической базы позволило перейти от описательных методов к аналитическим подходам. Теоретическая база трибологии формировалась через интеграцию принципов механики, материаловедения и химии поверхностей. Междисциплинарный характер исследований способствовал углубленному пониманию природы поверхностных взаимодействий. Так, Генрих Герц объединил принципы электродинамики и механики, исследуя проблему твердости и прочности контактов [15]. Подобные междисциплинарные подходы позволили создать комплексные модели трибологических систем, отражающие многообразие взаимодействующих факторов.

Современные экспериментальные методы исследования трения и износа. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) [9, 16–17] является ключевым инструментом для нанотрибологических исследований, обеспечивающим визуализацию поверхностей с атомарным разрешением. Данная методика позволяет измерять силы трения и адгезии в наномасштабе, что невозможно при использовании традиционных методов. Применение АСМ способствует изучению фундаментальных механизмов износа и трибологических свойств материалов на микроуровне. Современные модификации АСМ, такие как трибокопирование и латеральная силовая микроскопия, расширяют возможности количественного анализа трибологических характеристик. Эти методы обеспечивают прямое измерение сил трения между зондом и поверхностью с высоким пространственным разрешением. Исследования с использованием АСМ выявили важную роль наноразмерных структур и химических взаимодействий в процессах трения.

Трибометрия [7, 18–22] представляет собой основной экспериментальный метод оценки макроскопических характеристик трения и износа в контролируемых условиях. Стандартные трибометрические испытания проводятся на специализированных установках, имитирующих различные режимы контакта и нагрузки. Данный подход позволяет количественно определять коэффициенты трения и интенсивность износа для широкого класса материалов. Методы трибометрии включают различные конфигурации испытаний, такие как «шар – диск», «цилиндр – цилиндр» и «штифт – диск», что обеспечивает моделирование разнообразных условий эксплуатации. Современные трибометры оснащены высокоточными датчиками для непрерывной регистрации силы трения и износа в реальном времени. Эти измерения являются основой для разработки эмпирических моделей и верификации теоретических концепций.

Компьютерное моделирование методом молекулярной динамики [14, 23] позволяет анализировать контактные взаимодействия на микроуровне с атомистической детализацией. Данный подход воспроизводит поведение материалов под нагрузкой, при этом учитываются тепловые колебания атомов и межмолекулярные силы. Моделирование молекулярной динамики выявляет фундаментальные механизмы трения и износа, недоступные для экспериментального наблюдения.

Недостатки макроскопического анализа в прогнозировании износа. Макроскопические модели трибологических процессов [11, 22, 24, 25] часто опираются на усредненные характеристики материалов, что не позволяет учитывать локальные изменения структуры в зоне контакта. Данные модели игнорируют неоднородности микроструктуры, такие как вариации состава или наличие дефектов, которые существенно влияют на износ. В результате прогнозирование ресурса узлов трения сопровождается систематическими ошибками, так как реальные процессы изнашивания определяются именно локальными свойствами поверхностей. Это ограничение особенно критично при работе с материалами сложной структуры, где

микроскопические особенности доминируют в механизмах деградации. Игнорирование микроструктурных изменений приводит к недооценке скорости износа в критических областях контакта, где концентрация напряжений наиболее высока. Макроскопический анализ не способен выявить зоны локального ускоренного разрушения, вызванного неоднородностями материала. Следовательно, прогнозируемый ресурс узлов трения часто оказывается завышенным по сравнению с реальными эксплуатационными данными, что подчеркивает необходимость учета микроскопических факторов при моделировании долговечности трибосистем.

Традиционные подходы к анализу трибологических процессов используют упрощенные представления о контактных взаимодействиях, что не отражает сложности реальных условий эксплуатации. В частности, макроскопические модели обычно предполагают равномерное распределение нагрузок и идеальную геометрию поверхностей, а это редко встречается на практике. Такие упрощения препятствуют корректному моделированию распределения напряжений и температурных полей – ключевых факторов износа. Неадекватность этих моделей особенно проявляется при работе в экстремальных условиях, где локальные перегревы и пиковые напряжения определяют механизмы деградации.

Упрощенное описание контактных взаимодействий также не учитывает динамические изменения поверхности в процессе изнашивания, такие как образование и разрушение защитных слоев. Это ограничивает возможность прогнозирования нелинейного поведения трибосистем, включая переходные процессы и катастрофический износ. Следовательно, макроскопические модели часто дают некорректные оценки долговечности, особенно для узлов трения, работающих в условиях переменных нагрузок и скоростей. Требуются более совершенные методы, способные интегрировать микроструктурные аспекты для точного описания реальных эксплуатационных сценариев.

Проблемы учета микроструктурных эффектов в стандартных тестах. Стандартизированные методы испытаний часто не учитывают влияние микрорельефа поверхности на трибологические характеристики. Наиболее значимыми факторами, определяющими кинетику изнашивания и коэффициент трения, признаются параметры шероховатости, затем, по степени убывания, трибологические свойства смазочной среды и, в последнюю очередь, – сочетание материалов и эксплуатационные параметры [11, 25]. Это приводит к существенным погрешностям в прогнозировании поведения материалов при эксплуатации. Дефекты кристаллической структуры и повышенная неоднородность границ зерен оказывают значительное влияние на механизмы износа, но не фиксируются в макроскопических тестах. Миграция дислокаций к границам зерен в процессе работы материала приводит к концентрации внутренних напряжений, что провоцирует последующее разрушение материалов по границам зерен. Наличие различных структурных элементов на микроуровне существенно изменяет трибологические свойства, а значит, это необходимо учитывать при выборе методик.

Следующий фактор трибологических свойств, который не регистрируется традиционными подходами, – это локальные химические изменения поверхности в процессе трения, такие как окисление и адсорбция [26]. Эти процессы изменяют химический состав и, как следствие, свойства поверхностных слоев. Отсутствие учета химических превращений приводит к некорректной оценке триботехнических характеристик материалов. Традиционные методы испытаний не предусматривают и анализа химических изменений в реальном времени. Игнорирование динамики окислительных процессов и адсорбции искажает прогноз долговечности и надежности трибосопряжений. В связи с этим необходимо развитие методик, позволяющих

фиксировать локальные химические модификации поверхности для повышения точности прогнозирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Концепция гибридной методологии. Интеграция спектроскопических и механических методов исследования. Комбинированное применение спектроскопических и механических методов позволяет комплексно анализировать поверхности трения. Инфракрасная и рамановская спектроскопия выявляют химические преобразования и образование новых соединений в зоне контакта [11, 20, 26–28]. Микроиндентирование и трибометрия оценивают механические свойства, такие как твердость и коэффициент трения. Такой подход обеспечивает одновременную оценку химических и деформационных характеристик. Синергия спектроскопических и механических методов позволяет выявить корреляционную зависимость между структурными изменениями материалов и их триботехническими характеристиками, т.е. установить причинно-следственные связи между химическим составом поверхности и ее механическими свойствами. В результате повышается достоверность интерпретации экспериментальных данных по трению и износу.

Корреляция данных спектроскопии и механических испытаний уменьшает неопределенность при прогнозировании износостойкости. Таким образом, синергетический эффект методов способствует повышению надежности трибологических исследований.

Мультифизическое моделирование трибологических процессов. Многоуровневое моделирование [8, 15, 27, 29] обеспечивает комплексное описание трибологических процессов за счет интеграции различных вычислительных подходов. Квантово-механические методы применяются для анализа атомарных взаимодействий и химических реакций на поверхностях трения. Молекулярно-динамическое моделирование позволяет изучать поведение материалов на наномасштабном уровне, включая деформацию и адгезию. Континуальные модели описывают макроскопические явления, такие как распределение напряжений и тепловые потоки в зоне контакта. Путем совместного использования этих методов можно преодолеть ограничения отдельных подходов при исследовании многофакторных трибосистем. Передача данных между масштабными уровнями осуществляется через специальные алгоритмы апскейлинга и даунскейлинга. Такой подход обеспечивает согласованное описание процессов от атомарного до макроскопического масштаба. Интеграция позволяет учитывать взаимовлияние явлений разной природы, что повышает точность прогнозирования износа и трения.

Объединение физических уравнений, описывающих различные аспекты трибологических процессов, на базе междисциплинарных вычислительных платформ [30–31]. Уравнения термоупругости моделируют тепловые и механические напряжения в твердых телах при трении. Реологические модели описывают поведение смазочных материалов, включая их нелинейную вязкость и эластогидродинамические эффекты. Кинетические уравнения учитывают химические реакции, происходящие на контактирующих поверхностях. Объединение этих моделей в единой вычислительной среде позволяет анализировать сложные взаимодействия в трибосистемах. Синхронизация различных физических моделей осуществляется через обмен граничными условиями и параметрами состояния. Это обеспечивает комплексное моделирование взаимосвязанных явлений: теплопередачи, деформации, течения смазки и поверхностных реакций. Такие платформы позволяют прогнозировать поведение трибосистем в условиях, сложных для экспериментального воспроизведения.

Валидация мультифизических моделей требует сопоставления с экспериментальными данными, полученными in-situ. Высокоскоростная визуализация фиксирует динамику процессов трения в реальном времени, включая образование и эволюцию третьих тел. Спектроскопические методы, такие как рамановская и ИК-спектроскопия, позволяют контролировать химические изменения на поверхностях трения. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными подтверждает адекватность вычислительных подходов.

Разработка алгоритма гибридного анализа поверхностных взаимодействий. Алгоритм гибридного анализа поверхностных взаимодействий [10, 27, 32] реализуется как итеративный процесс. Первый этап предполагает параметризацию на основе данных о химическом составе и структуре поверхностей, полученных методами спектроскопии. В результате создается основа для последующих механических испытаний. Механическое тестирование проводится в строго контролируемых условиях нагружения. Оно позволяет оценить физико-механические свойства материалов при трении. Комбинация спектральных и механических методов обеспечивает комплексный анализ поверхностных взаимодействий. Такая последовательность этапов является ключевой особенностью алгоритма. В алгоритме реализована система обратной связи между экспериментальными и вычислительными модулями. Это дает возможность динамически корректировать граничные условия в математических моделях. Коррекция происходит на основе данных, получаемых в ходе механических испытаний. В результате повышается точность моделирования трибологических процессов. Механизм обратной связи обеспечивает адаптацию моделей к реальным условиям. Изменения граничных условий учитывают нелинейные эффекты взаимодействия поверхностей. Такой подход минимизирует расхождения между теоретическими предсказаниями и экспериментальными результатами. Динамическая корректировка является важным преимуществом гибридной методологии. Оптимизация последовательности операций в алгоритме направлена на сокращение времени анализа без потери информативности. Достигается это за счет приоритизации критических параметров, влияющих на трибологические характеристики.

Применение искусственного интеллекта и машинного обучения для описания трибопроцессов. Современные нейросетевые архитектуры, такие как сверточные и рекуррентные сети, активно применяются для обработки многомерных данных, полученных в ходе трибологических испытаний [33–35]. Эти алгоритмы способны анализировать временные ряды показателей трения и износа, включая коэффициент трения, температуру и вибрацию. Благодаря глубокому обучению выявляются скрытые закономерности в эволюции поверхностных повреждений, которые не обнаруживаются традиционными методами, что позволяет установить корреляции между параметрами процесса и характеристиками износа. Применение нейросетей особенно эффективно для обработки данных in-situ, получаемых с датчиков во время работы трибосистем. Алгоритмы идентифицируют микроскопические изменения на поверхности трения, предшествующие макроскопическому износу. Анализ спектров вибрации и акустической эмиссии с помощью машинного обучения помогает прогнозировать развитие усталостных трещин и других дефектов. Таким образом, нейросетевые методы обеспечивают более глубокое понимание динамики трибопроцессов. Интеграция различных типов данных – механических, термических и химических – в единые нейросетевые модели значительно повышает точность анализа.

Многозадачное обучение позволяет одновременно решать проблемы классификации состояний износа и регрессии параметров трения. Это способствует

выявлению комплексных зависимостей между условиями нагружения, свойствами материалов и кинетикой изнашивания. Следовательно, искусственный интеллект открывает новые возможности для фундаментального изучения трибофизики. Алгоритмы машинного обучения, включая методы градиентного бустинга и опорных векторов, эффективно прогнозируют долговременное поведение трибосистем. Они устанавливают нелинейные регрессионные зависимости между начальными параметрами испытаний и конечными характеристиками износа. Это позволяет экстраполировать результаты краткосрочных экспериментов на длительные периоды эксплуатации. Подобный подход значительно сокращает время и ресурсы, необходимые для оценки долговечности материалов. Прогностические модели на основе машинного обучения способны учитывать микроструктурные особенности материалов и условия трения, которые сложно формализовать аналитически. Обучение на данных мультифизического моделирования и ограниченных экспериментальных результатов обеспечивает высокую точность предсказаний. Следовательно, интеграция искусственного интеллекта в трибологические исследования создает основу для разработки более надежных и эффективных материалов и смазочных систем.

Таким образом, классический подход «испытал – измерил – сделал вывод» уступает место динамической замкнутой системе. Современное исследование – итеративный процесс: численное моделирование предсказывает поведение материалов и определяет критические условия для изучения, прецизионный эксперимент целенаправленно проверяет эти предсказания, поставляя реальные данные, глубокий анализ данных методами машинного обучения валидирует модель и выявляет скрытые корреляции, которые человек мог упустить. Эти новые знания используются для уточнения и усложнения исходной модели, после чего цикл повторяется на новом уровне понимания.

Данный подход позволяет не просто констатировать факт, а понимать его фундаментальные причины и, как следствие, целенаправленно проектировать трибологические системы с заданными свойствами.

Оценка и внедрение методологии. В рамках гибридной методологии (например, для анализа износа подшипников скольжения) применяются комбинированные экспериментальные и вычислительные методы. Экспериментальная часть включает использование спектроскопических техник, таких как рамановская спектроскопия, для исследования химического состава поверхностных слоев. Механические испытания позволяют оценить изменение физических свойств материалов в процессе изнашивания. Численные методы, включая метод конечных элементов, применяются для моделирования напряженно-деформированного состояния контактирующих поверхностей. Интеграция данных экспериментальных измерений и вычислительных моделей обеспечивает комплексный анализ механизмов износа. Комбинация методов позволяет выявлять взаимосвязи между микроструктурными изменениями и макроскопическими характеристиками трения. Такой подход дает возможность установить корреляции между параметрами шероховатости поверхности и интенсивностью изнашивания. Синтез разнородных данных способствует более глубокому пониманию трибофизических процессов в подшипниках скольжения.

Сравнительная оценка эффективности гибридного подхода демонстрирует его преимущества перед традиционными методами исследования трибологических характеристик. Гибридная методология обеспечивает более точное прогнозирование износа за счет учета микроструктурных эффектов, которые игнорируются в стандартных тестах. Традиционные методы, основанные на макроскопическом анализе, не способны адекватно описать совокупность взаимодействий на границе раздела фаз.

Комплексный подход позволяет сократить время испытаний при повышении достоверности результатов за счет взаимной верификации экспериментальных и расчетных данных.

Оценка потенциального снижения потерь и повышение эффективности. Ключевым аспектом оценки эффективности гибридной методологии является количественное определение снижения энергетических потерь. Оптимизация триботехнических параметров, таких как шероховатость поверхности и смазочные характеристики, позволяет существенно уменьшить коэффициент трения. Применение мультифизического моделирования дает возможность точно прогнозировать поведение трибосистем в различных условиях эксплуатации. Это обеспечивает научно обоснованный подход к минимизации диссипации энергии. Экспериментальные исследования подтверждают значительный потенциал снижения потерь на трение при использовании предложенной методологии [2, 27]. Гибридный подход позволяет снизить коэффициент трения на 15...20 % по сравнению с традиционными решениями в аналогичных условиях. Такое уменьшение сопротивления напрямую влияет на повышение общего КПД механизмов. Полученные данные свидетельствуют о перспективности внедрения разработанных методов в промышленных масштабах. Прогнозирование увеличения ресурса эксплуатации механизмов базируется на комплексном моделировании износостойкости материалов. Интеграция спектроскопических методов с алгоритмами машинного обучения обеспечивает высокую точность оценки долговечности трибосопряжений. Моделирование позволяет предсказать изменение микроструктуры поверхностных слоев в процессе длительной работы. Это открывает возможности для разработки предиктивных систем технического обслуживания, основанных на фактическом состоянии оборудования.

Используя базу данных о свойствах тысяч материалов и их поведении в тестах на трение, алгоритмы машинного обучения выявляют неочевидные связи «структура-свойства». Это позволяет не перебирать материалы вслепую, а целенаправленно предсказать состав нового сплава или композита, который с высокой вероятностью будет обладать нужными трибологическими характеристиками.

Рекомендации по стандартизации экспериментального дизайна и внедрению в практику. Унификация протоколов испытаний является ключевым фактором для обеспечения воспроизводимости результатов трибологических исследований. Разработка единых стандартов позволит сопоставлять данные, полученные в различных лабораториях. Это особенно важно для оценки противоизносных свойств материалов и смазочных материалов. При стандартизации предлагаемого метода оценки противоизносных свойств можно не только контролировать товарные масла на соответствие их группам эксплуатационных свойств и тем самым повысить качество выпускаемой продукции, но и устанавливать группы с учетом физико-химических показателей.

Модернизация исследовательской инфраструктуры требует комплексного подхода для реализации гибридных методологий. Необходимо интегрировать спектроскопические и механические методы с современными вычислительными подходами. Это включает обновление оборудования и программного обеспечения для мультифизического моделирования. Создание совместимых платформ позволит проводить комплексный анализ поверхностных взаимодействий.

Разработка программ повышения квалификации специалистов должна учитывать современные тенденции в трибологии. Обучение должно охватывать как теоретические основы, так и практическое применение гибридных методов. Такие программы обеспечат подготовку кадров для внедрения инновационных подходов в промышленность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в работе всесторонний анализ эволюции трибологических методов позволил выявить ключевые ограничения традиционных подходов. Особое внимание уделено недостаткам макроскопического анализа, который не учитывает микроструктурные эффекты на поверхностях. Это приводит к существенным погрешностям в прогнозировании износа, особенно в условиях экстремальных нагрузок, что делает необходимым разработку новых методологий. Предложенная гибридная методология интегрирует экспериментальные симуляции трения с мультискальным моделированием поверхностных взаимодействий, обеспечивая комплексный анализ трибологических процессов. Данный подход преодолевает разрозненность существующих методов, объединяя спектроскопические и механические тесты с мультифизическим моделированием. Это позволяет достичь высокой точности прогнозирования от атомарного до макроуровня, что является значительным шагом вперед в трибологии. Практическая оценка методологии на примере подшипников скольжения подтвердила ее высокую эффективность в снижении потерь от трения. Расчеты продемонстрировали значительный потенциал для повышения энергоэффективности высоконагруженных механизмов. Полученные результаты подкреплены оценкой экономического эффекта, что свидетельствует о практической ценности разработанного подхода.

Таким образом, дальнейшее развитие трибологии должно идти путем расширения междисциплинарных исследований, интеграции достижений физики, химии и математики, а также активного внедрения цифровых технологий и искусственного интеллекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Holmberg K., Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions // *Friction*. 2017. № 5 (3). P. 263–284.
2. Горленко О.А., Тихомиров В.П., Порошин В.В. Трибология: методы моделирования процессов: учебник и практикум для академического бакалавриата. 2-е изд., испр. и доп.: М.: Юрайт, 2018. 239 с.
3. Mate C.M., Carpick R.W. Tribology on the small scale: a modern textbook on friction, lubrication, and wear. Oxford University Press, 2019. 448 p.
4. Nosonovsky M., Bhushan B. Green tribology: principles, research areas and challenges // *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2010. № 368 (1929). P. 4677–4694.
5. Rossopoulos G.N., Pervelis I., Skaltsas D., Papadopoulos C.I., Vlachos O., Koutsoumpas G., Leontopoulos C. Experimental characterization of the tribological and acoustic performance of different stern-tube bearing materials // *Tribology International*. 2025. № 206. P. 110590.
6. Katiyar J.K., Kumar V., Bhalla R. Sustainable tribology for reliability and efficiency // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2023. № 237 (8). P. 1670–1679.
7. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Горлов Д.И. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств смазочных нанодисперсных магнитных сред. Часть 2. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*: Межвузов. сбор. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. 2014. Вып. 7. С. 85–89.
8. Vakis A.I., Yastrebov V.A., Scheibert J., Nicola L., Dini D., Minfray C., Almqvist A., Paggi M., Lee S., Limbert G., Molinari J.F., Anciaux G., Aghababaei R., Echeverri Restrepo S., Papangelo A., Cammarata A., Nicolini P., Putignano C., Carbone G.,

Stupkiewicz S., Ciavarella M. Modeling and simulation in tribology across scales: An overview // *Tribology International*. 2018. № 125. P. 169–199.

9. Carpick R. W., Salmeron M. Scratching the surface: Fundamental investigations of tribology with atomic force microscopy // *Chemical Reviews*. 1997. № 97 (4). P. 1163–1194.

10. Menezes P., Ingole S., Nosonovsky M., Kailas S., Lovell M. Tribology for scientists and engineers. Springer, 2013. 928 p.

11. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Герасимов С.А. Методы исследования поверхностных слоев при трении. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 76 с.

12. Gnecco E., Meyer E. (ed.). Fundamentals of Friction and Wear on the Nanoscale // *NanoScience and Technology*. Cham: Springer. 2015. № 1. P. 517–543.

13. Müser M.H., Wenning L., Robbins M.O. Simple microscopic theory of Amontons's laws for static friction // *Physical Review Letters*. 2001. № 86(7). P. 1295–1298.

14. Bhushan B. Nanotribology and Nanomechanics: An Introduction. 2nd ed. Berlin: Springer, 2008. 928 p.

15. Кузьменко А.Г. Развитие методов контактной трибомеханики // *Проблемы трибологии*. 2011. № 2. С. 117–121.

16. Михеев И.Д., Вахитов Ф.Х. Использование атомно-силовой микроскопии для оценки качества очистки и трибометрических свойств поверхности кремниевых пластин // *Компьютерная оптика*. 2019. № 3. С. 507–511.

17. Friedrich K., Schlarb A.K. Tribology of Polymeric Nanocomposites. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. 428 p.

18. Комбалов В.С., Фролов К.В., Марченко Е.А. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник. М.: Машиностроение. 2008. 384 с.

19. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О., Мардян М.В. Комплект оборудования для исследования физико-химических свойств смазочных нанодисперсных магнитных сред. Часть 1. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*: Межвузов. сбор. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. 2013. Вып. 6. С. 68–74.

20. Ray S., Banerjee A., Bhangui B., Pyne D., Dutta B. Tribological analysis – General test standards // *Tribology of polymers, polymer composites, and polymer nanocomposites. Elsevier Series on Tribology and Surface Engineering*. 2023. P. 17–50.

21. Robbins M.O., Müser M.H. Computer simulations of friction, lubrication, and wear. *Modern Tribology Handbook*. CRC press, 2000. P. 747–796.

22. Тихомиров В.П., Горленко О.А., Порошин В.В. Трибология: методы моделирования процессов: учебник и практикум для вузов. М.: Юрайт, 2025. 235 с.

23. Persson B.N.J. Sliding friction: physical principles and applications. Springer Science & Business Media, 2013. 516 p.

24. Шаповалов В.В., Сладковски А., Эркенов А.Ч. Актуальные задачи современной триботехники и пути их решения // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2015. № 1. С. 64–68.

25. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: Физматлит, 2007. 368 с.

26. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: Физматлит, 2013. 352 с.

27. Пашечко М., Шилько С., Чернец М. Сравнительная оценка трибологической эффективности угле- и стеклонаполненных полиамидных композитов методами субмикромеханической диагностики поверхностных слоев до и после испытаний на изнашивание при сухом трении скольжения // *Трение и износ*. 2023. № 5. С. 470–479.

28. Bhushan B. *Modern Tribology Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2000. 1720 p.
29. Бузник В.М., Лурье С.А., Волков-Богородский Д.Б., Князева А.Г., Соляев Ю.О., Попова Е.И. Об учете масштабных эффектов при моделировании механических и трибологических свойств двухфазных микро- и наномодифицированных полимерных покрытий // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2015. № 4. С. 36–54.
30. Dowson D. *History of Tribology*. 2nd ed. London: Professional Engineering Publishing, 1998. 792 p.
31. Nirmal U., Albawab T., Halim I., Salem M., Elsayed M., Singh J. A review on tribological wear test rigs for various applications // *International Journal of Integrated Engineering*. 2018. V. 10. № 8. P. 202–217.
32. Dienwiebel M., Bouchet M.I.D.B. (ed.). *Advanced analytical methods in tribology*. Springer, 2018. 115 p.
33. Gocman K., Kałdoński T. Neural networks as a friction classifiers // *Problemy Eksploatacji*. 2007. P. 111–118.
34. Pashkov D.M., Belyak O., Guda A., Kolesnikov V. Reverse engineering of mechanical and tribological properties of coatings: results of machine learning algorithms // *Physical Mesomechanics*. 2022. V. 25. № 4. P. 296–305.
35. Иваночкин П.Г., Кудряков О.В., Колесников И.В., Мантуров Д.С. Применение искусственных нейронных сетей для моделирования ионно-плазменных покрытий триботехнического назначения // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2021. № 3. С. 185–192.

Для цитирования: Раткевич Е.А., Болотов А.Н. Современная трибология: методологические аспекты исследований // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 2 (30). С. 41–51.

MODERN TRIBOLOGY: METHODOLOGICAL ASPECTS OF RESEARCH

E.A. RATKEVICH, Cand. Sc., A.N. BOLOTOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University

22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ekrasavina26@gmail.com

The article examines problems in tribology research methods. An integrated multiscale methodology needs to be developed. The methodology should combine experimental data at the macro- and microscopic levels. Chemical transformations on surfaces during friction should also be taken into account. All data is processed using computer modelling methods. The methodology allows for detailed investigation of friction and wear processes at all structural levels, from the atomic to the macroscopic scale. This significantly improves the accuracy of predicting the durability of materials. New opportunities are emerging for designing innovative solutions in high-tech fields. Methods such as spectroscopy, microindentation, tribometry and atomic force microscopy were evaluated, as well as the prospects and possibilities of using artificial intelligence and machine learning to describe tribological processes.

Keywords: tribology, macroscopic analysis, microscopic analysis, atomic force microscopy, tribometry, spectroscopy, computer modelling.

Поступила в редакцию/received: 28.01.2026; после рецензирования/revised: 09.02.2026;
принята/accepted: 16.02.2026

ФРИКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

А.Ф. ГУСЕВ, канд. техн. наук, В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук,
М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Гусев А.Ф., Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2026

Экспериментально определены фрикционные характеристики ряда нитридных керамических материалов в паре со стальным контртелом при комнатной и повышенной температурах (до 450 °С): коэффициенты трения по Амонтону и Кулону и параметры удельной силы трения, выражающие ее зависимость от нормального напряжения в контакте. Для всех исследованных пар трения коэффициент трения по Амонтону убывает с ростом нормальной нагрузки в два и более раз. Коэффициент трения по Кулону определяли как коэффициент биномиальной линейной регрессионной зависимости силы трения от нормальной нагрузки, он постоянен для данной пары трения в данных условиях эксплуатации. Выявлена тесная корреляционная связь соответствующих параметров фрикционного взаимодействия на уровне напряжений и сил.

Ключевые слова: керамические материалы, трение, коэффициент трения, удельная сила трения, температура.

ВВЕДЕНИЕ

Керамические материалы различного происхождения широко используются в современных технических устройствах. Нитридная керамика обладает рядом достоинств, таких как высокая твердость, износостойкость, устойчивость к температурному и химическому воздействию. Ее широко применяют в качестве защитных покрытий для деталей различного назначения, особенно работающих при повышенных температурах, в станкоинструментальной, электротехнической, аэрокосмической и других отраслях промышленности [1, 2].

Цель данной работы – исследовать фрикционные характеристики керамических материалов в паре со сталью при комнатной и повышенных температурах.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Традиционные характеристики фрикционных свойств пары трения – сила и коэффициент трения. Следуя ГОСТ 27674-88, последний обычно определяют как отношение силы трения $F_{тр}$ к нормальной нагрузке N , что соответствует закону трения Амонтона

$$F_{тр} = f_A N.$$

Недостатком коэффициента трения по Амонтону является его зависимость от нормальной нагрузки, как правило наблюдаемая в экспериментах. Эта зависимость

практически исключает возможность использования данного коэффициента в расчетах фрикционных узлов, так как его справочное значение может отличаться от действительного в несколько раз.

Альтернативой закону трения Амонтона является двучленный закон трения Кулона

$$F_{mp} = F_0 + f_c N, \quad (1)$$

где F_0 – сила трения в отсутствии нормальной нагрузки на контакт; f_c – коэффициент трения по Кулону. Формулу (1) с точки зрения экспериментатора можно рассматривать как уравнение линейной регрессии величины силы трения (зависимой переменной) на величину нормальной нагрузки (независимой переменной). В таком случае коэффициент трения f_c по определению является величиной, не зависящей от нормальной нагрузки (по крайней мере, в заданном диапазоне нагрузок), и может служить фрикционной характеристикой данной пары трения в данных условиях эксплуатации. В этой работе именно коэффициент трения по Кулону наряду с параметром F_0 экспериментально определялся как характеристика исследуемой пары трения на уровне сил.

Наряду с силой трения сопротивление относительному движению контактирующих тел в трибологии часто оценивают удельной силой трения $\tau = \frac{F_{mp}}{A_r}$, где A_r – фактическая площадь контакта, на которой происходит непосредственное взаимодействие контактирующих тел (например, молекулярное). Максимальная удельная сила трения покоя, при которой контактирующие тела приходят в относительное движение, является аналогом критического напряжения сдвига в механике сплошных сред, при котором происходит разрушение тела и его части также приходят в относительное движение.

Удельная сила трения, как показывают эксперименты, также зависит от удельной нормальной нагрузки – фактического контактного давления p_r , которое представляет собой среднее нормальное напряжение на площадках фактического контакта. Эту зависимость выражают уравнением, по форме совпадающим с уравнением (1) для сил

$$\tau = \tau_0 + \beta p_r, \quad (2)$$

где параметр τ_0 аналогичен F_0 , а так называемый пьезокоэффициент β аналогичен коэффициенту трения f_c . Параметры τ_0 и β также приводятся в литературе [3], имеются исследования их зависимости от температуры для металлических материалов [4].

Уравнение (2) также можно считать уравнением линейной регрессии зависимой переменной τ на независимую переменную p_r и, соответственно, определить параметры τ_0 и β из экспериментальных данных.

В данной работе параметры исследуемых фрикционных пар определяли в единичном контакте с первоначальным касанием в точке по схеме: шаровой стальной индентор – плоская поверхность керамического материала, нанесенного на металлическую подложку.

Такая схема выгодна контролируемой величиной площади фактического контакта, которую при небольших контактных нагрузках и малой шероховатости

контактирующих поверхностей можно считать кругом с радиусом a , рассчитываемым по известной формуле Г. Герца

$$a = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{Nr}{E^*} \right)^{\frac{1}{3}},$$

где r – радиус шарового индентора; E^* – эквивалентный модуль упругости материалов контактирующих тел.

$$E^* = \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{-1},$$

где $E_1, 2$ и $\mu_1, 2$ – модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов контактирующих тел.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальное определение фрикционных характеристик керамических материалов проводили на микротрибометре [5]. Исследованы четыре керамических материала в виде покрытий на титане: нитрид титана TiN, нитрид циркония ZrN, нитрид молибдена Mo₂N и двухфазное покрытие на основе нитрида алюминия-кремния AlSiN. Покрытия толщиной 3...4 мкм наносили на титановую подложку методом физического ионно-плазменного осаждения на установке вакуумного катодно-дугового напыления с одновременной подачей в камеру реакционного газа – азота.

Плоский образец из титана с покрытием контактировал с шаровым индентором из стали ШХ15 диаметром 1 мм. Контактная нагрузка изменялась в пределах 0,196...3,92 мН (0,2...4 гс). При заданной нормальной контактной нагрузке измеряли максимальную величину статической силы трения. Повторность экспериментов была пятикратной.

Для проведения измерений силы трения при повышенной температуре оправку с плоским образцом помещали в электронагреватель. Температуру плоского образца измеряли термопарой, размещенной вблизи его поверхности. В ходе эксперимента заданная температура автоматически поддерживалась путем регулировки силы тока в спирали нагревателя с помощью электронного контрольно-следящего потенциометра. Исследован диапазон температур от комнатной (20 °С) до 450 °С.

Дальнейшая обработка экспериментальных данных проходила следующим образом. По известным значениям максимальной силы трения покоя $F_{тр}$ и нормальной контактной нагрузки N находили зависимость $F_{тр}(N)$ и аппроксимировали ее линейной функцией вида (1). Коэффициенты F_0 и f_c определяли как параметры линейной регрессии зависимой величины $F_{тр}$ на независимую величину N . Затем, рассчитав величину фактической площади контакта $A_r = \pi a^2$, где a – радиус площадки контакта по формуле (3), находили при заданной нормальной нагрузке максимальную удельную силу трения покоя $\tau = \frac{F_{мп}}{A_r}$ и соответствующее фактическое контактное давление $p_r = \frac{N}{A_r}$. Получив таким образом эмпирическую зависи-

мость $\tau(p_r)$, аппроксимировали ее линейной функцией (2) и по ней определяли регрессионные коэффициенты τ_0 и β .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 1 приведены примеры типичных зависимостей коэффициентов трения по Амонтону $f_A(N)$ для двух пар трения. Как и ожидалось, для этих и всех других исследованных пар трения коэффициент трения f_A убывает с ростом нагрузки. Этот факт указывает на необходимость применения к исследованным парам трения закона трения Кулона (1). Величину F_0 в формуле, выражающей этот закон, обычно связывают с адгезионным взаимодействием контактирующих тел.

Действительно, примеры экспериментально полученных зависимостей максимальной силы трения покоя от нормальной нагрузки, приведенные на рис. 2, подтверждают их соответствие закону трения Кулона. Эмпирические зависимости $F_{тр}(N)$, приведенные на рис. 2, а также аналогичные зависимости для других исследованных пар, хорошо аппроксимируются линейными функциями вида (1) с коэффициентами корреляции, близкими к единице.

Фрикционные характеристики F_0 и f_C исследованных пар трения, определенные по описанной выше методике, приведены в табл. 1.

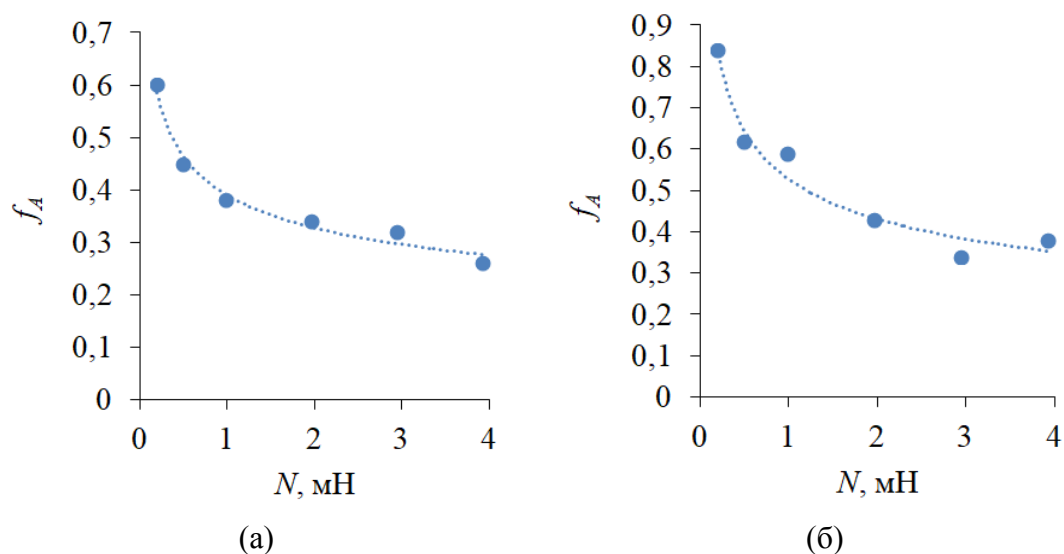


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения по Амонтону f_A от нормальной контактной нагрузки N для керамических материалов в паре со сталью: TiN при 300 °C (а); ZrN при 450 °C (б)

Прочерки в графе табл. 1 свидетельствуют о том, что данная величина статистически незначима. Для соответствующих пар трения можно считать $F_0 = 0$ и применять к ним закон трения Амонтона.

Типичные зависимости удельной силы трения τ от фактического контактного давления p_r показаны на рис. 3, а параметры удельной силы трения τ_0 и β , определенные по описанной выше методике, приведены в табл. 2.

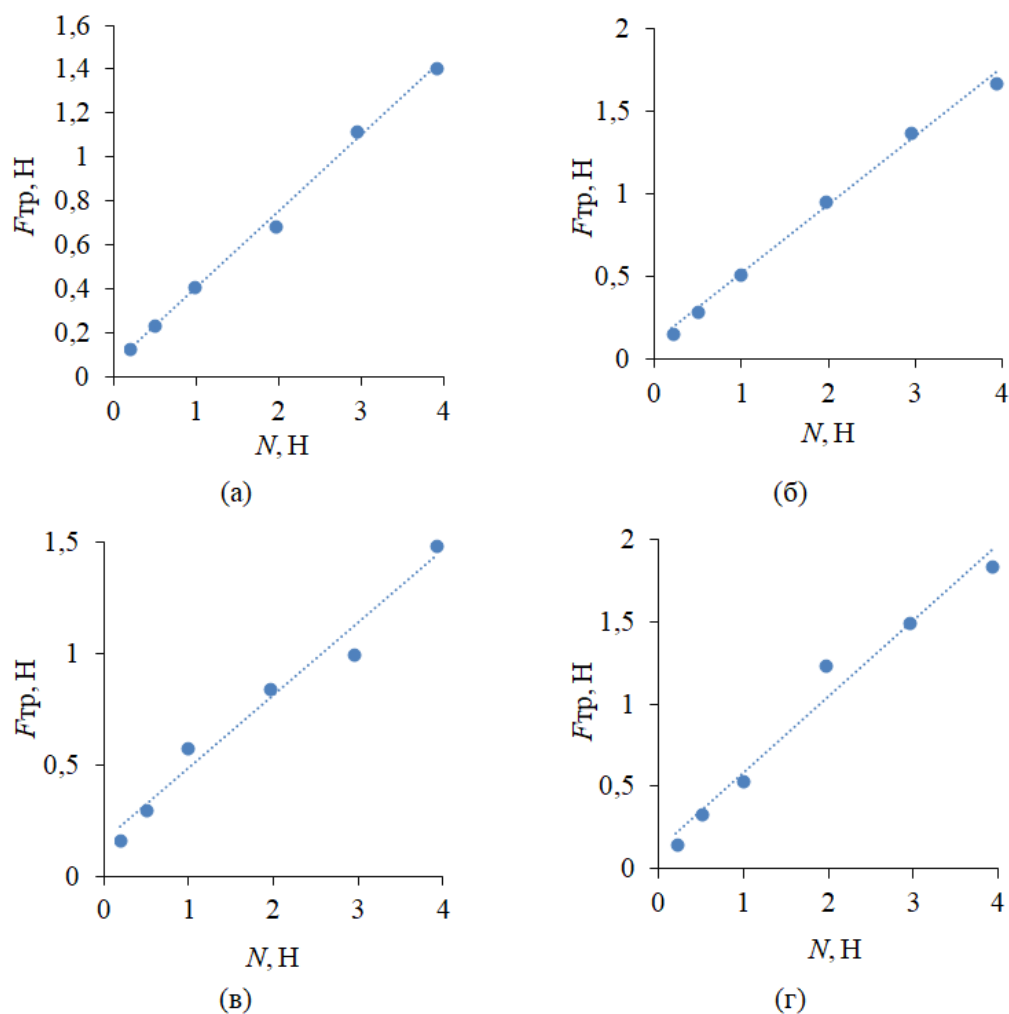


Рис. 2. Зависимости силы трения $F_{тр}$ от нормальной нагрузки N для керамических материалов в паре со сталью: TiN при 20 °C (а); Mo₂N при 300 °C (б); ZrN при 450 °C (в); AlSiN при 20 °C (г). Точки – экспериментальные результаты; пунктир – линейная аппроксимация

Таблица 1. Коэффициенты в законе трения Кулона (формула (1))

Материал покрытия	Температура, °C	F_0 , мН	f_c
TiN	20	$0,62 \pm 0,022$	$0,346 \pm 0,010$
	300	$0,113 \pm 0,047$	$0,254 \pm 0,022$
	450	–	$0,400 \pm 0,026$
ZrN	20	–	$0,412 \pm 0,029$
	300	$0,137 \pm 0,046$	$0,282 \pm 0,021$
	450	$0,158 \pm 0,060$	$0,327 \pm 0,027$
Mo ₂ N	20	$0,182 \pm 0,073$	$0,223 \pm 0,030$
	300	$0,107 \pm 0,030$	$0,416 \pm 0,014$
	450	$0,238 \pm 0,073$	$0,335 \pm 0,030$
AlSiN	20	$0,122 \pm 0,079$	$0,463 \pm 0,036$
	300	$0,101 \pm 0,036$	$0,316 \pm 0,016$
	450	–	$0,584 \pm 0,048$

Зависимость удельной силы трения от фактического контактного давления в большинстве случаев также успешно аппроксимируются линейной функцией, однако с

меньшим коэффициентом корреляции (но не менее 0,85). В четырех случаях величина коэффициента β оказалась статистически незначима (см. прочерки в табл. 2). В этом случае удельную силу трения можно считать не зависящей от фактического контактного давления. В двух случаях величина параметра τ_0 оказалась статистически незначимой, т.е. удельную силу трения можно считать прямо пропорциональной фактическому контактному давлению.

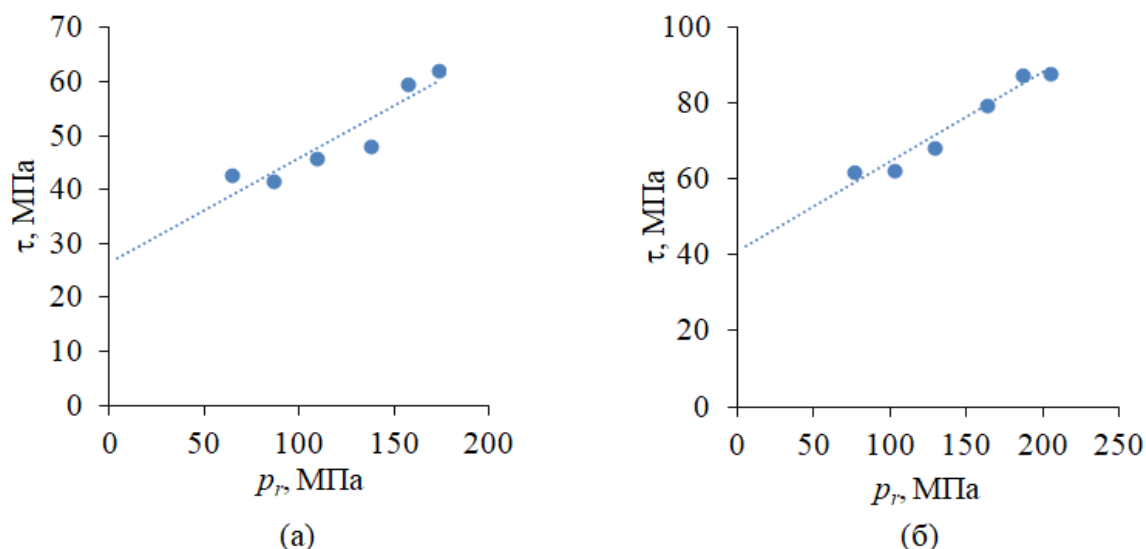


Рис. 3. Зависимость удельной силы трения τ от фактического контактного давления p_r для керамических материалов в паре со сталью: TiN при 20 °C (а); Mo₂N при 300 °C (б). Точки – экспериментальные результаты; пунктир – линейная аппроксимация

Таблица 2. Параметры удельной силы трения

Материал покрытия	Температура, °C	τ_0 , МПа	β
TiN	20	$26,5 \pm 5,2$	$0,19 \pm 0,040$
	300	$31,8 \pm 3,6$	$0,096 \pm 0,028$
	450	$17,2 \pm 9,0$	$0,30 \pm 0,070$
ZrN	20	–	$0,37 \pm 0,081$
	300	$63,1 \pm 9,9$	–
	450	$75,5 \pm 11,2$	–
Mo ₂ N	20	$45,4 \pm 10,1$	–
	300	$41,0 \pm 4,0$	$0,24 \pm 0,026$
	450	$82,4 \pm 20,2$	–
AlSiN	20	$44,5 \pm 15,0$	$0,33 \pm 0,076$
	300	$62,4 \pm 11,3$	$0,090 \pm 0,058$
	450	–	$0,45 \pm 0,14$

Наблюдается тесная корреляция соответствующих фрикционных параметров исследованных пар трения на уровне сил и на уровне напряжений: между параметрами β и f_c с коэффициентом корреляции $R = 0,80$, а между параметрами τ_0 и F_0 с коэффициентом корреляции $R = 0,84$. При этом величина коэффициента β всегда меньше соответствующей величины коэффициента трения по Кулону f_c .

В среднем с ростом температуры наблюдается увеличение параметров τ_0 и f_c ; выраженной зависимости параметра β от температуры не обнаружено. В этом

направлении требуются дополнительные исследования для увеличения объема статистических данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование фрикционных характеристик керамических покрытий в паре со стальной поверхностью показало, что на уровне сил фрикционное взаимодействие адекватно описывается двучленным законом трения Кулона, на уровне напряжений – также двучленным линейным выражением, связывающим удельную силу трения с фактическим контактным давлением.

Обнаружена тесная корреляционная связь соответствующих параметров фрикционного взаимодействия на уровне напряжений и сил, а именно: коэффициента трения по Кулону f_c и параметра удельной силы трения β , а также параметра F_0 в законе трения Кулона и параметра удельной силы трения τ_0 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров Д.А., Будиновский С.А., Горлов Д.С. Разработка функциональных ионно-плазменных покрытий на основе многослойных гетерогенных структур нитридов металлов // *Труды ВИАМ*. 2021. № 8 (102). С. 34–42.
2. Ерофеев В.И., Кривина Л.А., Тарасенко Ю.П., Царева И.Н. Ионно-плазменная технология нанесения износостойкого покрытия нитрида титана // *Станкоинструмент*. 2018. № 2 (011). С. 60–63.
3. Хопин П.Н., Шишкин С.В. Трибология: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2021. 236 с.
4. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 200 с.
5. Патент РФ 2150688. *Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала* / Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Нестерова И.Н., Иванова А.А. Заявл. 25.12.1998. Опубл. 10.06.2000, Бюл. № 16.

Для цитирования: Гусев А.Ф., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Фрикционные характеристики керамических материалов при повышенных температурах // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 2 (30). С. 52–59.

FRICITIONAL CHARACTERISTICS OF CERAMIC MATERIALS AT HIGHER TEMPERATURES

A.F. GUSEV, Cand. Sc., V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

The friction characteristics of a number of nitride ceramic materials paired with a steel counterbody were experimentally determined at room and elevated temperatures (up to 450 °C). These included the Amonton and Coulomb friction coefficients and the parameters of specific friction force, expressing its dependence on the normal stress in the contact. For all the friction pairs studied, the Amonton friction coefficient decreases by a factor of two or more with an increase in the normal load. The Coulomb friction coefficient was determined as the coefficient of the binomial linear regression dependence of friction force on the normal

load; it is constant for a given friction pair under the given operating conditions. A close correlation was found between the corresponding frictional interaction parameters at the stress and force levels.

Keywords: ceramic materials, friction, friction coefficient, specific friction force, temperature.

Поступила в редакцию/received: 18.12.2025; после рецензирования/revised: 12.01.2026;
принята/accepted: 16.01.2026

УДК 621.891

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-2-59-69

ПРИМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук, В.В. НОВИКОВ, канд. техн. наук,
А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: onvk@mail.ru

© Новикова О.О., Новиков В.В., Болотов А.Н., 2026

Показана правомерность применения классического подхода к решению контактных задач для двухкомпонентных композиционных поверхностей, основанного на контроле микрогеометрии профиля поверхностей. В качестве композиционной поверхности рассмотрено однородное полупространство из материала матрицы с расположенными в нем с заданной объемной плотностью сферическими сегментами одинакового радиуса, моделирующими включения из материала наполнителя глобулярной формы. Профиль композиционного полупространства представляет собой эквивалентную поверхность со степенным распределением вершин микронеровностей, аналогичным опорной кривой распределения материала реальной детали. Проверена инженерная модель оценки фрикционных характеристик трибоузла с композиционными материалами применительно к контакту алмазосодержащего керамического материала и керамического однородного полупространства. Данная модель может быть использована для определения фрикционных характеристик композиционных материалов с наполнителями глобулярной формы.

Ключевые слова: микрогеометрия поверхности, контактная задача, фрикционные характеристики, композиционные материалы, трение, износ.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатационные свойства узлов трения во многом определяются контактным взаимодействием деталей, входящих в их конструкцию. Физико-механические свойства поверхностных слоев трущихся деталей, их геометрия на микро- и наноуровне напрямую определяют фрикционные свойства, контактную жесткость и герметичность трибоузла. В российской и мировой научной и инженерной среде признана модель описания геометрических характеристик поверхности, предложенная профессором Н.Б. Демкиным [1, 2]. Основные положения разработанной им методики определения микрогеометрии поверхности закреплены в нормативных документах Российской

Федерации [3–5]. Этот подход позволил рассчитать такие важные характеристики контакта шероховатых тел, как реальное контактное давление и реальная площадь контакта.

Задача контакта шероховатых поверхностей, учитывающая модель поверхности и метод решения, представляет интерес и в настоящее время. В работе [2] предложен подход, основанный на методе усреднения, для решения дискретных контактных задач для тел с заданной макро- и микрогеометрией. Проанализировано влияние параметров микрогеометрии на реальные и номинальные характеристики контакта. Значение работ Н.Б. Демкина по анализу микрорельефа контактной поверхности, методов обработки профилограмм отмечено в исследовании [6], где на основе использования параметров микрогеометрии контактирующих поверхностей рассматривается методика численного моделирования характеристик контактных пар в технических системах. Показаны перспективы создания трехмерной модели шероховатой поверхности, наиболее приближенной к реальной, как основы при выполнении расчетов характеристик контакта.

В современных исследованиях по контактному взаимодействию шероховатых тел, несмотря на многообразие подходов, изучаются однородные (гомогенные) материалы и полупространства. Однако инновационные наукоемкие материалы часто представляют собой матричную структуру, при которой в основной материал-связку включены наполнители или легирующие элементы. Включения отличаются по физико-механическим свойствам от основного материала и имеют четко очерченные границы.

В настоящее время наиболее распространены исследования контактных задач фрикционных композиционных материалов с полимерными матрицами или полимерными наполнителями, что обусловлено доказанными антифрикционными свойствами материалов такого типа. В работе [7] при анализе триботехнических характеристик однонаправленных волокнистых композитов тетрагональной структуры использован подход механики композиционных материалов. В основе решения контактной задачи «сталь – композит» лежит метод локального приближения, учитывающий влияние компонентов структуры, применен прикладной пакет ANSYS Mechanical. Задача решена из условия, что в зоне взаимодействия контакт идеальный. Авторами работ [8, 9] использован метод конечно-элементного анализа. Взаимодействие стального контртела по полимерному композитному образцу в условиях сухого трения скольжения рассмотрено с учетом микроструктуры, шероховатости контртела и фрикционного нагрева материалов пары трения. В исследовании [10] проанализировано поведение полимерных композитных материалов, армированных хаотично ориентированными короткими натуральными волокнами, подверженных внешним напряжениям в условиях квазистатического контакта и сухого трения. Контактная задача предполагает, что композиционный материал в виде двумерной плоской пластины находится во фрикционном контакте с жестким основанием. Предложено решение методом конечных элементов в пространстве и аппроксимация методом конечных разностей во времени. Можно сделать вывод о том, что в большинстве исследований не учитывают шероховатость контактирующих поверхностей, а предполагают их абсолютно гладкими. Контактная задача решена конечно-элементным методом.

Значительно меньшее количество работ посвящено решениям контактных задач композиционных материалов с относительно твердыми матрицами и включениями. К такому типу материалов относятся, например, алмазосодержащие композиционные материалы. При использовании алмазов крупных фракций получают инструментальные материалы для абразивной обработки. Данные материалы широко распространены, но традиционная связка обычно полимерная, пластичная из мягкого

металла или керамическая из легкоплавкого стекла. Инженерные модели, описывающие фрикционные свойства таких материалов, часто носят феноменологический характер и не включают примеры решения контактных задач [11, 12].

Микро- и нанодисперсный алмаз, вводимый в качестве наполнителя, обладает высокой твердостью, прочностью и одновременно низким трением, что позволяет получать инновационные трибоматериалы [13–16]. В современных исследованиях значительное внимание уделяется физико-химическим аспектам получения данных материалов, их физико-механическим свойствам и практическому применению в узкоспециализированных узлах трения. Решение контактных задач с учетом микрогеометрии взаимодействующих поверхностей не рассматривается. Л.В. Судник, П.А. Витязь, А.Ф. Ильющенко исследуют получение и применение алмазосодержащих абразивных нанокомпозиционных материалов со стеклокерамической матрицей. Ими исследуется связь между структурой рабочего слоя, внутренней структурой и эксплуатационными параметрами [16], напряженно-деформированное состояние поверхности алмазосодержащих композиционных материалов анализируется методами конечных элементов и математической статистики. Проводится анализ микрогеометрии (морфологии) поверхности композиционного материала (инструмента) и контртела (обрабатываемой детали). Однако зависимость характеристики износа контртела, выраженная как производительность шлифования, построена на обработке экспериментальных данных, без учета результатов решения контактной задачи и параметров профиля поверхностей. В работе сделан вывод о возможности упругого, пластического и упругопластического контакта алмазного инструмента на стеклокерамической матрице с металлической деталью, в зависимости от вида обработки.

По результатам анализа исследований можно констатировать отсутствие в научной литературе простых инженерных моделей для описания свойств фрикционного контакта для двухкомпонентных систем. Представляется интересным рассмотреть трибозаимодействие композиционных материалов с точки зрения классического подхода. Целью исследования является проверка инженерной модели фрикционных характеристик контакта композиционных двухкомпонентных материалов, основанной на классическом подходе контроля и описания микрогеометрии профиля поверхности.

СТРУКТУРА ИССЛЕДУЕМОГО МАТЕРИАЛА, ВЫБОР МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТИ

Рассмотрим композиционный материал, представляющий собой двухслойную структуру с подложкой из основного гомогенного материала – вентильного металла и композиционного верхнего слоя из керамической матрицы с включениями микродисперсных алмазов [17–19]. Данную систему, в которой все материалы отличаются по физико-механическим свойствам, будем называть «алмазосодержащий композиционный материал» (АКМ). Толщина керамического слоя значительна (до 1,3 мм), что позволяет пренебречь влиянием основания при решении контактной задачи и считать поверхность АКМ полупространством из композиционного материала.

Матрица АКМ состоит в основном из оксидов алюминия Al_2O_3 преимущественно α -модификаций и незначительного процента β - и γ -модификаций. В матрицу (связку) включены зерна алмаза зернистостью (диаметром) d от 14/10 до 125/100 мкм. По границам алмазов присутствует графит, образовавшийся под воздействием высокой температуры при спекании алмазно-алюминиевой заготовки и последующем микроплазменном модифицировании поверхности (рис. 1). Концентрацию алмаза в алмазоносном слое можно описать двумя характеристиками: объемной

плотностью τ и технологической концентрацией алмаза K , принятой при производстве и использовании абразивного алмазного инструмента. Объемная плотность τ рассчитывается как отношение объема алмазных зерен к общему объему алмазосодержащего слоя. При определении K за 100%-ю концентрацию алмаза в алмазосодержащем материале принимают содержание алмазного порошка в количестве 4,39 карата в 1 см^3 . Внешний вид поверхности композиционного материала приведен на рис. 2. Более светлые участки – материал керамической связки. Частично графитизированные алмазы – это темные зерна, частично утопленные в матрицу. Виден блеск алмазов, не покрытых слоем графита.

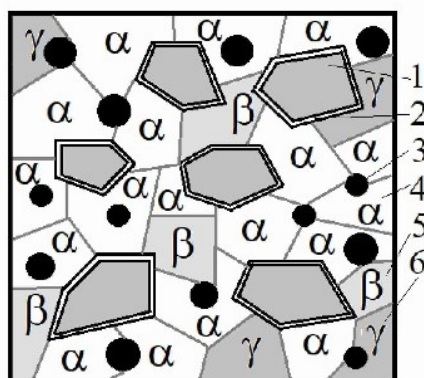


Рис. 1. Принципиальная модель структуры АКМ: 1 – дисперсный алмаз; 2 – графит; 3 – поры; 4 – α -модификация Al_2O_3 ; 5 и 6 – β - и γ -модификации Al_2O_3

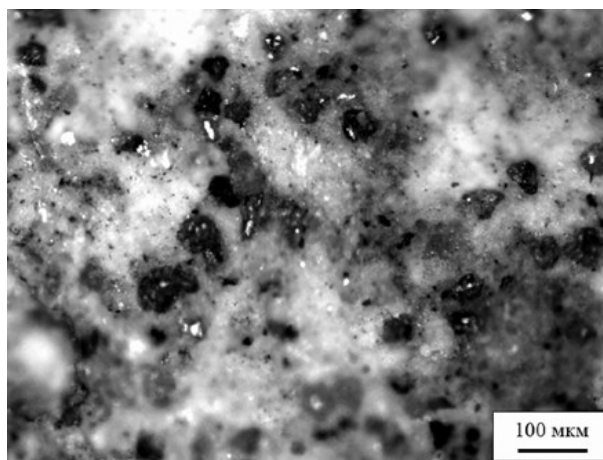


Рис. 2. Поверхность АКМ: $d = 80/63$, $K = 75 \%$

Сопоставить размер дисперсных алмазов и микронеровностей поверхности матрицы можно на рис. 3. Для поверхности трения АКМ ($d = 80/63$, $K = 50 \%$, рис. 3) после приработки высота сглаживания $R_p = 5,3 \text{ мкм}$, что в 12–16 раз меньше диаметра алмаза. Средний шаг неровностей профиля $S_m = 136 \text{ мкм}$ в 1,5–1,8 раза больше линейного размера алмаза. Можно предположить, что даже значительно выступающие над рабочей поверхностью алмазы после приработки частично скалываются и их вылет не превышает половины зернистости, что составляет не более значения R_p для всей поверхности.



Рис. 3. Профилосограмма поверхности трения АКМ после приработки:
 $d = 80/63; K = 50 \%$

В процессе проведенных предварительных испытаний контролировались макроотклонения поверхностей образцов АКМ. Конусность, бочкообразность и другие дефекты не зафиксированы.

Выберем в качестве модели поверхности АКМ полупространство с расположенными на нем сферическими сегментами одинакового радиуса R . Для оценки теоретической модели контакта композиционного материала и контртела применим понятие объемной плотности распределения алмаза τ в АКМ. Будем использовать эквивалентную поверхность со степенным распределением вершин микронеровностей, аналогичным опорной кривой распределения материала реальной детали (рис. 4).

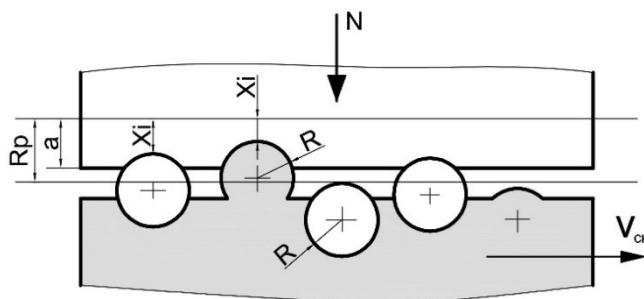


Рис. 4. Модель для задачи контактного взаимодействия однородного полупространства с полупространством из композиционного материала

При описании характеристик контакта примем, что толщина покрытия значительно больше величины внедрения отдельных микронеровностей. Влиянием основного материала детали можно пренебречь и считать, что исследуемая поверхность состоит только из материала АКМ. Это дает возможность воспользоваться формулами Герца при описании характеристик контакта единичной микронеровности [20]. Предположим, что взаимным влиянием микронеровностей можно пренебречь вследствие малой плотности контакта [21].

При оценке трибопараметров сопряжения «гладкое керамическое полупространство контртела – шероховатая поверхность композиционного образца» будем полагаться на молекулярно-механическую теорию трения [21, 22]. В модели учтены предложенные Н.Б. Демкиным понятия фактической и контурной площади контакта, фактического давления и пр. При расчетах исходили из того, что характер контакта микронеровностей после приработки линейно-упругий. Критерием для оценки нагрузки, определяющей смену характера взаимодействия микронеровностей, выбрана микропрочность АКМ σ . Будем считать, что при превышении давления на пятне контакта значения σ на микронеровностях преобладает хрупкое разрушение материала.

ПРОВЕРКА ВЫБОРА МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Инженерная модель фрикционных параметров. Получены уравнения позволяющие рассчитать коэффициент трения композиционного материала при упругом f_y и хрупком f_x контакте:

$$f_y = \frac{\tau_0 \sqrt{tm} (\pi \delta I_e)^{\frac{2\nu}{2\nu+1}}}{2 \Delta^{\frac{\nu}{2\nu+1}} q_a^{\frac{1}{2\nu+1}}} + \beta + 0,19 \alpha_c \frac{tm \Delta^{\frac{\nu}{2\nu+1}} \delta^{\frac{\nu+1}{\nu+0,5}}}{0,75(\nu+1)} \left(\frac{q_a I_e}{\pi} \right)^{\frac{1}{2\nu+1}}, \quad (1)$$

$$f_x = \frac{\tau_0}{\nu \sigma} + \beta + 0,19 \alpha_c \frac{1,5 \sqrt{\Delta}}{\delta \nu} \left(\frac{2 q_a}{tm \sigma \nu} \right)^{\frac{1}{2\nu}}, \quad (2)$$

где q_a – номинальное давление в контакте; ν , tm , – параметры шероховатости взаимодействующих поверхностей [1, 3–5]; $I_e = \left(\frac{I_a I_c}{\tau I_c + (1-\tau) I_a} \right)$ – эквивалентная упругая постоянная (I_a , I_c – упругие постоянные контактов алмаз – материал контробразца, материал матрицы – материал контробразца); $\Delta = \frac{Rp}{R}$, $\delta = \frac{1,5}{\nu(\nu-1)K_3}$ (Rp , K_3 – параметры шероховатости взаимодействующих поверхностей); τ_0 и β – сдвиговое сопротивление молекулярной связи при отсутствии нормальной нагрузки и коэффициент упрочнения молекулярной связи. Принято $\alpha_c = 0,02$ [21].

Величина критического номинального давления q_{ax} , при которой упругий контакт сменяется хрупким, находится из уравнения

$$q_{ax} = \left(\frac{tm \nu \sigma}{2} \right)^{2\nu+1} \times \left[\frac{1,5 \pi I_e}{tm \nu (\nu-1) K_3} \left(\frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{2\nu}. \quad (3)$$

Износ в паре трения композиционный материал – однородный хрупкий материал выражен через параметры, принятые для абразивной обработки как производительность шлифования Q_t и величина удельного расхода алмазов q_v :

$$Q_t = \frac{S \nu t m R p}{2(\nu+1)n} \left[\frac{1,5 \pi q_a I_e}{tm \nu (\nu-1) K_3} \left(\frac{R}{Rp} \right)^{0,5} \right]^{\frac{\nu+1}{\nu+0,5}} \frac{I_k}{I_e}, \quad (4)$$

$$q_v = 8,78 K \left[\frac{I_{ac}}{I_e} \right], \quad (5)$$

где I_k , I_{ac} – упругие постоянные материалов контробразца и композиционного полупространства; S – ширина зоны износа; V – скорость взаимного перемещения образца и контробразца; $n = 1$ – число циклов, приводящих к отделению частиц износа, для абразивного изнашивания [21, 22]. Упругая постоянная композиционного полупространства зависит от концентрации алмазного наполнителя τ и рассчитывается по формуле

$$I_{ac} = \frac{\tau(1-\mu_a^2)}{E_a} + \frac{(1-\tau)(1-\mu_c^2)}{E_c}, \quad (6)$$

где E_a , E_c – модули упругости материалов алмаза и матрицы; μ_a , μ_c – коэффициенты Пуассона материалов алмаза и керамической связки.

Результаты экспериментальных исследований. Проверка адекватности выбора модели поверхности и контактной задачи проводилась путем сопоставления

результатов трибоиспытаний и расчетов по формулам (1)–(6). В процессе эксперимента была реализована схема трения палец – кольцо на машине трения МТ-2 [17]. Образцы из композиционного материала были изготовлены по технологии [18, 19]. Материал контролбразца – электротехническая керамика $\text{BaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$. Исследовались свойства трибоконтакта в условиях сухого и граничного (смазка – вода) трения. Коэффициенты τ_0 и β были определены в соответствии с методикой [23]. Параметры микрогеометрии оценивались согласно ГОСТ 19300-86.

Расчет по формулам (1)–(3) в сопоставлении с результатами трибоиспытаний представлен на рис. 5. Исследования коэффициента трения проводились в отсутствие смазки. По результатам эксперимента f_y стабилен в докритическом диапазоне нагрузок, затем f_x быстро возрастает при увеличении нагрузки. Расчет по формуле (1) показывает снижение f_y при увеличении давления. Согласно теоретической зависимости (2) f_x возрастает при увеличении нагрузки, но менее существенно, чем установлено в результате эксперимента. Критическое давление, рассчитанное по формуле (3), $q_{ax} = 5,71$ МПа, по результатам эксперимента – 6,40 МПа, что соответствует относительной погрешности 11 %.

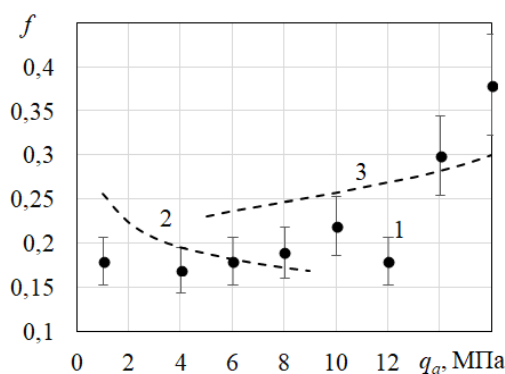


Рис. 5. Оценка коэффициента трения: 1 – результаты эксперимента для АКМ $d = 20/14$, $K = 100$; 2 – расчет по формуле (1); 3 – расчет по формуле (2). Сухое трение

Результат проверки соотношений (4)–(6) показан на рис. 6 и 7.

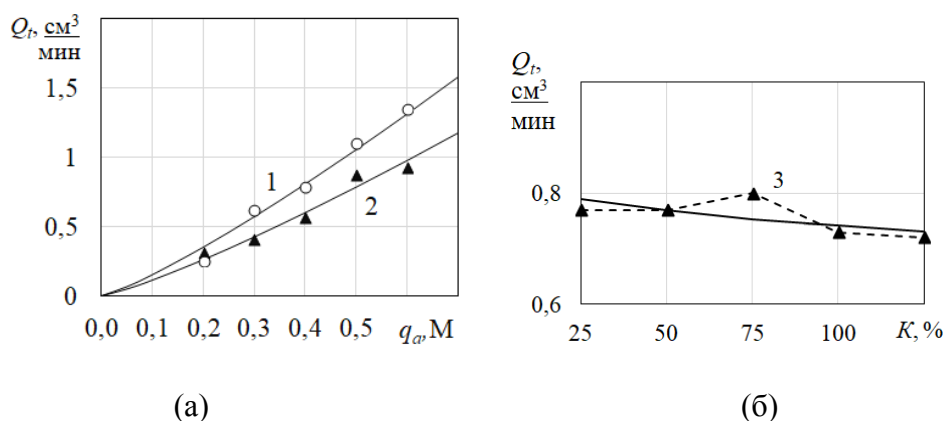


Рис. 6. Зависимость производительности шлифования от давления (а); от концентрации алмазов (б). Сплошные линии – расчет по формуле (4), точки – результаты эксперимента; 1 – $d = 100/80$, $K = 150$ %; 2 – $d = 63/50$, $K = 150$ %; 3 – результаты эксперимента $q_a = 0,5$ МПа, $d = 63/50$. Смазка – вода

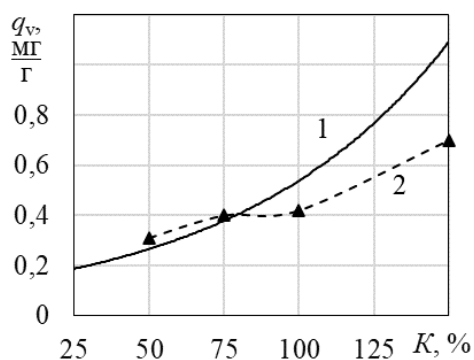


Рис. 7. Влияние концентрации алмазов на их удельный расход:
1 – расчет по формуле (5); 2 – результаты эксперимента $q_a = 0,5$ МПа, $d = 63/50$,
 $K = 150$ %. Смазка – вода

Теоретический расчет и результаты эксперимента показали схожие тенденции изменения исследуемых величин. С увеличением давления производительность шлифования как характеристика износа контробразца возрастает, при использовании алмазов большего диаметра рост Q_t существеннее. С увеличением концентрации алмазов Q_t снижается незначительно. Удельный расход алмазов q_v , характеризующий износ композиционного материала, возрастает с увеличением концентрации алмазных включений.

ОБСУЖДЕНИЕ

1. Характеристики микрогеометрии поверхности [1] входят в соотношения, составляющие инженерную модель фрикционных параметров композиционного материала. Параметры ν , R_p , tm , K_z описывают профиль рабочей поверхности детали и косвенно отражают размер алмазного зерна и структуру АКМ. Результаты решения контактной задачи показали, что классический подход [1, 21, 22] может применяться для оценки взаимодействия сопряженных поверхностей, одна из которых представляет собой двухкомпонентный композиционный материал. Расчеты согласно формулам (1)–(6) удовлетворительно коррелируют с результатами эксперимента.

2. Оценим, как изменяются параметры опорной кривой шероховатой поверхности АКМ: показатель степени ν и tm – относительная опорная длина на уровне средней линии. Диапазон изменения ν в зависимости от размера алмазного наполнителя и способа предварительной обработки поверхности трения композиционного материала от 1,5 до 3, параметр tm изменяется от 0,4 до 0,7.

3. Напрямую трактовать влияние концентрации и размера алмазного зерна на фрикционные параметры как влияние, например, R – радиуса сферического сегмента, некорректно, так как они определяют также механические свойства композиционного материала. Например, при увеличении линейного размера наполнителя снижается микропрочность и, хотя правый сомножитель в формуле (3) увеличивается, величина критического номинального давления практически не зависит от диаметра алмазного зерна. Увеличение концентрации алмазов снижает микропрочность АКМ. Параметр микропрочность σ необходимо определять дополнительно [24].

В соответствии с моделью контактного взаимодействия и выбранной моделью поверхности композиционного материала концентрация алмаза влияет на определение фрикционных параметров согласно (1)–(6) через эквивалентную упругую постоянную контакта АКМ – материал контробразца. Упругие постоянные I_e , I_a , I_c , I_k , I_{ac} рассчитываются теоретически и проверяются экспериментально [25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено применение характеристик профиля поверхности для моделирования контактного взаимодействия двухкомпонентных композиционных материалов.

Показана правомерность применения классического подхода к решению контактных задач для двухкомпонентных поверхностей, в частности контакта алмазосодержащего керамического материала и керамического однородного полупространства. Справедливо в качестве композиционной поверхности принимать однородное полупространство из материала матрицы с расположенными в нем с заданной объемной плотностью сферическими сегментами одинакового радиуса, моделирующими включения из материала наполнителя глобулярной формы.

Размер наполнителя композиционного материала, в нашем случае диаметр алмазного зерна, влияет на фрикционные характеристики исследуемых материалов опосредованно, через параметры микрогеометрии поверхности R , v , R_p , t_m . Диаметр алмазов влияет также на микропрочность материала. Концентрация алмазов определяет в первую очередь механические свойства композиционного материала (его упругие и прочностные характеристики).

Полученная на основе данного подхода инженерная модель может быть применена для определения фрикционных характеристик двух- и многокомпонентных композиционных материалов с наполнителями глобулярной формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
2. Goryacheva I.G. Mechanics of discrete contact // *Tribology International*. 2006. V. 39. I. 5. P. 381–386.
3. ГОСТ 19300-86 Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры. М.: Изд-во стандартов, 1996. 10 с.
4. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. М.: Изд-во стандартов, 1973. 14 с.
5. ГОСТ Р ИСО 4287–2014. Геометрические характеристики изделий. Структура поверхности: профильный метод. Термины, определения и параметры структуры: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: дата введения 2016-01-01. М.: Стандартинформ, 2019. 21 с.
6. Bykov L., Ezhov A. Three-dimensional modeling microgeometry of contact pairs in technical systems // *Materials Science and Engineering*. 2020. V. 709. I. 2. P. 022057.
7. Палкин Д.Д., Чекалкин А.А. Численное моделирование коэффициентов трения однонаправленных волокнистых композитов тетрагональной структуры // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2022. Т. 24. № 2. С. 54–63.
8. Бочкарева С.А., Панин С.В., Люкшин Б.А., Люкшин П.А., Гришаева Н.Ю., Матолыгина Н.Ю., Алексенко В.О. Моделирование фрикционного износа полимерных композиционных материалов с учетом температуры контакта // *Физическая мезомеханика*. 2019. Т. 22. № 1. С. 54–68.
9. Панин С.В., Бочкарева С.А., Алексенко В.О. Развитие и верификация модели изнашивания полимерных композитов с учетом микроструктуры, шероховатости контртела и фрикционного нагрева // *Математическое моделирование в естественных науках*. 2021. Т. 1. С. 114–116.

10. Apsan M.R., Mitu A.M., Pop N., Sireteanu T., Maxim V.M., Musat A. Analysis and Numerical Simulation of the Behavior of Composite Materials with Natural Fibers Under Quasi-Static Frictional Contact // *Journal of Composites Science*. 2025. № 9(7). P. 338.
11. Дроздов Ю.Н., Надеин В.А., Савинова Т.М. Обобщенные характеристики для определения ресурса по износу технической керамики // *Трение и износ*. 2008. Т. 29. № 1. С. 22–28.
12. Кузнецова О.С., Данилович Д.П., Орданьян С.С., Фадин Ю.А. Кинетика изнашивания керамик // *Вопросы материаловедения*. 2012. № 4 (72). С. 370–375.
13. Новиков В.В., Новикова О.О., Болотов А.Н. Особенности структуры и применение материалов, сформированных в электролитной плазме // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 5–13.
14. Xia Y., Lu Y., Yang G., Chen C., Hu X., Song H., Wang B. Application of Nano-Crystalline Diamond in Tribology // *Materials*. 2023. № 16(7). P. 2710.
15. Jin L., Li Y., Liu C., Fan X., Zhu M. Friction mechanism of DLC/MAO wear-resistant coatings with porous surface texture constructed in-situ by micro-arc oxidation // *Surface and Coatings Technology*. 2023. V. 473 P. 30010.
16. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные наноккомпозиты. Минск: Беларуская навука, 2012. 319 с.
17. Новикова О.О., Болотов А.Н., Новиков В.В. Моделирование износа пары трения «алмазосодержащая минералокерамика – керамика» // *Вестник машиностроения*. 2024. Т. 103. № 4. С. 299–304.
18. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Формирование матрицы алмазосодержащего композиционного керамического инструментального материала. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*: Межвузов. сбор. науч. тр. / под ред. В.В. Измайлова. 2019. Вып. 12. С. 80–87.
19. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Исследование режимов формирования алмазосодержащего керамического абразивного материала методом микродугового оксидирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 5–13.
20. Johnson K. L. Contact mechanics / Cambridge University Press, 2001. 452 p.
21. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]. М.: Машиностроение, 2003. 575 с.
22. Крагельский И.В., Добычин М.Н. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
23. Патент РФ 2525585. Способ определения коэффициента трения покоя поверхностного слоя электропроводящего материала / Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Гусев Д.А., Нестерова И.Н., Новоселова М.В. Заявл. 09.04.2013. Опубл. 20.08.2014, Бюл. № 23.
24. Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V. Effect of loading on tribotechnical characteristics of antifriction diamond-bearing mineral ceramics // *Materials Physics and Mechanics*. 2025. Т. 53. № 2. С. 104–112.
25. Demkin N.B., Sutyagin O.V., Tumanova O.O. Investigation of elastoplastic deformation of low-modulus coatings // *Friction and Wear*. 1994. V. 15. № 2. P. 237–242.

Для цитирования: Новикова О.О., Новиков В.В., Болотов А.Н. Применение характеристик профиля поверхности для моделирования контактного взаимодействия композиционных материалов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 2 (30). С. 59–69.

APPLICATION OF SURFACE PROFILE CHARACTERISTICS TO MODELING CONTACT INTERACTION OF COMPOSITE MATERIALS

O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc., V.V. NOVIKOV, Cand. Sc., A.N. BOLOTOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: onvk@mail.ru

The validity of the classical approach to solving contact problems for two-component composite surfaces based on the control of the microgeometry of the surface profile is shown. A homogeneous half-space of matrix material is considered as a composite surface, with spherical segments of the same radius located in it with a given volume density, simulating inclusions of a globular filler material. The profile of the composite half-space is an equivalent surface with a power-law distribution of the vertices of the micro-dimensions, similar to the reference curve of the material distribution of the real part. An engineering model for estimating the frictional characteristics of a triboassembly with composite materials has been tested in relation to the contact of a diamond-containing ceramic material and a ceramic homogeneous half-space. This model can be used to determine the friction characteristics of composite materials with globular fillers.

Keywords: microgeometry of the surface, contact problem, friction characteristics, composite materials, friction, wear.

Поступила в редакцию/received: 02.02.2026; после рецензирования/revised: 10.02.2026;
принята/accepted: 11.02.2026

УДК 621.891

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-2-69-78

УДЕЛЬНЫЕ И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В КОНТАКТЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Афа. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлв В.В., Новоселова М.В., 2026

На примере единичного и множественного контакта технических поверхностей проанализировано соответствие известных в трибологии линейных зависимостей, описывающих их фрикционное взаимодействие: удельной силы трения от фактического контактного давления и силы трения от внешней нормальной нагрузки (закон трения Кулона). Показано, что линейной зависимости удельной силы трения от фактического контактного давления в общем случае соответствует нелинейная зависимость силы трения от внешней нормальной нагрузки. Причина этой нелинейности – зависимость величины фактической площади контакта от нормальной контактной нагрузки. Однако в ограниченном диапазоне изменения последней эта нелинейность проявляется слабо, особенно для множественного контакта, поэтому зависимость силы трения от нормальной нагрузки можно адекватно описывать

двучленным линейным уравнением, выражающим закон трения Кулона. Правомерность этого утверждения проверена экспериментально на примере четырех металлических пар трения.

Ключевые слова: технические поверхности, фактическая площадь контакта, сила трения, удельная сила трения, закон трения Кулона.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе авторы продолжают и обобщают анализ взаимного соответствия эмпирических зависимостей, описывающих фрикционное взаимодействие технических поверхностей: зависимости удельной силы трения от фактического контактного давления и зависимости интегральной силы трения от нормальной контактной нагрузки [1, 2].

В механике и физике твердого тела и других естественных и технических науках прочностные характеристики конструкционных материалов принято выражать через соответствующие напряжения – нормальные или касательные, под действием которых происходит разрушение материала. В трибологии аналогичной прочностной характеристикой фрикционного контакта с размерностью напряжения является удельная сила трения (точнее, максимальная статическая удельная сила трения), соответствующая критическому напряжению сдвига, при котором контактирующие тела, образующие фрикционную пару, приходят в относительное скольжение. Удельная сила трения τ вычисляется как отношение соответствующей интегральной силы трения F_{mp} к фактической площади контакта A_r :

$$\tau = \frac{F_{mp}}{A_r}.$$

Эксперименты показывают [3, 4], что величина удельной силы трения в общем случае зависит от нормального напряжения в контакте:

$$\tau = \tau_0 + \beta p_r, \quad (1)$$

где p_r – фактическое контактное давление, равное среднему нормальному напряжению на площадках фактического контакта; τ_0 и β – коэффициенты, характерные для данной конкретной пары трения в данных конкретных условиях эксплуатации.

Аналогичная зависимость критического напряжения сдвига от нормального давления наблюдается и для сплошных сред, о чем свидетельствуют, например, известные эксперименты П. Бриджмена [5].

Для интегральной силы трения также существует двучленная зависимость, аналогичная по форме зависимости (1), – так называемый закон трения Ш. Кулона [6, 7]:

$$F_{mp} = F_0 + f_c N, \quad (2)$$

где f_c – коэффициент трения; N – нормальная сила.

В механике сплошных сред переход от удельных характеристик (напряжений) к интегральным (силам) происходит простым умножением напряжения на соответствующую площадь сечения детали, на которой действует данное напряжение, при этом площадь сечения в данном расчете является постоянной величиной. В результате, если напряжение описывается линейной функцией вида (1), после умножения получаем также линейную зависимость тангенциальной силы от нормальной, по форме аналогичной зависимости (2).

В случае фрикционного контакта такого простого перехода от удельной силы трения к интегральной не получается, поскольку фактическая площадь контакта A_r не является в общем случае постоянной величиной и зависит от нормальной силы: $A_r = A_r(N)$. В результате получим:

$$F_{mp} = \tau A_r(N) = \tau_0 A_r(N) + \beta p_r A_r(N) = \tau_0 A_r(N) + \beta N.$$

Зависимость $A_r(N)$ в общем случае носит степенной характер $A_r = CN^m$, где $m \leq 1$, и тогда линейной зависимости (1) для удельной силы трения соответствует нелинейная зависимость интегральной силы трения:

$$F_{mp} = \tau_0 CN^m + \beta N. \quad (3)$$

При $m = 0$ (постоянная площадь контакта) приходим к закону трения Кулона (уравнение (2)), при $m = 1$ (площадь контакта прямо пропорциональна нагрузке) – к закону трения Амонтона $F_{mp} = f_A N$, где $f_A = \tau_0 C + \beta$ – коэффициент трения по Амонтону.

Цель данной работы заключается в теоретико-экспериментальном исследовании соответствия широко используемых в трибологии линейных зависимостей (1) и (2).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В работе [1] показано, что в общем случае при переходе от линейной зависимости (2) для силы трения к зависимости удельной силы трения от фактического контактного давления получается нелинейная немонотонная зависимость $\tau(p_r)$, которая только в некотором диапазоне удельных нагрузок может быть аппроксимирована линейной зависимостью вида (1).

В работе [2] показано, что обратный переход от линейной зависимости (1) к зависимости интегральной силы трения от нормальной контактной нагрузки $F_{тр}(N)$ также приводит к нелинейной зависимости.

Проведем более детальный анализ этого перехода с обобщением на случай множественного контакта шероховатых поверхностей, а также проанализируем соответствие параметров удельной и интегральной сил трения как функций контактной нагрузки.

Единичный контакт. Под единичным контактом понимается контакт шар – плоскость с первоначальным касанием в точке. Во-первых, такая схема удобна контролируемой величиной фактической площади контакта, которая представляет собой круг радиусом a , рассчитываемым по известной формуле Г. Герца

$$a = \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{Nr}{E^*} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

где N – нормальная нагрузка; r – радиус шара; E^* – эквивалентный модуль упругости; $E^* = \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$; E_1 , E_2 , μ_1 , μ_2 – модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов контактирующих тел.

Во-вторых, такой контакт может рассматриваться как модель контакта двух выступов шероховатости поверхностей контактирующих деталей. Модель выступов шероховатости в виде сферических сегментов успешно используется в механике контактного взаимодействия технических поверхностей [8].

Для принятой модели контакта, с учетом формулы (3) при $m = 2/3$, фактическая площадь контакта

$$A_r = \pi a^2 = C N^{\frac{2}{3}},$$

где $C = \pi \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{r}{E^*} \right)^{\frac{2}{3}}$.

Пример зависимости (3) приведен на рис. 1 для единичного контакта шарового стального индентора диаметром 1 мм с плоской поверхностью стального образца. Условно приняты следующие параметры удельной силы трения: $\tau_0 = 20$ МПа, $\beta = 0,1$.

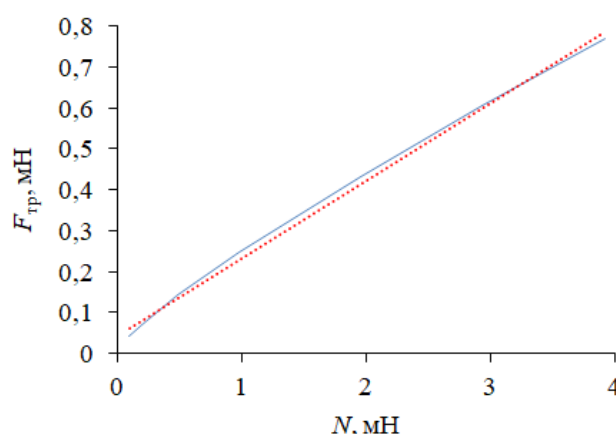


Рис. 1. Пример зависимости силы трения от нормальной нагрузки: сплошная линия – расчет по формуле (3); пунктир – аппроксимация линейной зависимостью

Из рис. 1 видно, что зависимость силы трения от нормальной нагрузки нелинейная, однако хорошо аппроксимируется линейной зависимостью (2) с параметрами $F_0 = 0,044$ мН, $f_c = 0,189$ (коэффициент корреляции 0,998).

Анализ показывает, что в рассматриваемом случае единичного контакта параметр F_0 зависит от параметра τ_0 и не зависит от параметра β , в то же время параметр f_c зависит как от τ_0 , так и от β (рис. 2).

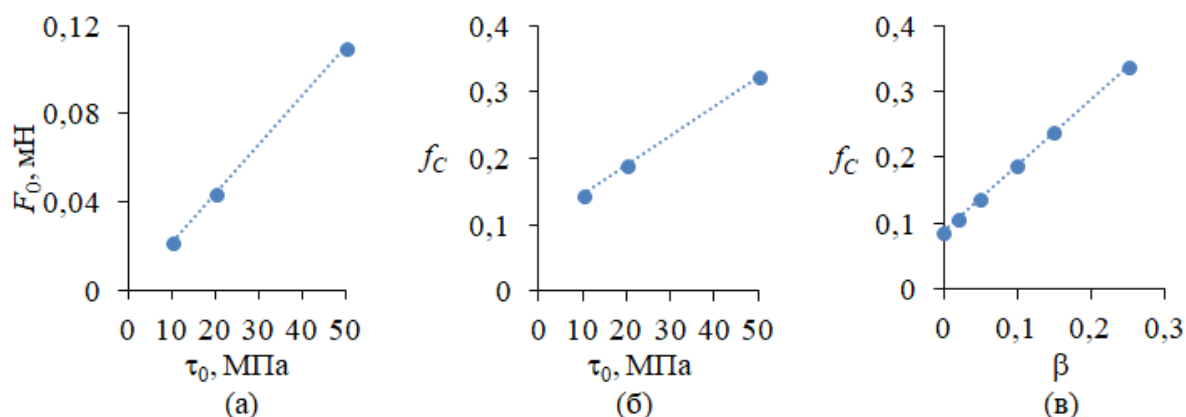


Рис. 2. Зависимость параметров интегральной силы трения от параметров удельной силы трения для единичного контакта: F_0 от τ_0 (а); f_c от τ_0 (б); f_c от β (в)

Множественный контакт. Под множественным контактом в данном случае понимается контакт ансамбля выступов шероховатости контактирующих технических поверхностей, распределенных по высоте шероховатого слоя. Каждый из выступов, как отмечено выше, моделируется сферическим сегментом. Такая модель контакта приводит к зависимости фактического контактного давления от нормальной нагрузки, которую в общем случае можно выразить формулой [8]:

$$p_r = E^* \left(\frac{Ra}{r} \right)^n \left(\frac{p_n}{E^*} \right)^m,$$

или

$$p_r = E^{*(1-m)} \left(\frac{Ra}{r} \right)^n p_n^m,$$

где Ra – арифметическое среднее отклонение профиля шероховатой поверхности контактирующих деталей от средней линии профиля (ГОСТ Р ИСО 4287-2014); r – средний радиус кривизны вершин выступов профиля; p_n – номинальное давление, $p_n = N/A_n$; A_n – номинальная площадь контакта.

Обозначив $C = E^{*(1-m)} \left(\frac{Ra}{r} \right)^n$ и используя, как и в предыдущем разделе, для удельной силы трения двучленную линейную функцию (1), для интегральной силы трения получим выражение, аналогичное уравнению (3):

$$F_{mp} = \frac{\tau_0 A_n^m}{C} N^{1-m} + \beta N. \quad (5)$$

Типичный вид зависимости силы трения от нормальной нагрузки, согласно уравнению (5), представлен на рис. 3. В расчетах приняты параметры модельного контакта, типичные для контакта стальных поверхностей после механической обработки (например, шлифования): $m = 1/6$, $n = 2/5$, $Ra/r = 0,01$. Параметры удельной силы трения, как и в предыдущем разделе, приняты следующие: $\tau_0 = 20$ МПа, $\beta = 0,1$.

Зависимость интегральной силы трения от нормальной нагрузки, формально будучи нелинейной, очень хорошо (даже лучше, чем в случае единичного контакта) аппроксимируется линейной зависимостью, о чем наглядно свидетельствует рис. 3.

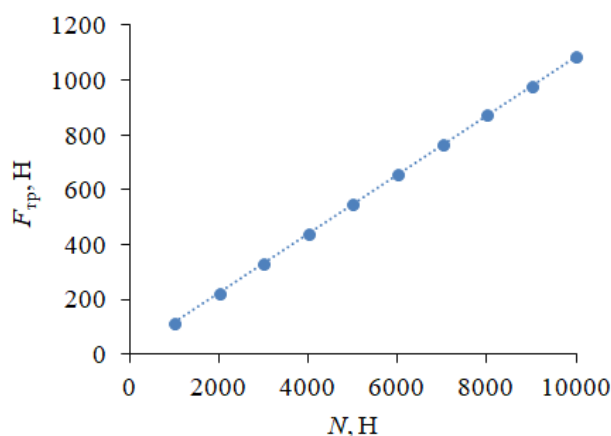


Рис. 3. Типичный вид зависимости интегральной силы трения от нормальной нагрузки для контакта технических поверхностей (множественный контакт): точки – расчет по формуле (5); пунктир – линейная аппроксимация

Аналогично единичному контакту, параметры линейной аппроксимации зависимости $F_{тр}(N)$ определяются параметрами исходного уравнения (1): F_0 зависит от параметра τ_0 и не зависит от параметра β , параметр f_c зависит как от τ_0 , так и от β (рис. 4).

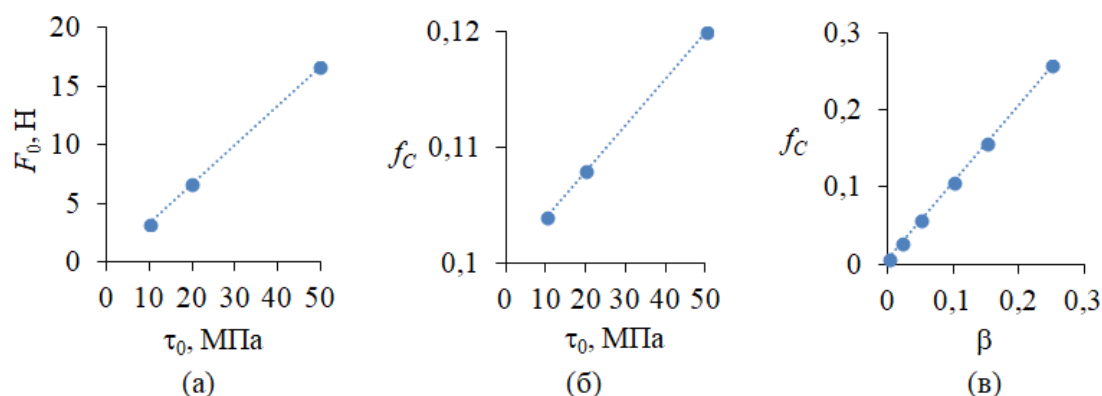


Рис. 4. Зависимость параметров интегральной силы трения от параметров удельной силы трения для множественного контакта: F_0 от τ_0 (а), f_c от τ_0 (б), f_c от β (в)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для экспериментального подтверждения теоретических выводов использовали микротрибометр [9], который позволяет определять зависимость силы трения от нормальной нагрузки в условиях единичного контакта (см. выше) шарового индентора с плоским образцом.

Исследованные пары трения перечислены в табл. 1, их компоненты представляют все основные типы кристаллических решеток металлов: объемноцентрированную кубическую (Mo, W), гранецентрированную кубическую (Ag, Au), гексагональную плотноупакованную (Zr).

Таблица 1. Материалы пар трения

Пара трения шар/плоскость	Кристаллографические и кристаллохимические особенности данной пары трения
Серебро/золото	Неограниченная взаимная растворимость (образуют непрерывный ряд твердых растворов). Атомные диаметры практически одинаковы (отличие 0,7 %). Кристаллические решетки одного типа. Малая толщина поверхностных пленок
Серебро/вольфрам	Низкая взаимная растворимость. Атомные диаметры умеренно отличаются (менее чем на 3 %). Кристаллические решетки различных типов
Цирконий/серебро	Умеренная взаимная растворимость. Атомные диаметры сильно различаются (отличие более 10 %)
Молибден/вольфрам	Высокая взаимная растворимость (образуют непрерывный ряд твердых растворов). Атомные диаметры практически одинаковы (отличие 0,7 %). Кристаллические решетки одного типа

Диаметр шаровых инденторов во всех экспериментах был равен 1 мм, шероховатость контактирующих поверхностей $Ra \leq 0,16$ мкм, что позволяет считать их в данных условиях контактирования гладкими. Внешняя нормальная нагрузка N на контакт создавалась разновесами и изменялась в диапазоне 0,5...4 мН. Диапазон нагрузок, механические свойства материалов пар трения и шероховатость поверхности образцов обеспечивают заведомо упругий контакт, при этом деформационной составляющей сил трения можно пренебречь. Перед экспериментом поверхность образцов обрабатывали полярным и неполярным растворителями и протирали хлопчатобумажной тканью.

На микротрибометре экспериментально определяли зависимость силы трения от нормальной нагрузки $F_{тр}(N)$. Вычислив по формуле (4) радиус контакта $a(N)$, рассчитывали удельную силу трения $\tau = \frac{F_{тр}}{\pi a^2}$ и фактическое контактное давление $p_r = \frac{N}{\pi a^2}$. Полученные данные позволяют построить линейную регрессионную модель зависимости удельной силы трения от фактического контактного давления вида $\tau = \tau_0 + \beta p_r$ и определить коэффициенты τ_0 и β . Примеры таких регрессионных зависимостей представлены на рис. 5.

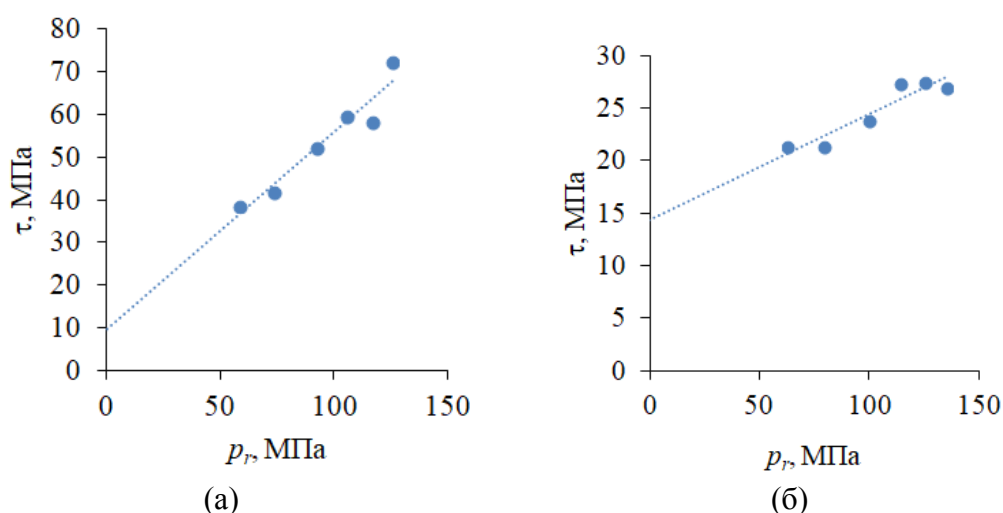


Рис. 5. Примеры регрессионных зависимостей удельной силы трения от фактического контактного давления для пар трения: серебро/золото (а); цирконий/серебро (б). Точки – расчетные значения, пунктир – линейная аппроксимация

Исходя из линейной регрессионной зависимости $\tau(p_r)$ и вычисленных ранее размеров площадки контакта, рассчитывали зависимость интегральной силы трения от нормальной нагрузки $F_{тр}(N)$ и сравнивали ее с аналогичной экспериментальной зависимостью. Результаты сравнения обсуждаются ниже.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 6 представлены результаты сравнения экспериментальных и расчетных зависимостей силы трения от нормальной нагрузки для пар трения из табл. 1. Из рисунка видно, что экспериментальные зависимости $F_{тр}(N)$ хорошо аппроксимируются линейными зависимостями. Расчетные зависимости нелинейны, как это следует из теоретического анализа. Однако в исследованном диапазоне нормальных нагрузок эта нелинейность незначительна и расчетные значения сил трения хорошо ложатся на линейные аппроксимации экспериментальных зависимостей $F_{тр}(N)$.

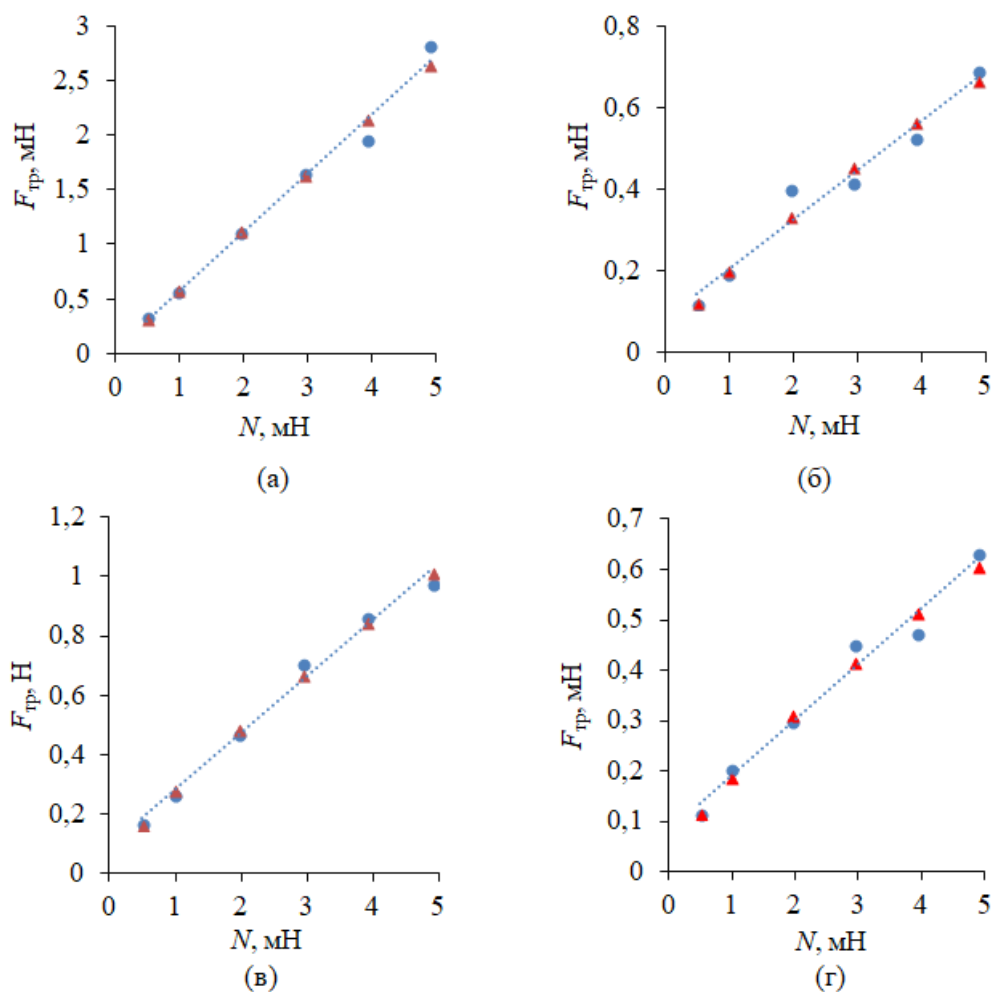


Рис. 6. Зависимости силы трения от нормальной нагрузки для пар трения: серебро/золото (а); серебро/вольфрам (б); цирконий/серебро (в); молибден/вольфрам (г). ● – эксперимент, ▲ – расчет, пунктир – линейная аппроксимация экспериментальных данных

Этот вывод подтверждается данными табл. 2, в которой приведено сравнение экспериментальных и расчетных параметров интегральной силы трения, определенных как коэффициенты линейной регрессии зависимой переменной $F_{тр}$ на независимую переменную N . Параметр F_0 для пары трения серебро/золото в табл. 2 не приводится, так как его значение статистически незначимо.

Таблица 2. Параметры интегральной силы трения

Пара трения шар/плоскость	Экспериментальные значения		Расчетные значения	
	F_0 , мН	f_c	F_0 , мН	f_c
Серебро/золото	–	$0,54 \pm 0,030$	–	0,53
Серебро/вольфрам	$0,084 \pm 0,036$	$0,12 \pm 0,012$	0,078	0,12
Цирконий/серебро	$0,096 \pm 0,033$	$0,19 \pm 0,011$	0,087	0,19
Молибден/вольфрам	$0,079 \pm 0,027$	$0,11 \pm 0,009$	0,080	0,11

Параметры удельной силы трения τ_0 и β , определенные как параметры линейной регрессионной зависимости вида (1), приведены в табл. 3. Из табл. 2 и 3 следует, что параметр β по величине меньше, причем иногда существенно, чем аналогичный параметр f_C , что согласуется с рис. 2в. При этом наблюдается очень тесная корреляция коэффициента трения f_C и параметра β (коэффициент корреляции близок к 1). Какой-либо значимой корреляции параметров τ_0 и F_0 не прослеживается.

Для пар трения серебро/вольфрам и молибден/вольфрам удельная сила трения очень слабо зависит от фактического контактного давления (параметр β мал), и в исследованном диапазоне давлений ее можно считать постоянной.

Таблица 3. Параметры удельной силы трения

Пара трения шар/плоскость	τ_0 , МПа	β
Серебро/золото	$9,6 \pm 6,4$	$0,46 \pm 0,065$
Серебро/вольфрам	$16,9 \pm 4,4$	$0,040 \pm 0,032$
Цирконий/серебро	$14,4 \pm 1,91$	$0,10 \pm 0,018$
Молибден/вольфрам	$34,2 \pm 5,23$	$0,026 \pm 0,019$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной целью было проведено сравнение полученных из эксперимента зависимостей силы трения от нормальной нагрузки $F_{тр}(N)$ и аналогичных расчетных зависимостей, полученных на основании уравнения линейной регрессии удельной силы трения τ на фактическое контактное давление p_r вида (1). Несмотря на нелинейный характер расчетных зависимостей $F_{тр}(N)$, в исследованном диапазоне нагрузок эта нелинейность проявляется слабо и расчетные зависимости хорошо совпадают с экспериментальными, которые, в свою очередь, успешно аппроксимируются двучленным законом трения Ш. Кулона (см. уравнение (2)).

Показано, что параметры F_0 и f_C уравнения, выражающего закон трения Кулона, и параметры τ_0 и β линейной зависимости удельной силы трения от фактического контактного давления взаимосвязаны, при этом F_0 зависит только от τ_0 , а коэффициент трения f_C – как от τ_0 , так и от β .

ЛИТЕРАТУРА

1. Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. О фрикционных характеристиках поверхности лазерной наплавки никелевого сплава // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 1 (29). С. 53–61.
2. Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Новоселова М.В. О регрессионных зависимостях, используемых для описания фрикционного взаимодействия технических поверхностей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 1 (29). С. 46–53.
3. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 199 с.
4. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: Физматлит, 2007. 368 с.

5. Бриджмен П.У. Исследования больших пластических деформаций и разрыва: Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 448 с.

6. Хопин П.Н., Шишкин С.В. Трибология: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2021. 236 с.

7. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник. М.: ИНФРА-М, 2014. 336 с.

8. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Основы механики и физики контактного взаимодействия, трения и изнашивания технических поверхностей: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2025. 172 с.

9. Патент РФ 2150688. *Способ определения коэффициента трения покоя поверхностных слоев материала* / Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Нестерова И.Н., Иванова А.А. Заявл. 25.12.1998. Оpubл. 10.06.2000, Бюл. № 16.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В. Удельные и интегральные характеристики фрикционного взаимодействия в контакте технических поверхностей // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 2 (30). С. 69–78.

SPECIFIC AND INTEGRAL CHARACTERISTICS OF FRICTIONAL INTERACTION IN CONTACT OF ENGINEERING SURFACES

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

On the base of single and multiple contacts between engineering surfaces as examples, the correspondence between well-known tribological linear relationships describing their frictional interaction was analyzed, namely: the relationship between the specific friction force and the actual contact pressure and the relationship between the friction force and the external normal load (Coulomb's friction law). It is shown that the linear relationship between the specific friction force and the actual contact pressure generally corresponds to a nonlinear relationship between the friction force and the external normal load. The cause of this nonlinearity is the dependence of the real contact area on the normal contact load. However, over a limited range of normal contact load variation, this nonlinearity is weak, especially for multiple contacts. Therefore, the relationship between the friction force and the normal load can be adequately described by a binomial linear equation expressing Coulomb's friction law. The validity of this assertion is verified experimentally using four metal friction pairs.

Keywords: engineering surfaces, real contact area, friction force, specific friction force, Coulomb's friction law.

Поступила в редакцию/received: 12.01.2026; после рецензирования/revised: 19.01.2026;
принята/accepted: 23.01.2026

ВОЗМОЖНОСТИ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ СКЛЕРОМЕТРИИ

Д.А. БАРЧУКОВ¹, канд. техн. наук, Е.В. БАРАБАНОВА², канд. физ.-мат. наук,
Л.Е. АФАНАСЬЕВА¹, канд. физ.-мат. наук, И.А. СМОЛЯКОВА¹, канд. техн. наук

¹Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ludmila.a@mail.ru

²Тверской государственный университет,
170100, Тверь, ул. Желябова, 33, e-mail: pechenkin_kat@mail.ru

© Барчуков Д.А., Барабанова Е.В., Афанасьева Л.Е., Смолякова И.А., 2026

Представлены результаты исследований микротвердости методами вдавливания и царапания четырехгранной алмазной пирамидкой на отечественном микротвердомере ПМТ-3. Нанесение царапин на поверхности стали осуществляли при ориентации индентора ребром вперед и гранью вперед. Для регистрации и анализа экспериментальных результатов использовали атомно-силовую микроскоп. Показаны возможности и перспективы применения методов атомно-силовой микроскопии в решении задач склерометрии.

Ключевые слова: микротвердость, склерометрия, контроль, диагностика, атомно-силовая микроскопия.

ВВЕДЕНИЕ

Микротвердость – это интегральное свойство, определяемое многими механическими характеристиками исследуемого материала: пластичностью, пределом упругости, прочностью и др. По значению микротвердости можно косвенно оценивать некоторые механические характеристики материала, между которыми с одной стороны и твердостью – с другой имеется определенная корреляция [1–3].

ГОСТ 9450-76 [4] устанавливает методы измерения микротвердости изделий и образцов из металлов, сплавов, минералов, керамики и других материалов вдавливанием алмазных наконечников по восстановленному и невосстановленному отпечатку (соответственно основной и дополнительный метод). Испытание сплавов на твердость методом вдавливания индентора получило широкое распространение для оценки механических свойств сплавов и контроля их изменений при последующих обработках.

Испытание на твердость царапанием по ГОСТ 21318-75 [5] начали проводить намного раньше, чем испытания на микротвердость вдавливанием. Еще в 1822 г. Моос предложил шкалу из 10 эталонных минералов с возрастающей твердостью, которая сохранила свое значение в минералогии до настоящего времени [1]. Первый склерометр появился в 1833 г., тогда как первый прибор для испытания на микротвердость вдавливанием (прибор Липса) – только в 1936 г. [1]. Поэтому испытание царапанием при применении малых нагрузок на острие долгое время являлось единственным методом испытания на микротвердость.

Теория царапания и методические вопросы, относящиеся к испытанию царапанием, до сих пор разработаны слабо. Методы испытания на твердость, основанные на царапании индентором, имеют значительно меньшее практическое применение, прежде всего из-за сложности методики проведения испытаний и

интерпретации полученных результатов [1]. К 1980-м гг. испытания на микротвердость вдавливанием практически вытеснили склерометрические методы анализа.

В настоящее время наблюдается интенсивное развитие техники микро- и наноиндентирования, внедрение цифровых технологий для регистрации и анализа результатов испытаний. В связи с этим методы склерометрии получили новый импульс к развитию, неуклонно растет количество научных публикаций по разработке моделей, методик, техники склерометрии [6–10].

Например, предлагается применение атомно-силовой микроскопии при определении микротвердости тонких покрытий методом царапания [6, 7], разработаны модели и предложено измерение прочности сцепления покрытия и основы с помощью методов склерометрии [8–10], показана эффективность измерения микротвердости пленок фоторезиста на кремнии [11], отмечается высокая чувствительность методов царапания к наличию в материале межкристаллитной коррозии [12]. В работах [13–16] предприняты попытки установления связей между микротвердостью и другими свойствами материалов, предложено использование методов склерометрии для контроля свойств упрочненной лазером зоны, а также диагностики эффективности работы многоканального лазерного излучателя по критерию однородности тепло-вложения [17].

Целью настоящей работы является исследование возможностей атомной силовой микроскопии при определении микротвердости царапанием.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования выполняли на образцах быстрорежущей стали марки Р6М5, предварительно упрочненных закалкой и трехкратным отпуском. Микротвердость по восстановленному отпечатку вдавливанием четырехгранной алмазной пирамиды измеряли на приборе ПМТ-3 согласно ГОСТ 9450-76 при различных усилиях, от 5 до 200 г (0,049...1,96 Н).

Микротвердость методом царапания (ГОСТ 21318-75) оценивали по ширине канавок, для нанесения которых также использовали прибор ПМТ-3. Нагрузка на индентор – четырехгранную алмазную пирамиду – составляла 0,049 и 0,196 Н, ориентация индентора была ребром вперед и гранью вперед.

Для регистрации и анализа экспериментальных результатов использовали растровый электронный микроскоп (РЭМ) JEOL JSM-6610LV и атомно-силовой микроскоп (АСМ) NT-MDT Nano Educator.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Определение микротвердости по восстановленному отпечатку вдавливанием четырехгранной алмазной пирамиды. Известно, что при измерении микротвердости большое влияние оказывает качество подготовленной поверхности образца. К основным причинам, вызывающим неправильные результаты измерения, можно отнести особые состояния поверхностного слоя, а именно: явление упрочнения, происходящее при деформировании поверхностных слоев в процессе вырезки образцов и подготовки шлифа к исследованию, а также возможное разрыхление поверхностного слоя из-за окисления [1].

В настоящей работе подготовка поверхности стали для измерения микротвердости по восстановленному отпечатку вдавливанием индентора выполнялась двумя способами. Первый способ соответствовал традиционной технике изготовления микрошлифов: механической шлифовке и полировке до зеркального блеска на алмазных пастах различной зернистости. Второй заключался в выполнении электролитической полировки в насыщенном растворе хромового ангидрида в

ортофосфорной кислоте, которую проводили после механической обработки. Результаты измерения микротвердости по методу восстановленного отпечатка представлены в табл. 1.

Таблица 1. Микротвердость стали, определенная методом вдавливанием индентора

Усилие на индентор, г	HV, МПа (механическая полировка поверхности)	HV, МПа (электролитическая полировка поверхности)
200	8 682 ± 83	9 367 ± 341
100	9 057 ± 287	9 623 ± 223
50	9 324 ± 415	9 881 ± 148
20	9 870 ± 432	10 266 ± 167
10	10 652 ± 187	10 440 ± 162
5	—	10 826 ± 360

Анализ данных табл. 1 показывает, что разные способы подготовки поверхности образцов быстрорежущей стали несущественно влияют на значения микротвердости. Общей тенденцией является возрастание значений микротвердости при снижении нагрузки на индентор.

Измерение микротвердости методом царапания. Испытание на микротвердость царапанием заключается в нанесении на испытуемую поверхность канавки и измерении ее ширины. При испытании хрупких материалов по сторонам царапины обычно не образуется пластически выдавленных навалов, ее ширину определить несложно. При испытании пластичных материалов по сторонам канавки образуются навалы, состоящие из предразрушенного материала, как это схематически представлено на рис. 1. Различают ширину канавки b на уровне начальной поверхности, которую Н.Н. Давиденков назвал «чистой» шириной канавки; ширину c , измеренную по вершинам навалов и (иногда) ширину всей области видимого пластического деформирования. Определение ширины канавки в последнем случае становится более сложной задачей.

В расчет числа твердости обычно принимают только «чистую» ширину b . Для испытаний четырехгранной пирамидой микротвердость $H_{\square p}$ получают делением нормальной нагрузки P на условную площадь контакта пирамиды с испытуемой поверхностью по формуле $H_{\square p} = 3,708 P/b^2$ [5].

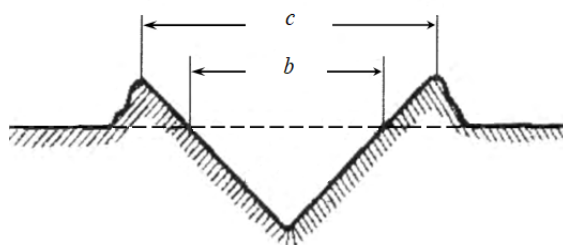


Рис. 1. Схема сечения канавки [1]

На рис. 2 дано РЭМ-изображение канавок на поверхности стали Р6М5, нанесенных при разных нагрузках и различной ориентации индентора. На рис. 3 представлены АСМ-изображения канавок и их профили по глубине.

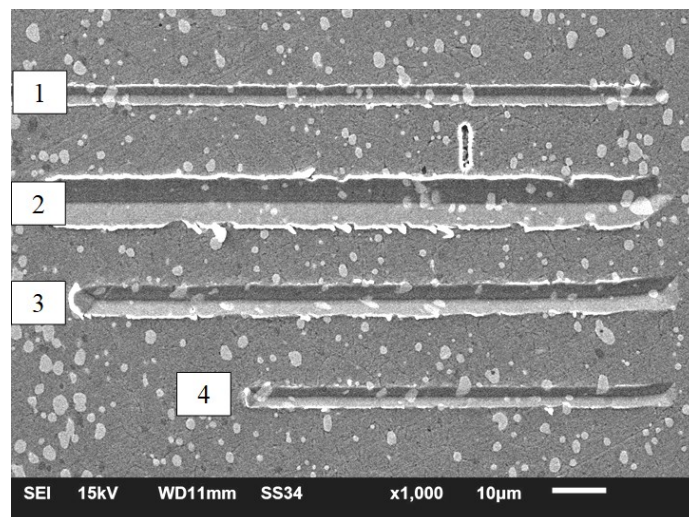


Рис. 2. РЭМ-изображение канавок на поверхности стали Р6М5:
1 – канавка нанесена при усилии 10 г, ориентация алмазной пирамидки ребром вперед;
2 – 20 г, ребром вперед; 3 – 20 г, гранью вперед; 4 – 10 г, гранью вперед

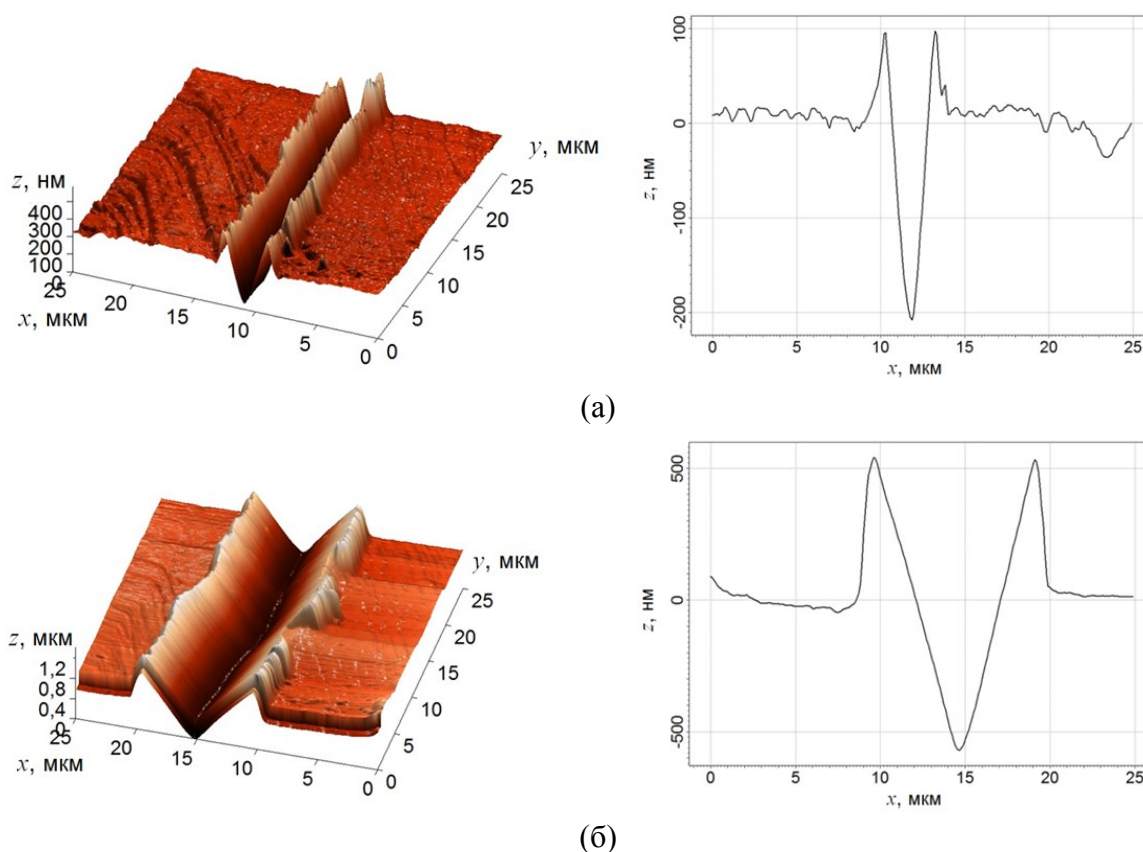


Рис. 3. АСМ-изображения канавок на поверхности стали Р6М5
и их профили по глубине: канавка нанесена при усилии 10 г, ориентация индентора
ребром вперед (а); 20 г, ребром вперед (б); 20 г, гранью вперед (в);
10 г, гранью вперед (г)

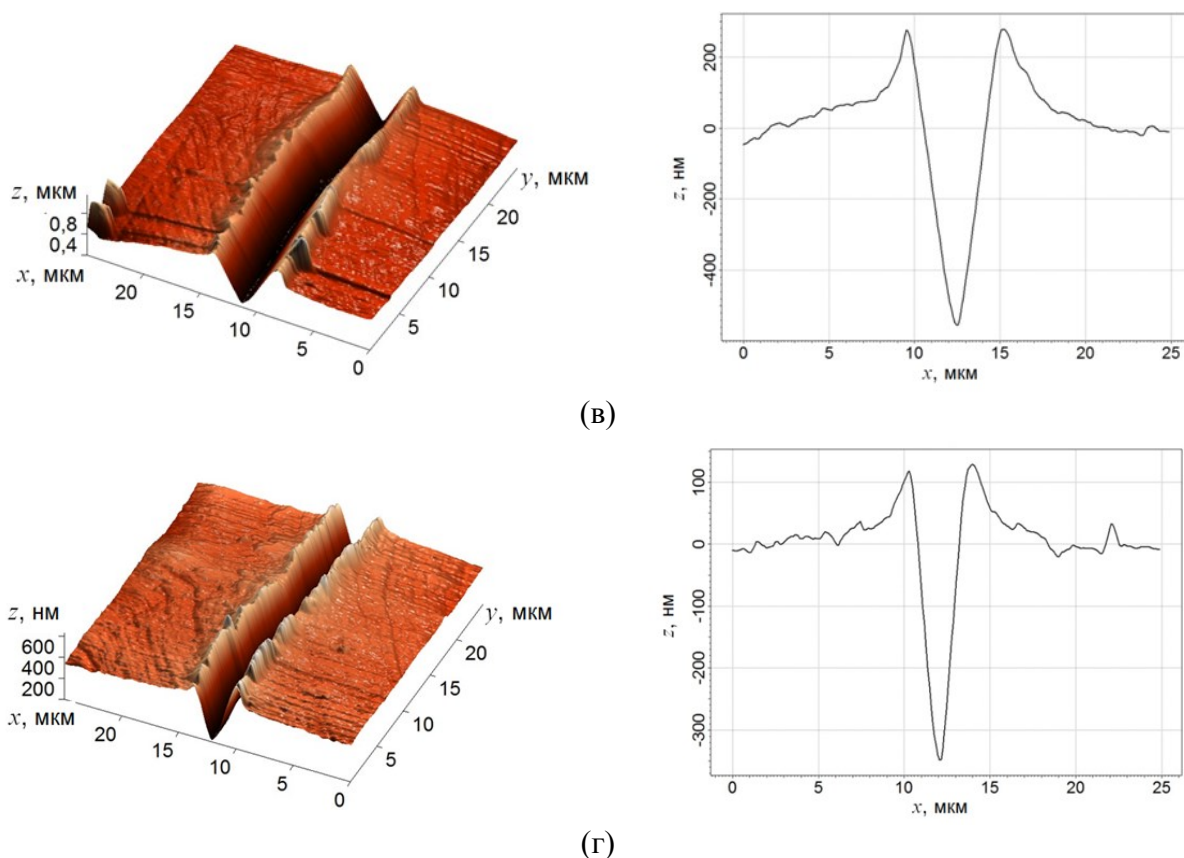


Рис. 3. Продолжение

Форма индентора имеет большое значение при испытании на твердость царапанием. При использовании четырехгранной алмазной пирамиды можно осуществлять царапание как ребром вперед, так и гранью вперед. В практике склерометрических испытаний последний метод применяется редко. Возможно, это связано с трудностями понимания и описания результатов, так как для многих материалов получаются противоречивые данные, обусловленные сложной природой самого процесса царапания. В табл. 2 представлены результаты измерения микротвердости образцов быстрорежущей стали методом царапания согласно ГОСТ 21318-75 [5].

Таблица 2. Микротвердость быстрорежущей стали, определенная методом царапания при различной ориентации индентора

Усилие на индентор, г	Н _{0P} , МПа (ребром вперед)		Н _{0P} , МПа (гранью перед)	
	«Чистая» ширина канавки, мкм	Число твердости	«Чистая» ширина канавки, мкм	Число твердости
20	4,93 ± 0,10	29 908 ± 120	3,48 ± 0,13	60 013 ± 190
10	2,04 ± 0,07	87 318 ± 670	2,39 ± 0,06	63 618 ± 300

Анализ данных табл. 2 показал, что значения микротвердости, определенные методом царапания, количественно не согласуются с числами твердости, полученными по восстановленному отпечатку вдавливанием четырехгранной алмазной пирамиды (см. табл. 1).

Определение микротвердости царапанием может быть ценным методом в исследовательских работах, имеющим самостоятельное значение, независимое от метода испытания на микротвердость вдавливанием. Эти два вида измерения микротвердости не заменяют, а дополняют друг друга. Более широкому применению метода испытания на микротвердость царапанием препятствует недостаточная разработанность методических вопросов, а также неясность в ряде случаев значения полученных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные данные демонстрируют широкие информативные возможности метода склерометрии для контроля свойств сплавов. Он может быть полезен исследователям, работающим над проблемой износа материалов, над изучением структуры сплавов, физических свойств металлических покрытий, полупроводников и минералов. Метод атомно-силовой микроскопии позволяет с высоким разрешением строить трехмерный профиль канавки и определять не только ее ширину, но и глубину. Объединение классических методик и современного исследовательского оборудования расширяет возможности измерения механических характеристик тонких покрытий и поверхностных слоев. Измерение микротвердости методом царапания имеет дальнейшие перспективы в связи с развитием техники микро- и наноиндентирования с высоким пространственным разрешением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хрущов М.М. Трение, износ и микротвердость материалов. Избранные работы. М.: КРАСАНД, 2012. 512 с.
2. Астащенко В.И., Швеев А.И., Швеева Т.В. Диагностика свойств стальных изделий по критерию «микротвердость» // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2016. № 5. С. 57–61.
3. Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Измайлов В.В., Барчуков Д.А. Исследование триботехнических свойств поверхностей, полученных воздействием концентрированных потоков энергии: монография. Тверь: ТвГТУ, 2022. 164 с.
4. ГОСТ 9450-76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. М.: Издательство стандартов, 1993. 35 с.
5. ГОСТ 21318-75 Измерение микротвердости царапанием алмазными наконечниками. М.: Издательство стандартов, 1976. 30 с.
6. Кузнецова Т.А., Андреев М.А., Маркова Л.В., Чижик С.А. Применение атомно-силовой микроскопии при определении микротвердости тонких покрытий методом склерометрии // *Трение и износ*. 2007. Т. 28. № 3. С. 276–281.
7. Vasić B., Aškrić S. Thickness measurement of thin films using atomic force microscopy based scratching // *Surface Topography: Metrology and Properties*. 2024. V. 12. № 2. P. 025027.
8. Łepicka M. Coating failure detection in scratch testing: A cross-sectional SEM/FIB microscopic study coupled with nonlinear analysis methods in a model titanium nitride/stainless steel system // *Wear*. 2025. V. 562. P. 205670.
9. Zhang J., Zhang C., Li Y., Zhao M., Wang B. Fracture toughness testing of metallic materials based on scratch tests // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2024. V. 131. P. 104393.
10. Постников Д.В., Ткаченко Э.А., Теплоухов А.А. Моделирование напряженного состояния при склерометрии циркониевых магнетронных покрытий // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2023. Т. 11. № 1. С. 85–90.

11. Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Янковский Ю.Н., Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В., Гайшун В.Е. Склерометрический метод измерения микротвердости пленок фоторезиста на кремнии // *Приборы и методы измерений*. 2016. Т. 7. № 1. С. 77–84.
12. Семенычев В.В., Салахова Р.К. Склерометрия как метод оценки интенсивности межкристаллитной коррозии // *Коррозия: материалы, защита*. 2015. № 12. С. 37–41.
13. Вешкин Е.А. Постнов В.И., Семенычев В.В., Крашенинникова Е.В. Микротвердость и склерометрия как критерии степени отверждения связующего ЭДТ-69Н // *Материаловедение*. 2018. № 10. С. 3–7.
14. Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Иванова А.И., Гречишкин Р.М. Абразивная износостойкость сплава Ti6Al4V, полученного по технологии селективного электронно-лучевого плавления // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 1 (1). С. 26–35.
15. Zhang J., Li Y., Zheng X., Wang G., Zhao M. Determination of plastic properties of surface modification layer of metallic materials from scratch tests // *Engineering Failure Analysis*. 2022. V. 142. P. 106754.
16. Li Y., Zhang J., Zhang Y., Zhao M., Lu C., Liu M. A semi-analytical solution for determining plastic parameters of metallic materials from scratch tests // *International Journal of Solids and Structures*. 2025. V. 310. P. 113226.
17. Афанасьева Л.Е., Югов В.И., Гречишкин Р.М. Металлографический мониторинг качества закалки, осуществляемой с помощью многоканального лазера // *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2017. № 4 (43). С. 96–99.

Для цитирования: Барчуков Д.А., Барабанова Е.В., Афанасьева Л.Е., Смолякова И.А. Возможности атомно-силовой микроскопии в решении задач склерометрии // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 2 (30). С. 79–85.

CAPABILITIES OF ATOMIC FORCE MICROSCOPY IN SOLVING SCLEROMETRY PROBLEMS

D.A. BARCHUKOV¹, Cand. Sc., E.V. BARABANOVA², Cand. Sc.
L.E. AFANASIEVA¹, Cand. Sc., I.A. SMOLYAKOVA¹, Cand. Sc.

¹Tver State Technical University

22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ludmila.a@mail.ru

²Tver State University

33, Zhelyabova St., Tver, 170100, e-mail: pechenkin_kat@mail.ru

The results of microhardness studies using indentation and scratching with a tetrahedral diamond pyramid using a domestic PMT-3 microhardness tester are presented. Scratching of the steel surface was performed with the indenter oriented edge-first and face-first. An atomic force microscope was used to record and analyze the experimental results. The possibilities and prospects of using atomic force microscopy methods in solving sclerometry problems are shown.

Keywords: microhardness, sclerometry, testing, diagnostics, atomic force microscopy.

Поступила в редакцию/received: 04.02.2026; после рецензирования/revised: 10.02.2026;
принята/accepted: 15.02.2026

ОБОСНОВАНИЕ СКОРОСТИ ВИТАНИЯ ИКРИНОК В ИНКУБАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ, УСТАНОВЛИВАЕМОЙ НА ОТРАБОТАННЫХ ТОРФЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук, А.А. АНДРИАНОВА, ст. препод.

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: lp62007@yandex.ru

© Яблонев А.Л., Андрианова А.А., 2026

Рекультивация отработанных торфяных месторождений методом обводнения и последующего зарыбления является наиболее эффективным методом хозяйствования. Выращивание ценных пород рыбы путем инкубирования мальков предполагает использование специальной инкубационной системы. Гидравлический расчет ее главного элемента – гнезда-инкубатора – невозможен без умения определять скорость витания икринки в гнезде, поскольку при большей скорости обтекания икринка будет вымываться потоком, а при значительно меньшей скорости – испытывать недостаток кислорода. В статье предложена математическая модель, позволяющая определять скорость витания икринки, и описаны проведенные экспериментальные исследования, показавшие адекватность разработанной модели.

Ключевые слова: отработанное торфяное месторождение, затопление, зарыбление, инкубационная система, гнездо-инкубатор, скорость витания, критическое число Рейнольдса.

ВВЕДЕНИЕ

Вовлечение в дальнейшее хозяйственное использование отработанных торфяных месторождений, занимающих весьма большие площади [1, 2], представляет важную задачу. Как уже было обосновано, обводнение и последующее зарыбление ценными породами рыбы – наиболее эффективный и экологичный способ такого вовлечения [3–5]. Среди ценных пород рыб, которые возможно воспроизводить и выращивать в торфяных прудах, нами была выделена пелядь, а среди методов воспроизводства – инкубирование мальков из икринок в специальной инкубационной системе – гнезде-инкубаторе. Это устройство позволяет инкубировать искусственно оплодотворенную икру в естественных условиях, получая саморасселяющиеся по примыкающим к проточному каналу прудам жизнестойкие личинки.

Для гидравлического расчета инкубационной системы необходимо знать скорость витания икринок в гнезде, поскольку при больших скоростях обтекания икринки ее будет вымывать из гнезда, а при малой – будет сказываться недостаток кислорода.

В связи с этим целью данной статьи является определение скорости витания икринки в гнезде-инкубаторе, устанавливаемом на отработанных торфяных месторождениях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Схема наиболее эффективной инкубационной системы (83...96 % по числу выклева и развития жизнестойких личинок) с выносным водозаборным устройством представлена на рис. 1.

Проточность гнезда-инкубатора осуществляется из размещенного на некотором расстоянии против течения водозаборного устройства. Внутри корпуса находится искусственный инкубационный субстрат в виде пластины с лунками. Пластина делит корпус на две части. Нижняя часть выполняет функцию отстойника взвешенных и влекомых потоком частиц ила и детрита [6].

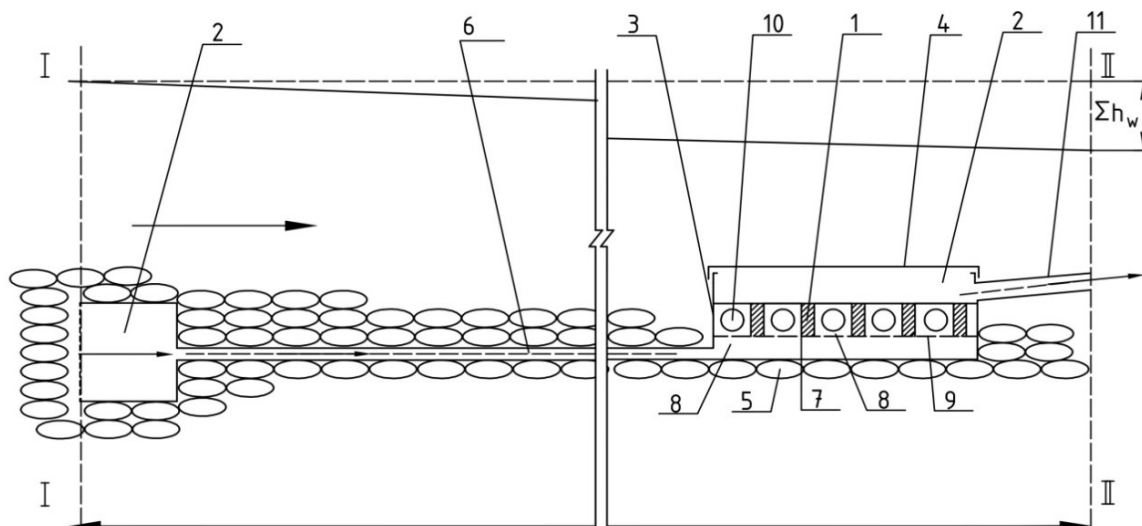


Рис. 1. Схема инкубационной системы (гнезда-инкубатора) с выносным водозаборным устройством: 1 – гнездо-инкубатор; 2 – водозаборное устройство; 3 – корпус; 4 – крышка; 5 – водонепроницаемое дно; 6 – гибкая подводящая гофрированная трубка; 7 – искусственный нерестовый субстрат в виде пластины; 8 – лунки; 9 – сетка; 10 – икринки; 11 – выпускной патрубок

Корпус гнезда-инкубатора и водозаборного устройства заглубляется в грунт проточного канала отработанного торфяного месторождения. Вода поступает самотеком в водозаборное устройство из подруслового потока. В каждую лунку инкубационного субстрата помещают по одной икринке. Поскольку после вылупления личинке необходимо большее пространство, диаметр лунки на 3–5 мм больше, чем диаметр икринки. Выход личинок из гнезда-инкубатора в проточный канал происходит через выпускной патрубок. Вода из подруслового потока поступает в водозаборное устройство, далее – по гибкой гофрированной трубке в корпус инкубатора под пластину-субстрат. Проходя через лунки, вода обогащает кислородом пространство вокруг эмбрионов, выносит продукты их жизнедеятельности и через выпускной патрубок вытекает в проточный канал [6, 7].

Статистическая оценка показывает, что средний диаметр икры пеляди колеблется от 1,6 до 2,5 мм [8].

Рассмотрим шарообразную частицу (икринку), находящуюся во взвешенном состоянии в восходящем потоке воды (рис. 2).

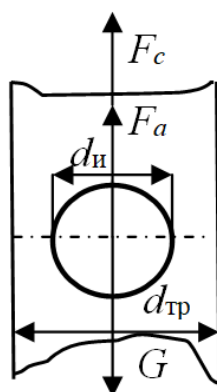


Рис. 2. Равновесие частицы (икринки) в восходящем потоке воды

На икринку диаметром d_u , помещенную в поток диаметром $d_{тр}$, действует сила тяжести G , сила Архимеда F_a и сила сопротивления F_c , обусловленная воздействием потока воды [9, 10].

Уравнение равновесия может быть записано в виде

$$F_a - G + F_c = 0 . \quad (1)$$

Сила Архимеда определяется объемом икринки (шарообразной частицы) V_u и плотностью воды $\rho_в$:

$$F_a = \rho_в g V_u = \rho_в g \frac{\pi d_u^3}{6}, \quad (2)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; d_u – диаметр икринки.

Сила тяжести определяется плотностью икринки ρ_u и ее диаметром d_u :

$$G = m_u g = \rho_u g \frac{\pi d_u^3}{6}, \quad (3)$$

где m_u – масса икринки.

Сила сопротивления зависит от режима движения жидкости и в общем случае для ламинарного режима определяется законом Стокса [9]:

$$F_c = 3\pi\mu d_u v, \quad (4)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости жидкости; v – скорость обтекания икринки восходящим потоком жидкости, равная скорости витания.

Подставив (2), (3), (4) в (1), получим:

$$\rho_в g \frac{\pi d_u^3}{6} - \rho_u g \frac{\pi d_u^3}{6} + 3\pi\mu d_u v = 0, \quad (5)$$

откуда скорость витания

$$v = \frac{\pi d_u^3 g (\rho_u - \rho_в)}{6 \cdot 3\pi\mu d_u} = \frac{d_u^2 g (\rho_u - \rho_в)}{18\mu}. \quad (6)$$

Для оценки полученного параметра проведем расчет по формуле (6), считая, что температура воды $t_b = 8^\circ\text{C}$. Тогда $\mu = 1,39 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\rho_g = 1\,000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_u \approx 1\,070 \text{ кг/м}^3$ [12]. Диаметр икринки примем равным 2,3 мм.

$$v = \frac{d_u^2 g (\rho_u - \rho_g)}{18\mu} = \frac{0,002\,3^2 \cdot 9,81(1\,070 - 1\,000)}{18 \cdot 1,39 \cdot 10^{-3}} = 0,145 \text{ м/с}.$$

Число Рейнольдса для данных условий и обтекания икринки в трубе диаметром $d_{\text{тр}} = 6 \text{ мм}$:

$$Re = \frac{\rho_g v d_{\text{тр}}}{\mu}, \quad (7)$$

$$Re = \frac{1\,000 \cdot 0,145 \cdot 0,006}{1,39 \cdot 10^{-3}} = 625,899.$$

Опыт эксплуатации гидроклассификаторов, схожих по действию с гнездом-инкубатором, показывает, что критическое число Рейнольдса для них составляет $Re_{\text{кр}} = 2$ [10]. Поскольку рассчитанное число Рейнольдса значительно больше критического, то можно сделать вывод о том, что обтекающий икринку поток воды турбулентен.

Для турбулентного потока сила сопротивления может быть найдена по формуле [9, 10]:

$$F_c = C_d S_u \rho_g \frac{v^2}{2}, \quad (8)$$

где $C_d = 0,44$ [10] – коэффициент обтекания для шарообразной частицы; S_u – площадь Миделя для икринки:

$$S_u = \frac{\pi d_u^2}{4}, \quad (9)$$

тогда

$$F_c = C_d \frac{\pi d_u^2}{4} \rho_g \frac{v^2}{2}. \quad (10)$$

Подставив (2), (3), (10) в (1), получим:

$$\rho_g g \frac{\pi d_u^3}{6} - \rho_u g \frac{\pi d_u^3}{6} + C_d \frac{\pi d_u^2}{4} \rho_g \frac{v^2}{2} = 0, \quad (11)$$

откуда

$$C_d \frac{\pi d_u^2}{4} \rho_g \frac{v^2}{2} = \rho_u g \frac{\pi d_u^3}{6} - \rho_g g \frac{\pi d_u^3}{6} = (\rho_u - \rho_g) \frac{\pi d_u^3}{6} g, \quad (12)$$

$$C_d \frac{\pi d_u^2}{4} \rho_g v^2 = (\rho_u - \rho_g) \frac{2\pi d_u^3}{6} g = (\rho_u - \rho_g) \frac{\pi d_u^3}{3} g. \quad (13)$$

Окончательно имеем

$$v = \sqrt{\frac{4d_u g (\rho_u - \rho_g)}{3C_d \rho_g}}. \quad (14)$$

Подставив полученные ранее данные в формулу (14), имеем:

$$v = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0023 \cdot 9,81(1\,070 - 1\,000)}{3 \cdot 0,44 \cdot 1\,000}} = 0,0692 \text{ м/с.}$$

Проверим число Рейнольдса по (7):

$$Re = \frac{1\,000 \cdot 0,0692 \cdot 0,006}{1,39 \cdot 10^{-3}} = 298,705.$$

Рассчитанное число Рейнольдса больше критического, следовательно, режим движения, как и предполагалось, турбулентный.

Для нахождения поправочного коэффициента, учитывающего отличия реальных условий от теоретических, был проведен эксперимент по оценке скорости витания икринок пеляди в прозрачной ПВХ-трубке диаметром $d_{\text{тр}} = 6$ мм. Диаметр икринок охватывал весь диапазон средних диаметров ($d_u = 1,6 \dots 2,5$ мм). Схема установки представлена на рис. 3.

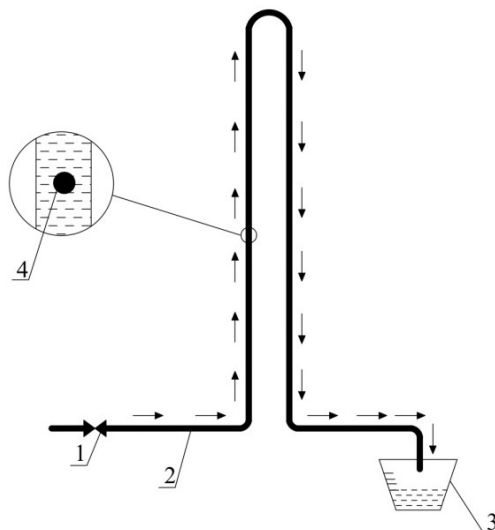


Рис. 3. Установка для определения скорости витания икринок:

- 1 – напорный кран; 2 – гибкая прозрачная трубка;
3 – емкость для определения объема жидкости; 4 – икринка

Объем воды в емкости 3 оценивался весовым методом с применением весов лабораторных Асом JW-1 с точностью до 0,01 г. Время наполнения емкости выбиралось одинаковое – 5 мин и отмечалось по электронному цифровому секундомеру с точностью до 0,01 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты экспериментального определения скорости витания икринки $v_{\text{эксп}}$ представлены в таблице.

Коэффициент k , учитывающий стесненность и другие отличия реальных условий от теоретических, названный нами коэффициентом стесненности, получен численным методом и составил 0,18...0,20. Теоретическая скорость витания $v_{\text{теор}}$, рассчитанная по формуле

$$v_{теор} = k \sqrt{\frac{4d_u g(\rho_u - \rho_в)}{3C_d \rho_в}}, \quad (15)$$

также содержится в таблице.

Кроме того, в таблице представлено относительное отклонение (относительная ошибка) теоретической скорости витания от экспериментальной, которое было определено по формуле

$$\varepsilon = \frac{|v_{эксн} - v_{теор}|}{v_{эксн}} \cdot 100 \%, \quad (16)$$

и среднее отклонение $\bar{\varepsilon}$.

Сравнительная оценка экспериментальной
и теоретической скоростей витания икринки

d_u , мм	$v_{эксн}$, м/с	$v_{теор}$, м/с	ε , %
1,6	0,0113	0,01096	3,009
1,7	0,0114	0,01130	0,877
1,8	0,0114	0,01163	2,018
1,9	0,0117	0,01195	2,137
2,0	0,0126	0,01226	2,698
2,1	0,0127	0,01256	1,102
2,2	0,0130	0,01286	4,741
2,3	0,0131	0,01314	0,305
2,4	0,0135	0,01343	0,519
2,5	0,0140	0,01370	2,143
			$\bar{\varepsilon} = 1,955 \%$

На рис. 4 представлена зависимость теоретической и экспериментальной скоростей витания от диаметра икринки.

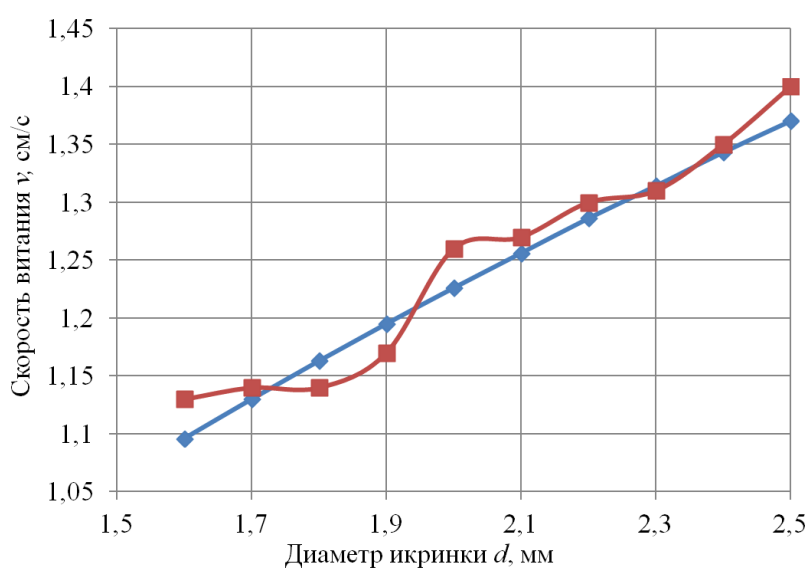


Рис. 4. Зависимость скорости витания от диаметра икринки:

—♦— расчет, —■— эксперимент

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итоги вышеизложенного:

1. Для гнезда-инкубатора с помещенными внутрь икринками характерен турбулентный режим движения жидкости.
2. Икринка в гнезде-инкубаторе, как и любая частица в гидроклассификаторах, находится в поле действия трех сил – тяжести, Архимеда и сопротивления.
3. Скорость витания икринки в гнезде-инкубаторе ограничивает возможность вымывания ее из гнезда и зависит от сочетания указанных выше сил.
4. Скорость витания икринки в гнезде-инкубаторе в зависимости от диаметра икринки может быть описана линейным законом.
5. Предложенная математическая модель позволяет рассчитывать скорость витания икринки в гнезде-инкубаторе.
6. Относительное отклонение предложенной модели от экспериментальных данных в исследованном диапазоне диаметров икринок (от 1,6 до 2,5 мм) укладывается в границы от 0,305 до 4,741 % со средним значением 1,955 %, что меньше 5 %. На этом основании можно говорить о высокой точности предлагаемой модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Misnikov O. Basic technologies and equipment used for peat deposits development in foreign countries. *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. 2018. V. 41. P. 01046.
2. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.
3. Андрианова А.А., Яблонев А.Л. Комплексное использование карьеров отработанных торфяных месторождений. *Современные технологии и инновации: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции* / под общ. ред. Т.Б. Новиченковой. Тверь: ТвГТУ, 2025. С. 61–65.
4. Андрианова А.А., Яблонев А.Л. Обзор методов комплексного использования выработанных месторождений торфа в сравнении с другими горными породами, добываемыми открытым способом // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 2 (26). С. 26–40.
5. Андрианова А.А., Яблонев А.Л. Гидравлическое обоснование параметров инкубационной системы, устанавливаемой на отработанных торфяных месторождениях // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 1 (29). С. 65–74.
6. Скоробогатов М.А., Андрианова А.А., Павлов Д.С., Веселов А.Е., Ефремов Д.А., Ручьев М.А. Гидравлические расчеты гнезд-инкубаторов для икры лососевых рыб с выносным водозаборным устройством // *Природообустройство*. 2020. № 1. С. 104–110.
7. Скоробогатов М.А., Павлов Д.С., Веселов А.Е., Ефремов Д.А., Ручьев М.А., Фомина А.А. Гидравлические исследования гнезд-инкубаторов икры лососевых рыб, устанавливаемых в речных условиях // *Рыбное хозяйство*. 2016. № 4. С. 67–70.
8. Львов Ю.Б. Совершенствование технологии воспроизводства пеляди: дис. ... канд. с/х наук. М.: МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. 113 с.
9. Слепков А.И. Механика. URL: <https://teach-in.ru/file/synopsis/pdf/mechanics-M.pdf?ysclid=mj8poaii5f773542039> (дата обращения: 16.12.2025).

10. Гидроклассификаторы и расчет восходящего потока: теория и практика. URL: <https://inner.su/articles/gidroklassifikatory-i-raschet-voskhodyashchego-potoka-teoriya-i-praktika/> (дата обращения: 16.12.2025).

11. Динамический коэффициент вязкости воды. URL: https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fwww.chem21.info%2Fpic1%2F200073091086158063207080176161167117188109133093.png&lr=14&pos=0&rpt=simage&source=serp&text=динамический%20коэффициент%20вязкости%20воды (дата обращения: 19.12.2025).

12. Поликарпова В.Э., Алексанян И.Ю., Арабова З.М., Нугманов А.Х., Эльмурзаев А.А. Определение теплотехнических показателей икры сазана как объекта замораживания и источника лецитина // *Индустрия питания*. 2022. Т. 7. № 4. С. 25–35.

Для цитирования: Яблонев А.Л., Андрианова А.А. Обоснование скорости витания икринок в инкубационной системе, устанавливаемой на отработанных торфяных месторождениях // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 2 (30). С. 86–93.

JUSTIFICATION OF THE RATE OF EGG HITTING IN AN INCUBATION SYSTEM INSTALLED IN DEPLETED PEAT DEPOSITS

A.L. YABLONEV, Dr. Sc., A.A. ANDRIANOVA, Senior Lecturer

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: lp62007@yandex.ru

Reclamation of exhausted peat deposits by flooding and subsequent stocking is the most effective method of farming. Growing valuable fish species by incubating fry requires the use of a special incubation system. The hydraulic calculation of its main element, the incubation nest, is impossible without the ability to determine the speed of the egg's flight in the nest, as a faster speed of flow will cause the egg to be washed away, while a slower speed will result in a lack of oxygen. The article proposes a mathematical model that allows for determining the speed of an egg's flight, and describes the experimental studies that demonstrated the adequacy of the developed model.

Keywords: depleted peat deposit, flooding, stocking, incubation system, incubator nest, hovering speed, critical Reynolds number.

Поступила в редакцию/received: 05.02.2026; после рецензирования/revised: 26.02.2026;
принята/accepted: 02.03.2026

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ЗАГРУЗКИ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ

В.С. БОЧКОВ, канд. техн. наук, К.В. БОЧКОВА, асп.,
А.Г. БАБЕНКО, д-р техн. наук

Уральский государственный горный университет,
620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, e-mail: bochkof@list.ru

© Бочков В.С., Бочкова К.В., Бабенко А.Г., 2026

Повышение энергоэффективности шаровых мельниц, являющихся основными энергопотребляющими агрегатами на горно-обогатительных комбинатах, представляет собой актуальную научно-техническую задачу. Ключевой ограничивающий фактор – отсутствие надежных систем оперативного контроля степени заполнения барабана. Это приводит к работе в неоптимальных режимах (недогруз или перегруз) и значительным экономическим потерям. В статье предложен принципиально новый подход к определению уровня загрузки – «геометрический метод», основанный на анализе пространственного распределения вибрационных сигналов по поверхности барабана. В ходе лабораторных исследований на мельнице Бонда регистрировались параметры вибрации (виброскорость S , виброперемещение D) при различных комбинациях загрузки (шары, песок, вода) и положении датчика относительно источника ударного воздействия. Методами временного, статистического и частотного анализа установлено, что зависимость статистических характеристик сигнала (среднего значения, медианы, максимума, стандартного отклонения) от угла между датчиком и ударником в большинстве случаев аппроксимируется полиномом второй степени. Выявлено существенное влияние типа загрузки на амплитуду сигналов: наличие сыпучей фазы (песка) приводит к многократному демпфированию колебаний вследствие диссипации энергии на трение. Результаты работы подтверждают принципиальную возможность создания системы прямого вибрационного контроля загрузки, не зависящей от косвенных технологических параметров. Сформулированы рекомендации по дальнейшим исследованиям для разработки промышленной методики.

Ключевые слова: шаровая мельница, уровень загрузки, контроль состояния, вибрационный анализ, виброскорость, виброперемещение, статистическая обработка сигналов, частотный анализ, геометрический метод, оптимизация технологического процесса.

ВВЕДЕНИЕ

Шаровые мельницы представляют собой критически важное оборудование на горно-обогатительных комбинатах, где оптимальный режим работы с точки зрения энергоэффективности достигается при максимальной загрузке барабана. Практический опыт эксплуатации мельниц типа МПСИ 70×23 на обогатительных фабриках российских золотодобывающих предприятий демонстрирует, что переход от проектной производительности 90 т/ч к фактической 130 т/ч требует особо точного контроля загрузки [1, 2].

В современных условиях добычи полезных ископаемых снижение качества руд (уменьшение содержания полезного компонента) вынуждает предприятия постоянно повышать производительность оборудования [1, 3]. Однако это создает парадоксальную ситуацию: технологически оптимальный режим работы оказывается критически

близок к границе перегруза, особенно при переработке руд с высоким содержанием глины, способной закупоривать разгрузочную решетку. В результате операторы вынуждены работать с недогрузом 5...15 %, что приводит к существенным потерям энергоэффективности.

Основная причина невозможности поддержания стабильного оптимального режима – отсутствие надежных методов прямого измерения уровня загрузки мельницы в реальном времени. Предыдущие исследования корреляционных связей с использованием данных системы «Сигнал-7М», давления в гидropодшипниках и вибрации на приводном валу продемонстрировали неустойчивость результатов. Это указывает на необходимость разработки новых подходов, не зависящих от косвенных параметров [4. 5].

Предлагаемый подход, основанный на «геометрическом методе» оценки загрузки, определяет границы насыпного объема материала в мельнице по параметрам виброакустических сигналов. Он имеет принципиальное преимущество перед традиционными методами, так как напрямую связан с физическим расположением материала в барабане, а не с косвенными параметрами, зависящими от множества факторов.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНТРОЛЯ ЗАГРУЗКИ ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ

Оптимизация работы шаровых мельниц является комплексной задачей [1], решение которой лежит на стыке механики, теории автоматического управления и современных методов обработки сигналов. Теоретической основой для разработки методов контроля служит анализ физических процессов, происходящих в барабане мельницы при различных режимах загрузки.

1.1. Физика процесса измельчения и генерации виброакустических сигналов

Работа шаровых мельниц представляет собой динамический процесс, сопровождающийся соударениями мелющих тел (шаров) между собой, с внутренней поверхностью барабана и с измельчаемым материалом. Каждое соударение является источником импульсного возбуждения, вызывающего затухающие колебания (вибрации) в конструктивных элементах мельницы: барабане, цапфах, приводном валу. Характеристики этих колебаний (амплитуда, частота, форма сигнала) несут информацию о параметрах самого удара, который, в свою очередь, зависит от кинематики загрузки.

С теоретической точки зрения барабан мельницы можно рассматривать как тонкостенную упругую оболочку, на которую действуют распределенные и сосредоточенные силы. Распространение колебаний по такой оболочке описывается уравнениями в частных производных, решения которых зависят от граничных условий и физико-механических свойств системы. Между пространственно-временными характеристиками виброакустического поля на поверхности барабана и параметрами загрузки существует принципиальная физическая связь. Наличие загрузки (пульпы, шаров) существенно изменяет эти условия, вызывает:

демпфирование (рассеяние энергии): загрузка, особенно содержащая твердую фазу и воду, выступает в роли диссипативного элемента. Часть энергии упругих колебаний преобразуется в тепло за счет внутреннего трения в материале и трения о стенки барабана, что приводит к затуханию вибрационного сигнала;

изменение эффективной массы и жесткости системы: прилегающий к стенке слой материала изменяет локальную инерционность и жесткость оболочки, влияя на ее собственные частоты и формы колебаний;

модификацию спектра возбуждения: изменение уровня и состава загрузки влияет на характер ударов (их энергию и частоту следования), что отражается в амплитудном и частотном составе генерируемых вибросигналов.

Таким образом, существует принципиальная физическая связь между пространственно-временными характеристиками виброакустического поля на поверхности барабана и параметрами загрузки.

1.2. Обзор существующих методов контроля загрузки

Сложность прямого наблюдения за процессом внутри вращающегося барабана привела к разработке множества косвенных методов контроля, которые можно разделить на несколько групп [1–3]:

электрические и мощность-методы для измерения потребляемой двигателем мельницы мощности двигателя мельницы. Теоретической основой является зависимость момента сопротивления от массы загрузки. Недостаток – сильная зависимость от состояния футеровки, износа шаров, характеристик руды, что снижает точность;

акустические методы, применяемые для анализа шума. При недогрузе преобладают удары шаров о футеровку, при перегрузе – глухой шум каскадного движения. Метод чувствителен к внешним помехам и требует сложной обработки для выделения информативных признаков;

виброметрические методы на основе анализа подшипниковых опор, используемые для контроля вибрации на цапфах или корпусах подшипников. Данный подход, как отмечено во введении, часто демонстрирует неустойчивые корреляции, поскольку сигнал сильно фильтруется и трансформируется массивными элементами конструкции фундамента и корпуса;

радиоизотопные и рентгеновские методы, основанные на прямом сканировании сечения барабана. Являются наиболее точными, но при этом высокзатратны, предполагают использование сложных в эксплуатации приборов, а также необходимость соблюдения требований радиационной безопасности и не подходят для непрерывного оперативного контроля;

методы анализа сигнала с датчиков на корпусе барабана. Относительно новое направление, включающее анализ вибраций, ультразвука или звукового удара непосредственно на барабане. Теоретическое преимущество – близость точки измерения к источнику возбуждения, что позволяет регистрировать менее искаженный сигнал.

1.3. Обоснование выбранного подхода и его теоретическая новизна

Предлагаемый в статье подход относится к последней группе методов и развивает идею «геометрического» («волнового») анализа. Его теоретической основой является предположение о том, что распространение вибрации от точки локального удара по периметру барабана носит закономерный характер и однозначно зависит от степени и типа загрузки.

В отличие от методов, анализирующих интегральные характеристики (общую мощность, спектр), данный подход фокусируется на пространственном распределении параметров сигнала (виброскорости, виброперемещения). В первом приближении, при упругом ударе по незагруженному барабану, затухание колебаний с удалением от источника должно описываться известными законами распространения волн в оболочках. Наличие загрузки, как теоретически обосновано выше, выступает в роли

распределенного демпфера и инерционной нагрузки, модифицирующей это затухание. Следовательно, профиль затухания сигнала по угловой координате (зависимость амплитуды от угла относительно источника) становится уникальной характеристикой текущего состояния загрузки.

Новизна предлагаемой методики заключается, во-первых, в отказе от поиска единого косвенного параметра, такого как давление или вибрация на валу, в пользу анализа пространственной картины вибрационного поля; во-вторых, в прямой связи с геометрией загрузки: уровень засыпки материала теоретически должен влиять на границу, после которой демпфирование резко возрастает (когда точка удара погружена в загрузку); в-третьих, в возможности использования простой физической модели, такой как аппроксимация профиля затухания полиномом второй степени, коэффициенты которого несут информацию о загрузке.

Таким образом, теоретический анализ подтверждает принципиальную возможность оценки уровня загрузки путем исследования зависимостей вибрационных характеристик от положения датчика на барабане относительно условного источника ударов. Экспериментальное исследование направлено на верификацию этой теоретической гипотезы и количественную оценку выявленных зависимостей.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Объект и схема эксперимента

Объектом исследования служила лабораторная мельница Бонда (рис. 1). Для создания контролируемых условий эксперимента вместо вращения барабана и ударов шаров по его внутренней поверхности использовался неподвижный барабан мельницы со стационарной установкой внешнего ударника (с регулируемой скоростью 0...2 700 об/мин) и перемещаемыми по периметру сечения барабана датчиками с контролем их положения.



(а)



(б)

Рис. 1. Фотографии лабораторной установки (а) и вибродатчика (б)

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Измерения проводились на поверхности барабана с одним сечением в 7 точках с шагом 45° (от 315° до 45°) относительно неподвижного ударника. Синхронно фиксировались данные с вибродатчика (WitMotion WTVB02-485, рис. 1) по трем осям (0X, 0Y, 0Z) и микрофона. Регистрировались виброскорость (S), виброперемещение (D) и частота вибраций (F). В каждой точке измерения проводились в течение 60 ± 10 с при включенном ударнике.

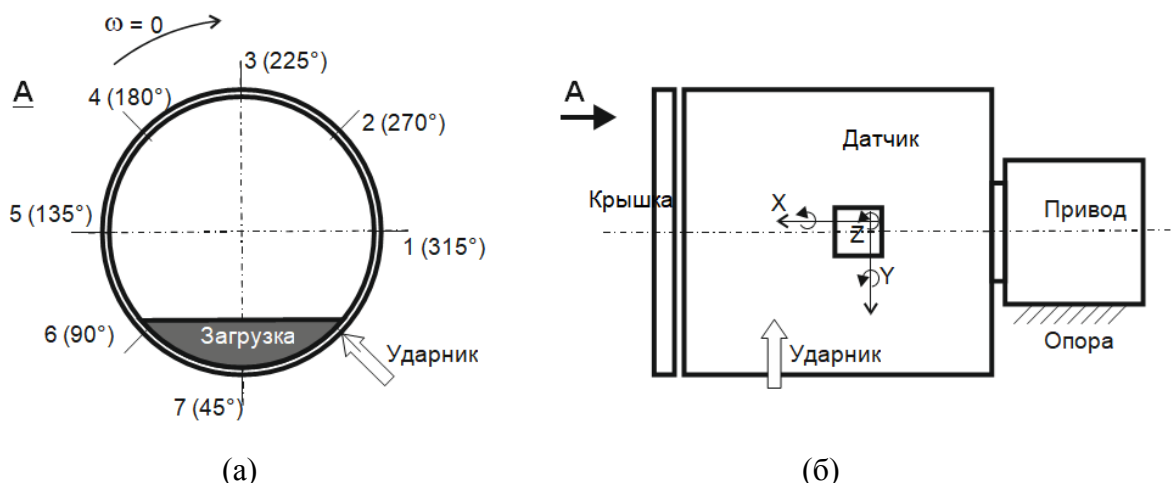


Рис. 2. Схема лабораторной установки: вид спереди (а) и сбоку (б)

2.2. План экспериментов

Было проведено 8 серий опытов (А–Н) с различной комбинацией загрузки: серии отличались видом и степенью загрузки (таблица), а опыты соответствуют углу между ударником и датчиком (см. рис. 2).

План проведения опытов

Серия (№) опытов	Загрузка		
	Шары, %	Песок, кг	Вода, %
A (1...7)	0	0	0
B (1...7)	20	0	0
C (1...7)	20	3	0
D (1...7)	0	3	0
E (1...7)	0	0	30...35
F (1...7)	0	0	15
G (1...7)	~15	0	~30
H (1...7)	~15	~5	~15

Примечание. В качестве шаровой загрузки использовались стальные шары диаметром 40 мм.

3. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ

При проведении статистического анализа зависимостей характеристик вибросигнала от его положения были рассчитаны в разработанном программном обеспечении в пакете MATLAB средние значения относительного вибросигнала от угла установки вибродатчика относительно ударника и построены графики для серий G и H (рис. 3, 4). Априорно предполагалось, что сигнал будет затухать по мере удаления от ударника по степенной зависимости второго порядка (параболическая функция). Как видно из представленных на рис. 3 и 4 графиков, данное предположение подтвердилось. Графики для остальных опытов не показаны, так как характер зависимости в целом аналогичен.

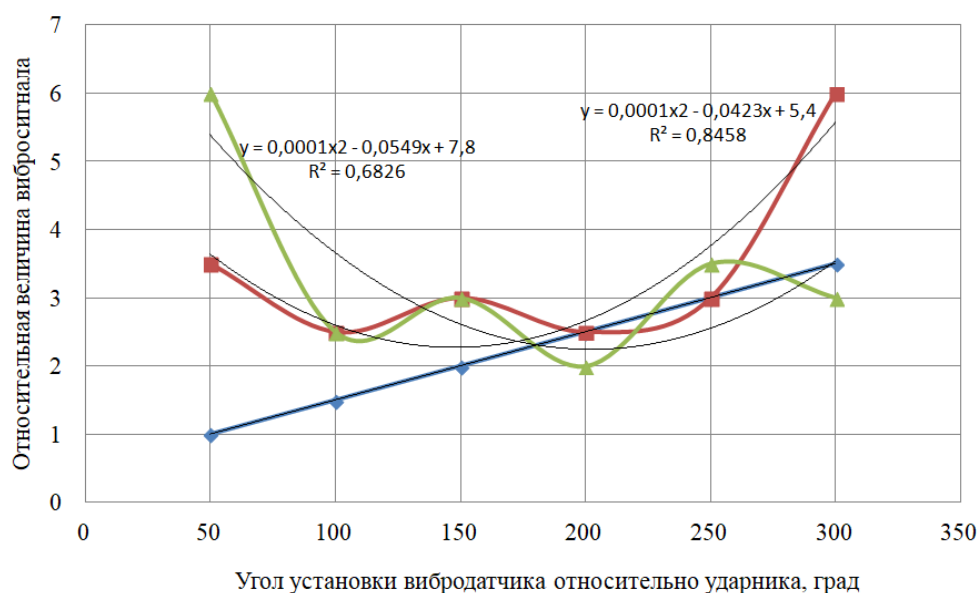


Рис. 3. Зависимости для серии G. —X— Y —Z

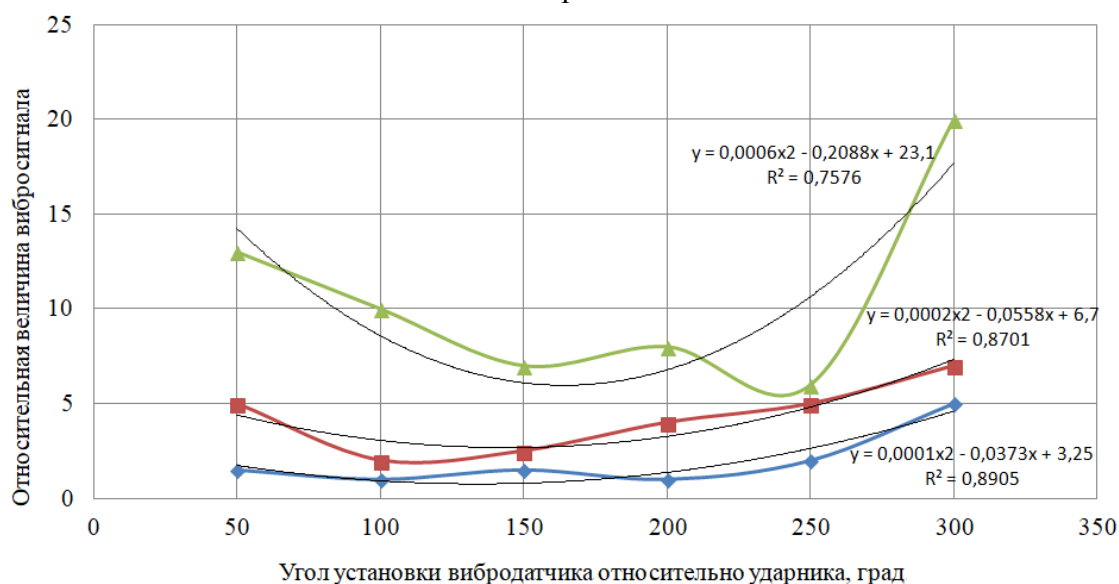


Рис. 4. Зависимости для серии H. —X— Y —Z

Результаты анализа полученных данных показали следующее:
 максимальные значения параметров вибросигнала соответствуют ближайшим к ударнику положениям датчика (углам 45 и -45°);

в большинстве случаев полученные зависимости могут быть аппроксимированы параболической, что соответствует априорному предположению о затухании вибросигнала при удалении от ударника. При этом линейные зависимости можно рассматривать как вырожденный случай параболических;

явные эффекты увеличения затухания наблюдаются при наличии «сплошной» загрузки (вода + шары + песок) с объемом, при котором место нанесения удара оказывается ниже уровня загрузки;

отклонение от ожидаемого затухания, проявляющееся в наблюдаемом росте параметров вибросигнала в точке, противоположной ударнику (180°), может быть

объяснено синфазным сложением вибросигналов, распространяющихся по верхней и нижней полуокружностям барабана;

при недостаточной или несплошной загрузке зависимость часто имеет S-образный характер.

Таким образом, с некоторыми оговорками зависимость параметров вибросигнала (v) от угла (α) может быть в первом приближении описана степенной функцией второго порядка (параболической):

$$v = a \times \alpha^2 + b \times \alpha + c, \quad (1)$$

где коэффициенты a , b и c зависят от степени и типа загрузки.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное исследование подтвердило априорное предположение и принципиальную возможность использования вибрационных сигналов [5–7], снимаемых с поверхности барабана мельницы, для оценки загрузки мельницы [8, 9]. Ключевым фактором является зависимость параметров вибросигнала от угла между вибродатчиком и ударником, которая в условиях, имитирующих реальную работу (наличие «сплошной» загрузки), может описываться полиномом второго порядка.

Сильное влияние на параметры вибросигналов оказывает тип загрузки: наличие твердой фазы в загрузке (песка, шаров) увеличивает трение между частями загрузки и между загрузкой и барабаном и, следовательно, вызывает затухание сигнала; изменение общей массы загрузки (добавление/удаление шаров, изменение уровня воды) напрямую влияет на распространение упругих колебаний (вибраций) по поверхности барабана, что согласуется с физической природой распространения колебаний в упругой системе с диссипативными элементами [10, 11].

В ходе исследований выявлены очевидные недостатки метода, основными из которых являются:

а) разного рода несоответствия: неподвижных лабораторной мельницы с внешним ударником и перемещаемого вибродатчика – промышленному оборудованию по размеру; диаметра используемой шаровой загрузки – размерам лабораторной мельницы по критерию геометрического подобия; параметров ударных воздействий, создаваемых применяемым ударником, – реальным ударам от шаровой загрузки и пр.;

б) слишком большая дискретность по углу между вибродатчиком и ударником для соседних опытов (45°);

в) отсутствие данных для различных загрузок, которые соответствуют технологическому оптимуму и стандартному составу загрузки.

Дальнейшие исследования подразумевают продолжение работ на лабораторной мельнице для исправления недостатков по пунктам б) и в), создание опытного образца системы контроля вибрации и сбор данных на реальной шаровой мельнице [12, 13].

ВЫВОДЫ

Экспериментально подтверждена зависимость статистических характеристик виброскорости и виброперемещения от угла между датчиком и ударником и от типа загрузки лабораторной мельницы. При комплексной загрузке (шары, песок и вода) эта зависимость параметров вибросигналов может быть аппроксимирована степенной функцией второго порядка.

Полученные результаты открывают путь к созданию системы прямого измерения уровня загрузки шаровых мельниц без использования сложных и экономически

невыгодных методов, таких как радиоизотопные или рентгеновские. Предложенный подход потенциально позволяет создать систему на базе относительно недорогих вибродатчиков, закрепленных на внешней поверхности барабана, что значительно упрощает ее внедрение и обслуживание.

Для разработки работоспособного метода необходимы дальнейшие исследования в следующих направлениях:

выполнение однофакторных экспериментов с комбинированной загрузкой в диапазоне 75...125 % от номинальной;

уменьшение дискретности по углу между вибродатчиком и ударником с 45 до 5°;

увеличение количества серий измерений для каждого фактора;

проведение измерений на реальной промышленной мельнице в рабочих условиях для валидации лабораторных данных и разработки частотных или комбинированных методов анализа.

Успешная реализация предложенного метода позволит создать систему автоматического контроля и управления загрузкой шаровых мельниц, которая обеспечит работу оборудования в оптимальном режиме при любых изменениях состава руды. Это не только повысит на 5...15 % производительность, но и снизит на 10...20 % удельный расход энергии, что сделает предприятие более конкурентоспособным на рынке. Кроме того, предотвращение перегрузов сократит износ оборудования и количество аварийных остановок, дополнительно увеличивая экономическую эффективность решения.

Таким образом, данное исследование представляет собой важный шаг на пути к решению многолетней проблемы контроля загрузки шаровых мельниц. Дальнейшие работы в этом направлении могут принести значительную пользу горнодобывающей промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И., Пожарский Ю.М. О возможности определения уровня загрузки шаровой мельницы в результате нейросетевого анализа спектра сигнала виброускорения ее цапфы // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2016. № 1. С. 38–47.

2. Гончаров Ю.Г. Автоматический контроль и регулирование технологических процессов на железорудных обогатительных фабриках. М.: Недра, 1968. 227 с.

3. Tang J., Zhao L.J., Zhou J.W., Yue H., Chai T.Y. Experimental analysis of wet mill load based on vibration signals of laboratory-scale ball mill shell // *Minerals Engineering*. 2010. V. 23. № 9. С. 720–730.

4. Андреев С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1980. 320 с.

5. Улитенко К.Я., Маркин Р.П., Соколов И.В. Виброакустический анализ процессов дробления и измельчения на горно-обогатительных предприятиях // *Горный журнал*. 2009. № 10. С. 72–76.

6. Сибирцева Н.Б., Потапенко А.Н., Семилетов Н.А. Методы измерения уровня загрузки мельниц, основанные на физических процессах современных централизованных систем смазки // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2010. Т. 12. № 4 (3). С. 694–697.

7. Улитенко К.Я., Маркин Р.П., Соколов И.В. Виброакустический анализ процессов дробления и измельчения на горно-обогатительных предприятиях // *Горный журнал*. 2009. № 10. С. 72–76.

8. Леонов Р.Е. Контроль заполнения мельницы по отношению долей частотных составляющих // *Известия вузов. Горный журнал*. 2012. № 3. С. 111–113.
9. Tang J. Chai T., Zhao L., Yu W., Yue H. Soft sensor for parameters of mill load based on multi-spectral segments PLS sub-models and on-line adaptive weighted fusion algorithm // *Neurocomputing*. 2012. V. 78. № 1. P. 38–47.
10. Gugel K., Moon R.M. Automated mill control using vibration signal processing // *IEEE Cement Industry Technical Conference*, Charleston, SC, USA, 2007. P. 17–25.
11. Gugel K., Palcios G., Ramirez J., Parra M. Improving ball mill control with modern tools based on digital signal processing technology // *IEEE Cement Industry Technical Conference*. Dallas, TX, USA. 2003. P. 311–318.
12. Гринман И.Г. Измерения степени загрузки мельницы рудой с помощью телеизмерительного датчика // *Обогащение руд*. 1962. № 1. С. 27–29.
13. Пожарский Ю.М., Полещенко Д.А., Подковыров И.Ю. Определение степени заполнения мельницы мокрого самоизмельчения с применением беспроводных технологий // *Горный журнал*. 2013. № 2. С. 115–118.

Для цитирования: Бочков В.С., Бочкова К.В., Бабенко А.Г. Методика определения уровня загрузки шаровой мельницы // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 2 (30). С. 94–102.

THE METHOD OF DETERMINING THE LOADING LEVEL OF A BALL MILL

V.S. BOCHKOV, Cand. Sc., K.V. BOCHKOVA, Postgraduate,
A.G. BABENKO, Dr. Sc.

Ural State Mining University
30, Kuibyshev St., Yekaterinburg, 620144, e-mail: bochkof@list.ru

Improving the energy efficiency of ball mills, which are the main power-consuming units at mineral processing plants, is an urgent scientific and technical task. The key limiting factor is the lack of reliable systems for operational monitoring of the drum filling degree, leading to suboptimal operating modes (underloading or overloading) and significant economic losses. The article proposes a fundamentally new approach to determining the load level, based on the analysis of the spatial distribution of vibration signals over the drum surface – the "geometric method". During laboratory studies on a Bond mill, vibration parameters (vibration velocity S , vibration displacement D) were recorded for various loading combinations (balls, sand, water) and sensor positions relative to the impact source. Using time-domain, statistical, and frequency analysis methods, it was established that the dependence of the statistical characteristics of the signal (mean, median, max, std) on the angle between the sensor and the impactor is approximated in most cases by a second-order polynomial. A significant influence of the load type on the signal amplitude was revealed: the presence of bulk material (sand) leads to a multiple damping of oscillations due to energy dissipation through friction. The results confirm the fundamental possibility of creating a direct vibration-based load monitoring system independent of indirect process parameters. Recommendations for further research to develop an industrial methodology are formulated.

Keywords: ball mill, load level, condition monitoring, vibration analysis, vibration velocity, vibration displacement, statistical signal processing, frequency analysis, geometric method, process optimization.

Поступила в редакцию/received: 03.02.2026; после рецензирования/revised: 11.02.2026;
принята/accepted: 16.02.2026

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 2 (30), 2026*

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 004.258

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-2-103-109

УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ФУНКЦИОНАЛЬНО СВЯЗАННЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРОГРАММНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ

М.А. ГЛЕБСКИЙ, магистрант, И.А. ЕГЕРЕВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: mglebskiy@mail.ru

© Глебский М.А., Егерев И.А., 2026

В статье рассмотрена задача оптимального распределения ресурсов вычислительной системы – оперативной памяти и процессорного времени – между виртуальными контейнерами в составе сложных распределенных приложений. Проанализированы основные проблемы управления большими системами, такие как конфликты зависимостей, конкуренция за сетевые порты и несбалансированное потребление ресурсов. Показано, что традиционные подходы к распределению ресурсов, ориентированные на максимизацию суммарной производительности, оказываются неэффективными в условиях сильной функциональной взаимозависимости контейнеров, поскольку приводят к возникновению «узких мест». Предложена максиминная постановка задачи распределения ресурсов с учетом минимальных требований к пропускной способности каждого компонента, с тем чтобы обеспечить сбалансированную загрузку всех элементов системы и повысить ее эффективность.

Ключевые слова: виртуализация, виртуальный контейнер, Docker.

ВВЕДЕНИЕ

Инфраструктура современных приложений сложна. Как правило, каждое приложение состоит из нескольких частей. Так, самое простое современное web-приложение состоит из 3 частей: базы данных (например, postgresql [1]), серверного приложения, которое отвечает за бизнес логику, и http-сервера (например, nginx [2]), отвечающего за доставку пользователям клиентской части приложения. Для функционирования такой системы необходимо, чтобы все ее элементы находились в активном состоянии [3, 4].

Каждому из этих приложений нужны зависимости, порты для взаимодействия с другими приложениями и оперативная память для работы. Под «зависимостями» будем понимать библиотеки, модули, драйверы, а также другие приложения, необходимые для работы.

На данном этапе разработки сталкиваются с рядом эксплуатационных проблем. Во-первых, возникают конфликты зависимостей: различные приложения требуют несовместимые версии одной и той же библиотеки, что затрудняет их совместное развертывание в единой среде. Во-вторых, происходит конфликт сетевых портов: несколько сервисов пытаются занять один и тот же порт, что приводит к сбоям

при запуске или недоступности отдельных компонентов. В-третьих, отдельные приложения демонстрируют избыточное потребление оперативной памяти. Это обычно обусловлено неоптимальной работой с кэшированием, утечками памяти в долгоживущих процессах или обработкой объемных данных без применения потоковой передачи. В результате такие приложения истощают системные ресурсы, снижая производительность платформы в целом и вызывая нестабильность работы соседних сервисов.

Если разработчик имеет дело с минимальной конфигурацией системы, задача разрешения конфликтов не является сложной. Однако по мере роста функциональности увеличивается количество приложений. Так, для обеспечения высоконагруженности и высокой скорости их выполнения добавляется списочная база данных для кэширования, например redis [5], и полнотекстовый поиск, например elastic search [6], а для интеграции между приложениями системы используется менеджер потоков событий, например kafka [7]. Получаем уже 6 приложений, которые не должны мешать друг другу функционировать, а некоторые из них должны стабильно взаимодействовать.

По мере роста нагрузки на систему добавляются дублирующие сервера и балансировщик нагрузки, файловое хранилище, аналитические системы, системы логирования и т.д. Как правило, управление таким количеством приложений становится весьма затруднительным.

Таким образом, существует проблема управления системой, состоящей из большого количества приложений, в том числе управления зависимостями, сетевым взаимодействием и распределением ресурсов вычислительной системы.

ЗАДАЧА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Одним из способов решения проблемы развертывания крупных систем является ввод дополнительного слоя абстракции – виртуальных контейнеров. Наиболее часто используемым решением является Docker [8] или его альтернатива с открытым исходным кодом – Podman [9]. Docker является платформой для упаковки, доставки и запуска приложений в изолированных контейнерах. Виртуальный контейнер отличается от виртуальной машины. Docker оперирует именно контейнерами (рисунок).

Сравним основные особенности работы виртуальной машины и виртуального контейнера:

виртуальная машина виртуализирует аппаратное обеспечение. Каждая виртуальная машина содержит свою собственную полноценную гостевую операционную систему (ОС), которая работает поверх хостовой ОС через слой гипервизора². Это требует много ресурсов (ядре процессора, оперативной памяти, постоянной памяти) и увеличивает время запуска, но создает полную изоляцию;

Docker-контейнер виртуализирует ОС. Все контейнеры на одной машине используют ядро хостовой ОС, но работают в изолированных пространствах процесса. Это делает их невероятно легковесными, быстрыми в запуске и требующими значительно меньше ресурсов.

Хотя виртуальные контейнеры более легковесные, чем виртуальные машины, и позволяют куда проще дублировать элементы, все еще остается проблема рационального распределения ресурсов ОС для получения максимальной производительности.

² Гипервизор (монитор виртуальных машин) — «программа, создающая среду функционирования других программ (в том числе других операционных систем) за счет виртуализации аппаратных ресурсов вычислительной системы» [10].



Сравнение виртуальной машины и виртуального контейнера

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Решению аналогичных задач посвящено достаточно большое количество работ специалистов в области программной инженерии и оптимального управления [10–14]. В данной работе приводится подход к решению задачи распределения ресурсов, основанный на применении виртуальных контейнеров для изоляции и управления системой и максиминного подхода к распределению ресурсов.

Определим задачу: распределить ресурсы вычислительной системы между контейнерами для получения максимальной производительности. Под производительностью контейнера будем иметь в виду производительность компонента системы, заключенного в контейнер.

Приведем входные параметры, используемые при решении задачи распределения ресурсов:

- объем оперативной памяти;
- количество ядер процессора;
- количество контейнеров;
- производительность контейнеров.

Обозначим переменные:

- m_i – объем памяти, выделенный i -му контейнеру;
- c_i – объем ядер, выделенный i -му контейнеру;
- n – количество контейнеров.

Тогда задача распределения ресурсов эквивалентна следующей задаче:

$$\sum_{i=1}^n F_i(m_i, c_i) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $F_i(m_i, c_i)$ – функция производительности для i -го контейнера при выделенных m_i и c_i при ограничениях.

Общая память, выделенная контейнерам, не должна превышать общий объем доступной оперативной памяти M :

$$\sum_{i=1}^n m_i \leq M.$$

Общее количество ядер, выделенное контейнерам, не должно превышать общий объем доступных ядер процессора C :

$$\sum_{i=1}^n c_i \leq C.$$

Каждый контейнер должен получать не менее минимально допустимого объема памяти l_i и ядер d_i :

$$\begin{aligned} m_i &\geq l_i, & i &= 1, \dots, n, \\ c_i &\geq d_i, & i &= 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Однако при такой формулировке задачи возникает проблема «узкого места»³, связанная с производительностью наименее эффективного элемента, так как контейнеры являются частью единой системы и влияют на работу друг друга и функционирование всей системы.

Рассмотрим архитектуру, состоящую из двух контейнеров: первый (шина данных) отвечает за прием входных запросов и передачу результатов клиенту, второй (вычислительный сервис) осуществляет непосредственную обработку данных. При распределении вычислительных ресурсов пропорционально трудоемкости операций (например, 80 % ресурсов выделяется сервису обработки, 20 % – шине данных) теоретически достигается баланс с точки зрения вычислительной задачи. Однако на практике подобное распределение ведет к дисбалансу производительности компонентов: шина данных, обладая ограниченными ресурсами, не способна обеспечить пропускную способность, достаточную для загрузки вычислительного сервиса. В результате сервис значительную часть времени находится в простое, ожидая поступления данных, что снижает общую производительность системы и делает изначально «оптимальное» распределение ресурсов неэффективным в реальных условиях эксплуатации.

Предлагаемые способы решения проблемы «узкого места»:

1. Ввести в задачу весовой коэффициент w_i , отображающий значимость элемента в системе со стороны выделяемых ресурсов. Значения весовых коэффициентов индивидуальны для каждой системы и зависят от ее составляющих, подбор значений осуществляется экспертом.

Тогда задача о распределении ресурсов примет вид

$$\sum_{i=1}^n w_i F_i(m_i, c_i) \rightarrow \max,$$

где w_i – значимость контейнера при распределении ресурсов.

2. Перейти к максиминной задаче. В этом случае будем считать, что производительность системы определяется контейнером с наименьшей производительностью, так как последний является «узким местом» и тормозит работу всей системы. Тогда задача о распределении ресурсов примет вид

$$F_i(m_i, c_i) \rightarrow \max \min,$$

т.е. необходимо распределить ресурсы таким образом, чтобы контейнер с минимальной производительностью принял свое максимальное значение.

3. Ввести дополнительное ограничение, которое будет отображать реальную работоспособность контейнера в соответствии с его функциональной спецификацией.

³ Узкое место – это компонент, процесс или этап, ограничивающий общую производительность системы или рабочую скорость. В соответствующем англоязычном термине «bottleneck» (бутылочное горлышко) прослеживается аналогия с горловиной бутылки, узость которой не позволяет вылить или высыпать все ее содержимое сразу, даже если ее перевернуть.

Для этого введем еще один входной параметр – r_i , т.е. количество запросов в секунду, которые должен обрабатывать контейнер, а функция производительности отображает реальное количество запросов, которое выполняет элемент при заданных m_i и c_i . Тогда

$$F_i(m_i, c_i) \geq r_i,$$

$$\sum_{i=1}^n F_i(m_i, c_i) \rightarrow \max.$$

В таком случае каждый элемент системы гарантированно будет выполнять свой функционал. Однако это не отменяет того, что при выполнении ограничений оставшиеся ресурсы распределятся между контейнерами с лучшей степенью производительности, т.е. проблема «узкого места» остается.

Решение задачи заключается в объединении способов 1 и 3, т.е. необходимо ввести дополнительный входной параметр и соответствующее ему ограничение по желаемой производительности контейнера и представить задачу в максиминной форме:

$$F_i(m_i, c_i) \rightarrow \max \min$$

при ограничениях

$$m_i \geq l_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad \sum_{i=1}^n m_i \leq M;$$

$$c_i \geq d_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad \sum_{i=1}^n c_i \leq C;$$

$$F_i(m_i, c_i) \geq r_i, \quad i = 1, \dots, n,$$

где m_i – объем памяти, выделенный i -му контейнеру; c_i – объем ядер, выделенный i -му контейнеру, n – количество контейнеров; l_i – минимальный объем памяти, необходимый i -му контейнеру; d_i – минимальный объем ядер, необходимый i -му контейнеру; r_i – количество запросов в секунду, которые должен обработать контейнер; $F_i(m_i, c_i)$ – функция производительности контейнера, отображающая пропускную способность (запросов в секунду) от выделенных оперативной памяти и ядер; M – общий объем оперативной памяти; C – общее количество ядер процессора.

Таким образом, находим максимальное значение функции при минимальных ресурсах и заданных ограничениях по минимальной производительности и максимальному объему ресурсов, т.е. решение, при котором производительность самого слабого контейнера будет максимальной.

Логическое развитие решения приведенной задачи связано с дополнительными условиями применения горизонтального масштабирования⁴, в случае если вертикальное масштабирование⁵ становится неэффективным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования была сформулирована задача оптимального распределения ресурсов вычислительной системы, таких как оперативная память и процессорные ядра, между виртуальными контейнерами с целью достижения максимальной производительности всей системы. Учтены базовые ограничения: ограниченность общих ресурсов, минимальные требования к ресурсам каждого контейнера, а также

⁴ Горизонтальное масштабирование – это подход к увеличению производительности и пропускной способности системы путем добавления дополнительных узлов (серверов, экземпляров) в кластер, при этом нагрузка распределяется между ними с помощью балансировщика [13].

⁵ Вертикальное масштабирование – это подход к повышению производительности системы путем наращивания аппаратных ресурсов существующего узла: увеличения количества процессоров (ядер), объема оперативной памяти, производительности дисковой подсистемы или сетевых интерфейсов [13].

необходимость обеспечения заданной пропускной способности (в запросах в секунду) для каждого компонента системы. Предложена максиминная постановка задачи, сочетающая введение нижних границ производительности с максимизацией наихудшего показателя в системе. Такой подход позволяет избежать эффекта «узкого места», при котором перераспределение ресурсов в пользу наиболее эффективных контейнеров снижает общую производительность из-за дисбаланса нагрузки. Сформулированная постановка задачи распределения ресурсов вычислительной системы может быть использована как основа для разработки алгоритмов динамического управления ресурсами в системах управления контейнерами, таких как Docker или Podman, или системах оркестрации, таких как Kubernetes.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Виртуальные контейнеры значительно упрощают развертывание сложных распределенных систем и управление ими, однако требуют продуманного подхода к распределению вычислительных ресурсов. В работе показано, что классическая оптимизация по суммарной производительности не всегда применима в условиях взаимозависимости компонентов системы. Предложенная постановка задачи распределения ресурсов вычислительной системы с учетом функциональных требований к каждому контейнеру позволяет достичь сбалансированного распределения ресурсов и повысить общую эффективность работы системы.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на применение предложенного подхода при реализации сценариев горизонтального масштабирования, а также на его интеграцию с системами управления и оркестрации контейнеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. PostgreSQL. URL: <https://www.postgresql.org/> (дата обращения: 07.02.2026).
2. Nginx. URL: <https://nginx.org/> (дата обращения: 07.02.2026).
3. Карпов В.Е., Коньков К.А. Операционные системы, среды и оболочки. URL: <https://scinetwork.ru/disk/file/1555> (дата обращения: 03.02.2026).
4. Таненбаум Э.С., Вудхалл А.С. Операционные системы. Разработка и реализация / пер. с англ., 3-е изд. СПб.: Питер, 2007. 704 с.
5. Redis. URL: <https://redis.io/> (дата обращения: 07.02.2026).
6. Elasticsearch. URL: <https://www.elastic.co/elasticsearch> (дата обращения: 07.02.2026).
7. Kafka. URL: <https://nginx.org/> (дата обращения: 07.02.2026).
8. Docker. URL: <https://www.docker.com/> (дата обращения: 07.02.2026).
9. Podman. URL: <https://podman.io/> (дата обращения: 07.02.2026).
10. Кравченко Ю.А., Курситыс И.О. Комбинированный подход к решению задачи распределения ресурсов // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2017. № 7 (192). С. 111–122.
11. Босов А.В. Обобщенная задача распределения ресурсов программной системы // *Информатика и ее применения*. 2014. Т. 8. № 2. С. 39–47.
12. Баранов А.В., Николаев Д.С. Использование контейнерной виртуализации в организации высокопроизводительных вычислений // *Программные системы: теория и приложения*. 2016. Т. 7. № 1 (28). С. 117–134.
13. Бондаренко А.С., Зайцев К.С. Управление контейнерами при построении распределенных систем с микросервисной архитектурой // *International Journal of Open Information Technologies*. 2023. Т. 11. № 8. С. 17–23.
14. Коновалов О.А., Коновальчук Е.В., Сербулов Ю.С. Решение задачи равномерного распределения ресурсов методом динамического программирования // *Лесотехнический журнал*. 2016. Т. 6. № 3 (23). С. 248–254.

Для цитирования: Глебский М.А., Егерова И.А. Управление ресурсами вычислительной системы для оптимизации работы функционально связанных компонентов программного приложения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 2 (30). С. 103–109.

RESOURCE MANAGEMENT IN COMPUTING SYSTEMS FOR OPTIMIZING THE PERFORMANCE OF FUNCTIONALLY RELATED SOFTWARE APPLICATION COMPONENTS

M.A. GLEBSKY, magister, I.A. EGEREVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: mglebskiy@mail.ru

The article addresses the problem of optimal allocation of computational resources - specifically RAM and CPU time – among virtual containers within complex distributed applications. It analyzes key challenges in managing systems composed of numerous interconnected components, including dependency conflicts, competition for network ports, and unbalanced resource consumption. The study demonstrates that traditional resource allocation approaches, which focus on maximizing aggregate performance, prove ineffective under conditions of strong functional interdependence among containers, as they tend to create system bottlenecks. To address this issue, a mathematical model for resource allocation is proposed that incorporates minimum throughput requirements for each component. This approach aims to ensure balanced loading across all system elements and thereby enhance overall system efficiency.

Keywords: virtualization, virtual containers, Docker.

Поступила в редакцию/received: 24.02.2026; после рецензирования/revised: 26.02.2026;
принята/accepted: 02.03.2026

УДК 681.5

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-2-109-119

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ДАЛЬНЕМУ ПРОГНОЗИРОВАНИЮ РАЗВИТИЯ ХОЛОДИЛЬНЫХ КОМПРЕССОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИЗА КЛЮЧЕВОГО ПРОТИВОРЕЧИЯ

С.Л. ГОРОБЧЕНКО¹, канд. техн. наук, С.А. МЕШКОВ², канд. техн. наук,
Н.Н. ВЕРНЕР³, канд. техн. наук, С.А. ВОЙНАШ⁴, мл. научн. сотр.,
В.А. СОКОЛОВА¹, канд. техн. наук

¹Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18,
e-mail: sgorobchenko@yandex.ru

²Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1,
e-mail: meshkovcergey@mail.ru

³Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5,
e-mail: wernern@mail.ru

⁴Рубцовский индустриальный институт (филиал) Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6, e-mail: sergeyvoinash@yandex.ru

© Горобченко С.Л., Мешков С.А., Вернер Н.Н., Войнаш С.А., Соколова В.А., 2026

В статье предложен метод долгосрочного прогнозирования развития технических систем (ТС) на основе системного анализа ключевого внутреннего противоречия. В качестве объекта исследования выбрана система «холодильный компрессор». Метод основан на выявлении и отслеживании развертывания основного противоречия между двумя взаимоисключающими требованиями надсистемы – обеспечением производительности (количественная сторона) и созданием давления (качественная сторона). Прослежена эволюция компрессоров от поршневых к ротационным, винтовым, центробежным и осевым, выявлена главная движущая сила развития – рост производительности, достигаемый преимущественно увеличением скорости вращения рабочих органов. Анализ показал, что механический принцип сжатия (объемный и динамический) близок к исчерпанию своих возможностей вследствие физических и конструкционных ограничений. В качестве перспективного направления, следующего за осевыми компрессорами, обоснован переход к принципиально иным, немеханическим методам сжатия, таким как магнитогидродинамический принцип и термоэлектрическое охлаждение, что соответствует общей тенденции перехода рабочего тела с макро- на микроуровень. Сделан вывод, что прогнозирование на основе анализа ключевого противоречия и надсистемных требований позволяет выделить магистральные пути развития и создать достоверные долгосрочные прогнозы.

Ключевые слова: системный подход, дальнейшее прогнозирование, ТС, холодильный компрессор, ключевое противоречие, законы развития ТС, надсистемные требования, производительность, принцип сжатия, поршневой компрессор, винтовой компрессор, центробежный компрессор, осевой компрессор, магнитогидродинамический метод, термоэлектрическое охлаждение, эволюция техники.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема долгосрочного прогнозирования развития технических систем (ТС) сохраняет свою актуальность в условиях ускорения научно-технического прогресса и необходимости стратегического планирования в инженерной деятельности [1]. Несмотря на существование ряда методов прогнозирования, от хорошо освоенного системного оператора до анализа законов развития ТС, часто сохраняется элемент субъективности в выборе ведущей тенденции, что снижает надежность прогнозов, особенно на отдаленную перспективу [2, 3]. В этой связи особый интерес представляют подходы, позволяющие выявить объективную, внутреннюю логику развития системы, определяемую ее фундаментальными свойствами и взаимоотношениями с надсистемой.

В основе предлагаемого метода лежит диалектический принцип, согласно которому возникновение, существование и развитие любой ТС обусловлены ключевым противоречием, заложенным в нее потребностями надсистемы. Это противоречие является источником самодвижения ТС, а его развертывание и попытки разрешения определяют последовательную смену конструктивных форм и принципов действия [4, 5]. Таким образом, для построения обоснованного прогноза необходимо реконструировать это исходное противоречие, проанализировать историю его развития и выявить момент исчерпания возможностей его разрешения в рамках существующей парадигмы.

Целью данной работы является демонстрация применения системного подхода к дальнейшему прогнозированию на примере эволюции холодильных компрессоров через призму анализа их ключевого противоречия. Для достижения этой цели решаются следующие задачи: 1) выявить и сформулировать основное противоречие, лежащее в основе технической системы «компрессор»; 2) проследить историческую цепочку смены типов компрессоров (поршневого, ротационного, винтового, центробежного, осевого) как процесс последовательного разрешения и обострения этого противоречия; 3) определить главную движущую силу развития и показать приближение механического принципа сжатия к физическим пределам; 4) на основе выявленных закономерностей сформулировать прогноз о необходимости перехода к принципиально новым, немеханическим способам создания давления и холода.

Выбор компрессоров в качестве объекта исследования обусловлен их технологической зрелостью, длительной и хорошо документированной историей развития, а также наглядностью проявления в их эволюции общих законов развития ТС [6]. Результаты проведенного анализа позволяют систематизировать знания об эволюции данного класса машин, а также предлагают практический инструмент для прогнозирования траекторий развития других сложных ТС.

В теории прогнозирования развития ТС известны эффективные решения, основанные на применении инструментов системного подхода [7, 8]. Помимо хорошо разработанного аппарата Системного оператора, развиваются общие методологические подходы, а также методы прогнозирования, опирающиеся на отдельные закономерности, например спиралевидный характер развития и выявление особенностей циклических повторений в эволюции ТС [9]. В настоящей работе предлагается метод прогнозирования, базирующийся на выявлении, анализе и прослеживании развертывания основного противоречия, лежащего в основании ТС, что позволяет определить наиболее перспективные направления ее развития [10]. Исходная посылка метода заключается в том, что любая ТС возникает как разрешение некоторого противоречия в потребностях надсистемы; ее существование, эволюция и исчерпание детерминированы наличием и последующим разрешением этого надсистемного противоречия. В процессе развертывания ТС действуют фундаментальные законы диалектики, проявляющиеся в специфических закономерностях развития ТС [11]. В качестве объекта прогнозного анализа в данной работе рассматривается ТС «Компрессор».

ОСНОВНОЕ ПРОТИВОРЕЧИЕ В РАЗВИТИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «КОМПРЕССОР»

Компрессор как ТС сформировался на пересечении двух фундаментальных надсистемных требований: обеспечения перемещения рабочей среды и создания требуемого уровня давления. Именно эти две функции, реализуемые различными, несводимыми друг к другу элементами, породили ключевое внутреннее противоречие ТС.

Развертывание данного противоречия выступило движущей силой диверсификации компрессорного оборудования, обусловив многообразие конструктивных форм. Таким образом, производительность и давление, выступая как две качественно различные стороны единой технической функции, задали вектор эволюции компрессора, направленный на удержание и разрешение этого противоречия в рамках одной системы (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема ТС «Компрессор»

Производительность компрессора отражает количественную, а давление — качественную сторону развития ТС; их взаимодействие, опосредованное надсистемными потребностями, обуславливает эволюцию системы, тогда как противоречивость данной взаимосвязи порождает многообразие конструктивных форм. Количественная характеристика производительности раскладывается на две неразделимые составляющие — объемную (организация пространства давления в рабочей полости) и динамическую (скорость движения рабочего органа), каждая из которых вносит вклад в развертывание ТС при разрешении возникающих противоречий. Следуя принципу анализа от простейших форм, в качестве исходной ТС, где наиболее отчетливо проявилось противоречие между объемной и динамической составляющими, рассмотрим поршневой компрессор.

ПОРШНЕВОЙ КОМПРЕССОР

Рассмотрим, как требования, предъявляемые надсистемой компрессоров — холодильными машинами, отразились на развитии поршневых компрессоров. Теоретически производительность поршневых компрессоров ($V_{км}$) можно повысить, увеличивая теоретический объем цилиндров ($V_{цп}$) и число оборотов двигателя (n):

$$V_{км} = V_{цп} \cdot n.$$

Роста объемной производительности ($V_{цп}$) можно добиться путем увеличения диаметра цилиндра ($D_{ц}$), хода поршня (S) и увеличением количества цилиндров (Z):

$$V_{цп} = \frac{\pi}{4} D_{ц}^2 S Z.$$

Экстенсивное повышение производительности поршневых компрессоров ограничено следующими факторами:

1. Увеличение диаметра цилиндра и хода поршня лимитируется ростом протечек, массогабаритных характеристик и необходимостью снижения скорости поршня из-за возрастания инерционных нагрузок.

2. Нарращивание числа цилиндров ограничено снижением технологичности, усложнением обслуживания и увеличением габаритов.

Достижение предела по данным параметрам обуславливает переход к преимущественному наращиванию частоты вращения, что означает доминирование динамической составляющей производительности над объемной.

Однако интенсификация скоростного режима поршневых компрессоров ограничена резким снижением надежности вследствие роста инерционных сил и износа. Принципиальным ограничением выступает также неудовлетворительная работа клапанов при давлении всасывания ниже $0,2 \text{ кгс/см}^2$. Экономически обоснованный предел производительности таких компрессоров составляет $\approx 120 \text{ кВт}$ при средней скорости поршня 4 м/с . Попытка обойти скоростные ограничения путем наращивания рабочего объема привела к созданию крейцкопфных компрессоров, характеризующихся чрезмерными массогабаритными показателями, что подтверждает неэффективность экстенсивного пути развития (рис. 2).

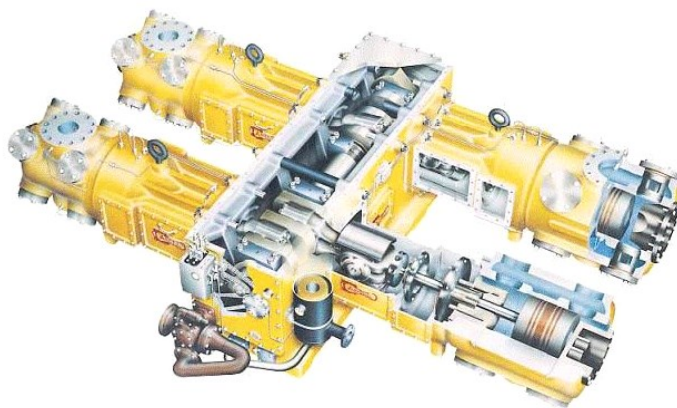


Рис. 2. Схема крейцкопфного компрессора

РОТАЦИОННО-ПОРШНЕВЫЕ КОМПРЕССОРЫ

Ротационные компрессоры реализуют перенос принципа поршневых машин на микроуровень: ограниченное число цилиндров (2–8) замещено множеством рабочих полостей. Такая архитектура обеспечила повышение частоты вращения ротора при сохранении его уравниваемости, а также исключение всасывающих клапанов, что повысило надежность и снизило гидравлические потери на всасывании.

Преимущества таких компрессоров перед поршневыми наиболее выражены в области низких температур кипения и малых давлений всасывания. При этом в ротационных машинах классический принцип объемного сжатия модифицирован в объемное сжатие, реализуемое при вращательном движении рабочего органа.

На этом уровне техническая система компрессора практически объединила две альтернативные системы: микропоршни, отражающие в целом объемный принцип сжатия, и динамический ротор за счет появления скоростей вращения, ранее недостижимых в рамках объемного принципа сжатия, реализованного в поршневых компрессорах.

В ходе внутреннего саморазвития технической системы проявилось фундаментальное противоречие: усиление динамических характеристик системы потребовало трансформации самого принципа объемного сжатия. Неравномерность развития подсистем могла быть преодолена лишь путем динамизации объемного принципа, что подразумевало устранение недостатков ротационных компрессоров, производных от возвратно-поступательного движения.

Разрешение данного противоречия реализовано в винтовых компрессорах, обеспечивших существенное повышение частоты вращения ротора при снижении инерционных нагрузок.

Движущей силой перехода выступили физические противоречия, а именно несовместимость поступательного движения пластин с вращательным высокоскоростным движением ротора, приводящая к заклиниванию. Данный случай иллюстрирует общую закономерность: исчерпание ресурсов развития ТС и переход к новым системам (актуализация надсистемных потребностей) наиболее часто инициируется именно физическими, а не техническими противоречиями.

ВИНТОВЫЕ КОМПРЕССОРЫ

Широкое применение винтового компрессора (рис. 3), захват им ключевых позиций в холодильных компрессорах отразились в нарастающем выпуске таких компрессоров в развитых странах и появлении большого количества патентов на них.

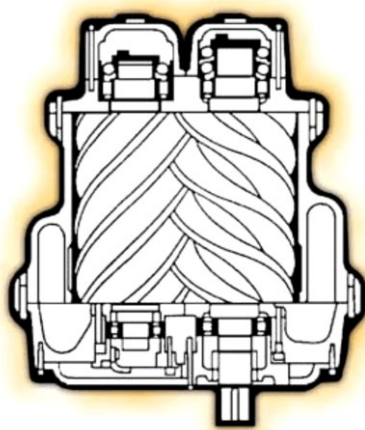


Рис. 3. Схема принципа работы винтового компрессора

Объемная производительность винтового компрессора рассчитывается по формуле

$$V_T = K_{и0} W_0 z_1 n_1 = K_{и0} z_1 \left(\frac{L}{D_1} \right) (f_{1n} + f_{2n}) \frac{D_i^3}{D_1^2} n_1.$$

Так же как и для рассмотренных выше агрегатов, рост производительности винтового компрессора может достигаться в большей степени за счет единственной динамической составляющей – скорости вращения роторов. Другие элементы: полезный объем полости всасывания, увеличение длины, коэффициент использования площади и прочие – в своем влиянии весьма ограничены.

Для всех типов машин объемного сжатия увеличение числа рабочих полостей (цилиндров, пластин) и частоты вращения сверх оптимального предела неизменно приводило к деградации объемно-энергетических характеристик. При снижении плотности всасываемого пара падение коэффициента подачи приобретает лавинообразный характер. Таким образом, экстенсивные методы (увеличение рабочего объема и частоты вращения) исчерпали свой потенциал для достижения требуемой производительности при минимизации потерь и габаритов.

Указанные ограничения обусловили переход к динамическому принципу сжатия, основанному на непрерывной передаче энергии потоку путем повышения его кинетической энергии при обтекании лопаток рабочего колеса. Примечательно, что данный принцип вызревал в недрах объемного сжатия: эволюция прослеживается от поршне-

вых машин к ротационным и, наконец, к осевым компрессорам, где линия сжатия совпадает с направлением потока, при сохранении сущности механического сжатия.

Проведенный анализ выявляет приоритет надсистемных требований как движущей силы развития. Обнаружена прямая корреляция между требованиями надсистемы к росту производительности и доминированием динамической составляющей (частоты вращения, числа циклов) над объемной (геометрической производительностью). Несмотря на диалектическую обусловленность развития внутренними противоречиями ТС, глубинная детерминанта эволюции лежит в надсистемных потребностях. Именно они инициировали переход от объемного сжатия к динамическому, позволивший разрешить неустранимые в рамках объемного принципа проблемы вибраций, массогабаритных характеристик и энергоэффективности.

ТУРБОКОМПРЕССОРЫ

Турбокомпрессоры обеспечили качественный скачок в развитии компрессоростроения: расход рабочего тела (газа, хладагента) возрос практически на порядок по сравнению с машинами объемного принципа действия, а окружные скорости достигли 250...300 м/с. Турбокомпрессоры надежны и долговечны, а также не нуждаются в массивных фундаментах, что создало предпосылки для широкого их внедрения.

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ КОМПРЕССОРЫ

Впервые холодильные машины с центробежными компрессорами появились в 1922 г., когда фирма Carrier (США) начала выпускать машины этого типа, работавшие на дихлорметане и дихлорэтилене. В 1926 г. фирмой «Броун-Бовери» были построены аммиачные холодильные машины с центробежными компрессорами. С 1930-х гг. в них применяют преимущественно фреоны, которые являются тяжелыми веществами, поэтому числа Маха значительно выше, чем в газовых компрессорах. При этом в одной ступени достигается высокая степень повышения давления – до 3,3 и сильно уменьшается объем сжимаемых паров.

Производительность центробежного компрессора определяется соотношением

$$V_T = G \cdot V_1, \quad (1)$$

где G – расход через центробежные компрессоры; V_1 – удельный объем всасываемых газов.

Из формулы (1) следует, что при неизменном всасываемом удельном объеме производительность холодильной машины может быть увеличена только при росте расхода. Расход увеличивается только при росте удельной работы ступени центробежного компрессора, которую можно вычислить по формуле

$$L_{ст} = (C_{u_2} u_2 - C_{u_1} u_1)(1 + \beta_{прот} + \beta_{тр}). \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что для достижения эффективной работы ступени следует максимально снизить потери трения и протечек:

$$G = \frac{\pi D_2 b_2 t_2 u_2 \varphi r_2}{\vartheta_2}. \quad (3)$$

Здесь снова видим тенденцию к тому, что достижение больших показателей производительности и степени сжатия осуществляется только увеличением скорости.

Тогда больше кинетической энергии будет переходить в потенциальную. Но из вышеприведенных соображений видно, что этот путь отрицательно влияет на другие характеристики центробежные компрессоры. Для решения данной задачи впервые в компрессорных установках стали появляться системы мультипликаторов и специальных приводов, резко усложнивших компрессор.

Это противоречие: «необходимо повышать скорость для увеличения расхода и степени сжатия и в то же время нельзя повышать скорость» – уже не може быть кардинально разрешено незначительными усовершенствованиями (такими как изменение угла входа и выхода, изменение формы, рабочего колеса и т.д.), поэтому снова потребовалось принципиально новое решение проблемы.

Из-за высокой сложности компрессоров, требующих большой степени повышения давления, возникла необходимость в увеличении числа ступеней без увеличения габаритов и массы компрессора. Основному изменению должны были подвергнуться именно ступени, а не компрессор в целом.

ОСЕВЫЕ КОМПРЕССОРЫ

Как и в случае перехода от поршневых компрессоров к ротационным, появление осевых компрессоров представляет собой перенос динамического принципа сжатия на микроуровень – последовательное сжатие в ступенях малого размера. Данное решение обеспечило повышение частоты вращения ротора и, благодаря прямоточному расположению ступеней, позволило наращивать их число на одном валу без увеличения габаритов.

В настоящее время осевые компрессоры применяются преимущественно при больших объемных расходах рабочего тела (например, в транспортировке газа в газовых холодильных машинах). Преодоление таких ограничений, как вибрация роторов и осаждение пылегазовых частиц в межлопаточных каналах (снижающие КПД до 10 %), создает предпосылки для эффективного замещения центробежных компрессоров в газоперекачивающих агрегатах.

Производительность осевых компрессоров зависит от множества расчетных показателей. В связи с громоздкостью формулы она не приводится. Наиболее важными показателями являются:

коэффициент расхода. Для определенной используемой ступени его рост ограничен понижением значений КПД и колеблется в пределах 0,4...0,5 при максимальном КПД;

относительный диаметр у корневого сечения лопатки ступени. Как правило, принимается равным 0,6;

рост производительности. Достигается в основном ускорением движения потока путем увеличения окружной скорости.

Прирост производительности компрессора утратил внутреннюю обусловленность и перешел в зависимость от внешних подсистем. Увеличение скорости вращения ротора, ранее выступавшее универсальным фактором интенсификации для всех типов сжатия, перестало давать соразмерный прирост производительности, но привело к существенному усложнению привода и сопутствующего оборудования.

КРИЗИС МЕХАНИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА СЖАТИЯ

Проблема усложнения привода разрешается переходом к газо- или паротурбинному приводу вместо электрического, что обеспечивает компактность, но одновременно усиливает зависимость компрессора от приводной системы, интегрируя его в метасистему «турбина – компрессор», вследствие чего эволюция компрессора в значительной мере детерминируется траекторией развития данной метасистемы.

Вестник Тверского государственного технического университета.

Серия «Технические науки». № 2 (30), 2026

Подобное решение оправдано лишь для автономных компрессорных станций; в холодильной технике компрессор, выступая подсистемой холодильной машины, подчиняется ее внутренним закономерностям, что делает сопряжение разнонаправленных тенденций развития в едином агрегате затруднительным. Более фундаментальное ограничение, не зависящее от компрессора, обусловлено пределом прочности конструкционных материалов: современные легированные стали допускают окружные скорости до 300 м/с, титановые сплавы – до 450 м/с, однако данная проблема носит общетехнический характер и неразрешима в рамках компрессоростроения.

Внешним ограничением выступает также нецелесообразность превышения скорости звука рабочим телом (число Маха), что определяется газодинамическими свойствами среды. Следовательно, интенсификация скоростных режимов ротора не приводит к качественному улучшению характеристик компрессора, а лишь увеличивает внешние по отношению к нему ограничения.

Ведущую роль в смене «формаций» компрессоров играет рост производительности. Конструкции, не удовлетворяющие требованиям роста производительности, отбрасываются, или же их развитие замедляется. На их место приходят более совершенные конструкции.

Основным направлением повышения производительности всех видов компрессоров является увеличение окружной скорости или количества оборотов вала компрессора. Для динамического принципа сжатия даже повышение коэффициента сжатия в отдельно взятой ступени достигается повышением скорости вращения. Лопатка компрессора становится той «клеткой», которая органично объединяет разделенные ранее объемный и динамический принципы роста производительности.

Увеличение степени повышения давления и рост КПД, взятые отдельно, являются тенденциями совершенствования компрессоров в рамках каждого отдельного принципа сжатия и представляют собой дополнительное направление совершенствования по отношению к главной движущей силе развития компрессоров, определяемой надсистемными требованиями, – росту производительности. Как правило, рост степени сжатия достигается увеличением числа ступеней, т.е. экстенсивным ростом, сопровождаемым значительным увеличением габаритов и массы компрессора.

На основании проведенного анализа можно сформулировать следующие выводы.

1. Принцип компримирования, основанный на механическом объемном или динамическом сжатии, в своем развитии приближается к исчерпанию. Конструктивное многообразие в рамках каждого из указанных принципов обеспечивало эволюцию компрессоростроения; дальнейшее совершенствование вихревых, спиральных и ротационных конструкций будет способствовать повышению технического уровня компрессоров в пределах существующей ветви сжатия. Однако сам принцип сжатия ограничен как фундаментальными физическими закономерностями, лежащими в его основе, так и технологическими пределами применяемых материалов.

2. Главной движущей силой в развитии компрессоров является рост производительности.

Все приведенные рассуждения можно объединить в одну схему, обобщающую тенденции развития компрессоров от более низкого уровня к более высокому, с более динамичными принципами работы.

Основой схемы является переход от объемного принципа сжатия к динамическому с одновременным переходом рабочих органов от макроуровня к микроуровню. Максимальную эффективность в видимой перспективе будут занимать рабочие тела в виде ионизированных частиц газа в магнитогидродинамических

установках. Необходимость переходов от одного принципа работы к другому вытекает из приведенного анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методологии, ориентированной на анализ эволюции требований со стороны надсистемы по отношению к рассматриваемой технической системе, позволяет верифицировать актуальные и перспективные целевые функции последней. На примере компрессорного оборудования продемонстрировано, что данный подход дает возможность дифференцировать стохастические и малозначимые флуктуации рыночной или технологической конъюнктуры от детерминированных направлений развития технических систем.

Прогнозирование, базирующееся на исследовании динамики потребностей надсистемы, выступает в качестве фундаментальной основы для проектирования перспективных моделей технических систем в долгосрочном горизонте планирования. Устойчивость и достоверность прогноза при этом обеспечиваются за счет комплексного учета требований множества надсистемных образований, в контур которых интегрирована исследуемая техническая система.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лу Л. Анализ, диагностика и стратегическое прогнозирование развития систем: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2012. 226 с.
2. Братченко Н.Ю. Анализ методов прогнозирования параметров сложных технических систем // *Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета*. 2012. № 4 (33). С. 19–21.
3. Пушкарев С.А. Анализ методов инженерного прогнозирования развития технических систем // *Вестник КИГИТ*. 2009. № 1 (8). С. 99–107.
4. Бочков А.П. Моделирование развития технических систем: учебное пособие. СПб.: Санкт-Петербургский политехн. ун-т Петра Великого, 1992. 106 с.
5. Бочков А.П. Элементы качественного описания и прогнозирования развития технических систем. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 1995. 72 с.
6. Кононов Ю.Д., Кононов Д.Ю. Способы анализа и сужения прогнозной области развития систем энергетики // *Системные исследования в энергетике: методология и результаты*. М.: АО «Издательский дом МЭИ», 2018. С. 127–134.
7. Ключников В.Ю., Клементьев С.А. Методология комплексного прогнозирования технологического развития сложных технических систем // *Инноватика и экспертиза: научные труды*. 2018. № 2 (23). С. 53–61.
8. Панфилов В., Андреев С., Яковлев В., Бычков Е. Научно-техническое прогнозирование направления развития холодильных технологий и техники // *Морское оборудование и технологии*. 2020. № 1 (22). С. 14–20.
9. Поляков П.С. Метод формирования структуры, определения основных проектных параметров и анализа эффективности парокompрессионных холодильных систем: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2011. 150 с.
10. Володин В.И. Комплексный подход к расчету параметров компрессионной холодильной машины // *Холодильная техника*. 1998. № 2. С. 8–10.
11. Капустин И.В., Кулаев Е.В., Швецов И.И., Грицай А.И. Анализ неисправностей и отказов компрессоров холодильного оборудования. *Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК*: Сб. науч. статей. Ставрополь: АГРУС, 2023. С. 93–96.

Для цитирования: Горобченко С.Л., Мешков С.А., Вернер Н.Н., Войнаш С.А., Соколова В.А. Системный подход к дальнейшему прогнозированию развития холодильных компрессоров с использованием анализа ключевого противоречия // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 2 (30). С. 109–119.

A SYSTEMATIC APPROACH TO LONG-TERM FORECASTING OF REFRIGERATION COMPRESSORS USING KEY CONTRADICTION ANALYSIS

S.L. GOROBCHENKO¹, Cand. Sc., S.A. MESHKOV², Cand. Sc.,
N.N. WERNER³, Cand. Sc., S.A. VOINASH⁴, Junior Researcher,
V.A. SOKOLOVA¹, Cand. Sc.

¹Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
18, Bolshaya Morskaya St., Saint Petersburg, 191186, e-mail: sgorobchenko@yandex.ru

²Baltic State Technical University "Voenmeh" named after D.F. Ustinov,
1, 1-ya Krasnoarmeyskaya St., Saint Petersburg, 190005, e-mail: meshkovsergey@mail.ru

³Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov,
5, Institutsky Lane, Saint Petersburg, 194021, e-mail: wernern@mail.ru

⁴Rubtsovsk Industrial Institute (branch) of the Altai State Technical University
named after I.I. Polzunov,
2/6, Traktornaya Street, Rubtsovsk, 658207, e-mail: sergeyvoinash@yandex.ru

This article proposes a method for long-term forecasting of technical systems development based on a systems analysis of a key internal contradiction. The refrigeration compressor system is chosen as the object of study. The method is based on identifying and tracking the development of the fundamental contradiction between two mutually exclusive requirements of the supersystem – ensuring productivity (quantitative) and creating pressure (qualitative). The evolution of compressors is traced, from piston to rotary, screw, centrifugal, and axial, identifying the main driving force behind their development – increased productivity, achieved primarily by increasing the rotational speed of the working parts. The analysis revealed that the mechanical principle of compression (volumetric and dynamic) is close to exhausting its capabilities, running up against physical and design limitations. A transition to fundamentally different, non-mechanical compression methods, such as magnetohydrodynamic and thermoelectric cooling, is justified as a promising direction following axial compressors. This corresponds to the general trend of working fluid transition from the macro- to the micro-level. It is concluded that forecasting based on the analysis of the key contradiction and supra-system requirements allows us to identify key development paths and create reliable long-term forecasts.

Keywords: systems approach, long-term forecasting, technical system, refrigeration compressor, key contradiction, laws of technical system evolution, supra-system requirements, performance, compression principle, piston compressor, screw compressor, centrifugal compressor, axial compressor, magnetohydrodynamic method, thermoelectric cooling, technological evolution.

Поступила в редакцию/received: 24.02.2026; после рецензирования/revised: 26.02.2026;
принята/accepted: 02.03.2026

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 2 (30), 2026**

Online ISSN 2687-0029

Редактор М.Б. Юдина
Корректор Ю.Ф. Воробьева

Дата выхода в свет 04.05.2026

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
Адрес издателя: 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22