

На правах рукописи

ВИНОГРАДОВА
Анна Александровна



**МЕТОД КОНТРОЛЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ
МОДИФИКАТОРЫ ПРИСАДОК МЕТАЛЛА, С УЧЕТОМ
НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Сырков Андрей Гордианович

Официальные оппоненты:

Гоголинский Кирилл Валерьевич

доктор технических наук, федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева», директор

Коротеев Михаил Юрьевич

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Константа», генеральный директор

Ведущая организация -

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Защита диссертации состоится 30 июня 2017 г. в 12 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.07 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. № 1171А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан «28» апреля 2017 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Создание новых подходов к диагностике и усовершенствование надежности и информативности существующих методов неразрушающего контроля систем, содержащих низкоразмерные материалы, является актуальной задачей, которая имеет как практическое, так и теоретическое значение. В настоящее время отмечается дефицит в разработке автоматизированных комплексов контроля металлосодержащих материалов на основе анализа их адсорбционных, адгезионных и трибохимических характеристик с соответствующим приборным и программным обеспечением. Нахождение решения обозначенных задач является важным не только с точки зрения импортозамещения. Оно представляет интерес для модернизации ряда высокотехнологичных секторов экономики (электроника, медицина и др.), в том числе, используемых в них триботехнических устройств и материалов, которые имеют также значение для развития минерально-сырьевого комплекса. В последние годы показано, что эффективным методом улучшения антифрикционных и противокоррозийных свойств металлов является нанесение на их поверхность четвертичных соединений аммония (ЧСА). При этом методы контроля подобных материалов и трибосистем на их основе развиты недостаточно.

В данной области исследований работали многие авторы: Ю.С. Заславский, Д.В. Федоров, В.С. Потапенко, И.В. Крагельский, В.В. Шаповалов, М. Лернер, Д. Мерсон, Ф. Боуден, Д. Тейбор, М. Урбах и др. Но имеющиеся методы оценки характеристик смазочных материалов на стандартных трибологических стендах нередко не дают гарантии качества смазок при их промышленном использовании в условиях конкретных производств.

Перспективным для дальнейшей разработки является подход, базирующийся на предварительном отборе эффективных присадок к промышленным смазкам, основанный на более простых измерениях адсорбционно-химических свойств присадок и оригинальном математическом описании (моделировании). Суть этого описания сводится к аппроксимации любого трибологического параметра (интегрального показателя трения, силы трения и др.) в виде суперпозиции линейной и нелинейной функции. В работе в качестве присадок выбраны порошки трех металлов: меди, алюминия, никеля, нашедших большое применение в микрорадиоэлектронике, в процессе пайки материалов, при производстве антикоррозионных, термостойких

покрытий. Есть данные, что при добавлении порошка меди или алюминия, поверхностно-модифицированного по специальной программе, происходит улучшение антифрикционных свойств смазочных систем.

Диссертационное исследование выполнено в рамках тематического плана фундаментальных исследований по государственному заданию Минобрнауки РФ, проект №8635 «Научно-методическое сопровождение деятельности и информационное обеспечение специализированной лаборатории нанотехнологий» и по госконтракту № 14.577.21.0127 по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы».

Целью диссертационной работы является разработка метода неразрушающего контроля и улучшения антифрикционных характеристик трибосистем на основе оценки вклада нелинейных эффектов во взаимосвязи свойств металлосодержащих смазочных материалов.

Для реализации данной цели поставлены следующие задачи исследования:

1. Проанализировать соотношение нелинейной и линейной компоненты в зависимости интегрального показателя трения D трибосистемы со смазкой с металлом-присадкой (Cu , Al , Ni), модифицированной в поверхностном слое, от адсорбционно-химических характеристик присадки.

2. Разработать метод контроля антифрикционных характеристик металлосодержащей смазки, подходящий для различных режимов трения.

3. Разработать программный комплекс для машины трения в виде подшипника скольжения с тензодатчиком в среде *Lab View*.

Идея работы заключается в том, чтобы использовать для контроля трибологических характеристик антифрикционных материалов и отбора эффективных присадок к смазке в виде поверхностно-модифицированных металлов более точные и простые измерения адсорбционно-химических свойств присадки, а также – аппроксимацию зависимости интегрального показателя трения трибосистемы от этих свойств в форме суперпозиции линейной функции и нелинейной компоненты с применением функции Гаусса.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Сформулированы закономерности взаимосвязи нелинейных эффектов и высоких антифрикционных свойств трибосистем с жидкой

смазкой с поверхностно-модифицированными металлическими присадками.

2. Предложен и обоснован метод ускоренного контроля антифрикционных характеристик жидкой смазки с дисперсными присадками модифицированных металлов, позволяющий отбирать наиболее эффективные присадки к смазке.

3. В рамках предложенного метода разработан программный комплекс в среде *Lab View*.

Научно-практическая значимость работы заключается в том, что разработанный метод контроля на основе оценки вклада нелинейности свойств триботехнических материалов позволяет выбирать необходимые режимы модифицирования присадок для диагностики, прогнозирования и формирования высоких антифрикционных эффектов в трибосистеме. Это приведет к улучшению стабильности присадок в смазке, увеличению срока службы трансмиссии, использованию более экологически безопасных присадок к смазкам и выработке надежных методов контроля узлов трения. Рассматриваемые в качестве присадок металлы (*Al*, *Cu*, *Ni*) нашли разнообразное применение в промышленности, в том числе в виде добавок, улучшающих свойства различных систем. Порошки названных металлов необходимы для формирования изделий в технологии микрорадиоэлектроники и в процессе пайки. Изучение применения и диагностики препаратов российского производства (триамона и алкамона) в качестве модификаторов свойств поверхности металлов имеет реальную значимость для промышленности благодаря возможности замены зарубежных разработок на предложенные методы прогнозирования и контроля свойств, а также на отечественные антифрикционные и высокогидрофобные материалы.

Методы, программы и методология исследования.

Получение поверхностно-модифицированных присадок проводили методом наслаивания разноразмерных молекул аммониевых соединений (разработан в ЦНТ СПГУ, патент № 2425910), также применялись: метод акустической эмиссии, гравиметрический метод контроля свойств, программные пакеты *Math Cad*, *Lab View*. Характеризацию и контроль состава и строения дисперсных присадок проводили методами РФЭ-, EDX-спектроскопии, ЭМ, рентгенофлуоресцентного анализа, методом БЭТ (удельная поверхность) в ЦКП СПГУ, СПбГИ (ТУ) и университете г. Лейпцига (Германия).

Степень достоверности выдвинутых научных положений, сделанных выводов, представленных в диссертационной работе,

основывается на апробированных методах исследований, определяется согласованностью результатов промышленных, лабораторных и теоретических исследований.

Соответствие диссертации паспорту специальности.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, согласно:

п. 1. Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

п. 3. Разработка, внедрение и испытания средств и систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по сравнению с прототипами.

п. 6. Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в средствах контроля, автоматизация приборов контроля.

п. 7. Методы повышения информационной и метрологической надежности средств контроля в процессе эксплуатации.

Апробация работы.

Результаты исследований были представлены и обсуждались на следующих конференциях: XXIII Международном научном симпозиуме «Неделя горняка-2015» (Москва, Горный институт НИТУ «МИСиС», 26-30 января 2015 г.); XX Международной юбилейной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, Томский политехнический университет, 14-18 апреля 2014 г.); Научной конференции, посвященной 186-й годовщине образования СПбГТИ (ТУ) (2-3 декабря 2014 г.); семинаре «Контроль качества сталей, сплавов, руд и других металлов с использованием современных методов анализа», (СПб, ООО «Мелитэк», 13-15 мая 2015 г.), на Международном семинаре-симпозиуме «Нанозифика и Наноматериалы» (СПб, 16-17 ноября 2016 г.) с публикацией в зарубежном научном журнале [*Smart Nanocomposites. V. 7, N2* (2016)]. Получено свидетельство №2017612194 на разработанный программный пакет – «Программный комплекс для контроля антифрикционных характеристик трибосистем на машине трения» - о государственной регистрации программы для ЭВМ в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Роспатент).

Реализация результатов работы. Метод ускоренного контроля

антифрикционных характеристик жидкой смазки с дисперсными присадками поверхностно-модифицированных металлов использован в ООО «МК Констракшн» (Москва). Разработанный метод применен для автоматизации отбора наиболее эффективных присадок к смазочному индустриальному маслу и увеличения ресурса работы трансмиссии, что подтверждено актом о внедрении с экономическим эффектом.

Личный вклад автора заключается в участии в разработке программного комплекса в среде *Lab View* для машины трения, опытах по синтезу присадок, проведении трибологических испытаний, интерпретации и математической обработке полученных результатов. С помощью предложенного программного обеспечения построен и интерпретирован график взаимосвязи интегрального показателя трения D для смазки, наполненной поверхностно-модифицированными порошками на основе никеля (ПНК) и нормированной переменной вида $a/(amax-amin)$. Проведен анализ стабильности и величины вклада линейной компоненты в зависимости интегрального показателя трения D от водоотталкивающих свойств присадок; лично на машине трения ДМ-29М подтверждена эффективность использования разработанной программы.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 7 научных работ, из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах (3 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ), 2 доклада в сборниках трудов международной и вузовской конференций, 1 свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2017612194.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, выводов, списка использованной литературы из 96 наименований и 12 приложений. Работа изложена на 108 страницах, содержит 19 рисунков и 8 таблиц.

В первой главе помещен обзор литературы, где анализируются известные методы контроля и наноструктурного регулирования свойств триботехнических материалов, в частности методы контроля и приборы для измерения антифрикционных свойств в трибологических парах. Кратко рассматривается история развития методов контроля в триботехнике. Обсуждаются физические и химические методы получения нанопокрытий и защитных покрытий в триботехнике.

Во второй главе описаны использованные в работе объекты и методы исследования.

В третьей главе анализируется количественная оценка вклада нелинейных эффектов в зависимостях свойств наноструктурированных смазок на основе масла И-20.

В четвертой главе рассматривается разработанный метод с предложенным программным обеспечением.

В приложениях к диссертации помещены копия свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программный комплекс для контроля антифрикционных характеристик трибосистем на машине трения», копия Акта о внедрении, скриншот разработанной программы, примеры математической обработки результатов, данные РФЭС, СЭМ, АСМ.

По результатам проведенных исследований на защиту выносятся следующие научные положения:

1. Антифрикционные свойства материалов на основе индустриального масла с поверхностно-модифицированным металлом (*Cu, Al, Ni*) при прочих равных условиях нелинейно зависят от водоотталкивающих свойств (в.с.) и скорости окисления (с.о.) присадки; наилучшие антифрикционные свойства для серии смазок с присадками на основе одного металла (*Cu, Al*), как правило, отвечают образцам с максимальным соотношением нелинейной и линейной компоненты в зависимостях $D=f(\text{в.с.})$ и $D=F(\text{с.о.})$, где D – интегральный показатель трения в трибосистеме. Это позволяет предложить упрощенные методики контроля и отбора присадок к смазке на основе измерения адсорбционно-химических характеристик этих присадок и математического описания достигаемых трибологических параметров.

Для контроля свойств и отбора смазок с присадками в мировой практике идут по следующему пути: лабораторные испытания, стендовые испытания; эксплуатационные (квалификационные) испытания. Особенность гостовских испытаний на четырехшариковой машине (ГОСТ 9490-75) и на различных машинах трения (2070 СМТ-1, ДМ-29М и др.) состоит в том, что на них реализуются невысокие нагрузки (500-800 Н) и давления (1-5 МПа типично, много реже – до 17 МПа (на ДМ-29М)). Такие давления (P) часто не соответствуют экстремальным условиям эксплуатации смазок в промышленности, а также не позволяют проявиться в полной мере антифрикционному эффекту и полезным свойствам специальных присадок [Компетентность. №7/138. 12 (2016)]. Потому для получения опорных точек зависимости трибологического параметра от свойств присадки в качестве базового метода был выбран акустико-эмиссионный метод (P – до 50-60 МПа), где с помощью сертифицированного прибора АРП-11 измеряется интегральный показатель трения D , пропорциональный силе трения в трибосистеме. Трибосистема представляла собой пару трения сталь-сталь (сверло-пластина) со смазочным маслом И-20, куда в небольших концентрациях (0,5-1,0 масс.%) вводили порошки металлов. Гидрофобные свойства и стойкость к окислению на воздухе, важные для

усвоения присадки в смазке, стабильности и антифрикционного эффекта, регулировали, обрабатывая исходный металл триамоном (Т), алкамоном (А) – препаратами на основе ЧСА – по различной программе модифицирования [*Smart Nanocomposites*. №1. 66 (2012)].

После математической обработки результатов опытов были предложены уравнения вида $D = F(c.o.)$ (таблица 1), описывающие зависимость между интегральным показателем трения и скоростью окисления металла (с.о.). Измерение с.о. проводилось по относительному приросту массы поверхностно-модифицированного металла при окислении на воздухе. Рассматривались трибосистемы с тремя различными присадками на основе меди, алюминия и никеля, концентрацией не более 1 масс. %.

Таблица 1 - Уравнения зависимости интегрального показателя трения от скорости окисления присадки [Конденсированные среды и межфазные границы. №2. 203 (2013)]

№ п/п	Металл-основа присадки	Уравнение
(1)	Медь	$D(c.o.) = 2167 - 885x + 2.48 \cdot 10^{17} \cdot (x - 0,218)^6 \cdot \exp(551(x - 0,218))$
(2)	Алюминий	$D(c.o.) = 572 - 8,75x + 1013 \cdot (x - 38,2) \cdot \exp(-0,319(x - 38,2)^2)$
(3)	Никель	$D(c.o.) = 1684 - 8009x + 1438 \exp(-243049(x - 0,169)^2)$

Приведенные уравнения имеют в своем составе функцию на основе экспоненты, что позволяет повысить точность аппроксимации значений D для трибосистем, содержащих медь и алюминий, по сравнению с ранее использовавшимися уравнениями (Назарова Е.А., 2012). Относительная погрешность аппроксимации была снижена до уровня 3 % (подтверждается данными для *Si*-присадок ниже).

Сложные зависимости $D = F(c.o.)$ для трех разных металлов свели к общему уравнению вида: $D = A + Bx + C(x - x_0)^n e^{\beta(x - x_0)^i}$, где $x = c.o.$; x_0 – значение с.о. для экстремума D ; величины A, B, C, n, β, i представляют собой характеристические для каждого вида металла безразмерные константы. Значения безразмерных констант из уравнений (1) - (3) приведены в таблице 2. Благодаря тому, что слагаемое, имеющее в своем составе экспоненту, в принципе является индикатором нелинейных эффектов зависимости $D = F(c.o.)$, есть возможность при любом значении скорости окисления в изученном интервале производить в реальном времени оценку отношения двух компонент (линейной и нелинейной) для зависимости интегрального показателя трения от скорости окисления. Зависимость описывается суперпозицией линейной функции и функции Гаусса. Это позволяет разделить линейную (L) и

нелинейную (N) компоненту зависимости и количественно оценить вклад нелинейных эффектов. Линейная компонента L представляет собой сумму A и Bx , где B показывает скорость изменения D , увеличение которой (по модулю) происходит в ряду $Al-Cu-Ni$ (таблица 2).

Таблица 2 - Значения безразмерных параметров (A, B, C, n, β, i) для уравнений $D = F(c.o.)$ в зависимости от вида металла

Параметр Металл	A	B	C	n	β	i
Cu	2167	-885,00	$2,481 \cdot 10^{17}$	6	551	1
Al	572	8,75	1013	1	-0,319	2
Ni	1684	-8009,00	1438	0	-243049	2

Установлено, что для металлов-присадок на основе Cu и Ni , наиболее сильно проявляющих нелинейные свойства, характерны достаточно высокие коэффициенты C ; в случае меди аномально большое значение коэффициента C подтверждает необычные нелинейные свойства этого металла в составе органических смазок, известные со времен открытия «эффекта безызносности» Крагельского - Гаркунова.

В таблицах 3-5 представлен анализ N и L – компонент зависимостей для медных, алюминиевых и никелевых образцов с использованием уравнений (1) - (3).

Таблица 3 - Соотношение нелинейной (N) и линейной (L) компоненты при описании свойства (D) трибосистемы в зависимости от программы модифицирования поверхности металла-присадки ($M=Cu$)

Вид порошка-присадки	D (эсп)	D (расч)	с.о.	Линейная компонента $L=A+Bx$	Нелинейная компонента $ N $	Нелинейная компонента $ N_p $	$ ND $ (эсп), отн. ед.	$ N_p D $ (расч), отн. ед.	N/L , %
* $Cu/ГКЖ$	580	568	0,180	2008	1428	1440	2,46	2,53	71
Cu/A	1300	1353	0,207	1984	684	631	0,53	0,46	35
Cu/T	1100	1075	0,210	1981	881	906	0,80	0,84	45
$Cu/T/A$	270	282	0,220	1972	1702	1690	6,30	5,99	86
$Cu(A+T)$	1480	1451	0,221	1971	491	520	0,33	0,36	25

*Присадка получена модифицированием исходного порошка меди ПМ1 в парах гидрофобизирующей кремнийорганической жидкости ГКЖ-94 – промышленного гидрофобизатора

Самая большая и стабильная линейная компонента соответствует медным образцам (таблица 3). Вклад нелинейной компоненты максимален у смазки с образцом $Cu/T/A$ (с последовательной обработкой триамоном и алкамоном). У этого же образца отмечен минимальный

интегральный показатель трения $D=270$ (по представленным данным в таблице 3). Таким образом, максимально нелинейным свойствам образца смазки с $Cu/T/A$ соответствует минимальное значение силы трения и максимальный антифрикционный эффект в трибосистеме.

Таблица 4 - Соотношение нелинейной (N) и линейной (L) компоненты при описании свойства (D) трибосистемы в зависимости от программы модифицирования поверхности металла-присадки ($M=Al$)

Вид порошка-присадки	D (эксп)	с.о.,%	Линейная компонента $L=A+Bx$	Нелинейная компонента $ N $	$ N/D$ (эксп), отн. ед.
Al/T	780	32,1	853	73	0,09
Al/A	910	34,4	873	37	0,04
$Al/(A+T)$	300	36,2	889	589	1,96
Al	1690	39,4	917	773	0,46
$Al/T/A$	1000	50,3	1012	12	0,01

Модифицирование Ni -присадки не дает антифрикционного эффекта (аномально высокий и отрицательный параметр β в уравнении $D=D(с.о.)$). Причина – структурные особенности адсорбции A и T на поверхности исходного карбонильного никеля (ПНК) [*Adv. Mater. Res. V. 1040. 103 (2014)*].

Таблица 5 - Соотношение нелинейной (N) и линейной (L) компоненты при описании свойства (D) трибосистемы в зависимости от программы модифицирования поверхности металла-присадки ($M=Ni$)

Вид порошка-присадки	D (эксп)	с.о.	Линейная компонента $L=A+Bx$	Нелинейная компонента $ N $	$ N/D$ (эксп), отн. ед.
$Ni/ГКЖ$	500	0,142	547	47	0,09
$Ni/(A+T)$	280	0,166	355	75	0,27
Ni/A	610	0,166	355	255	0,42
Ni/T	1700 (сухое трение)	0,169	330	1370	0,80
Ni	280	0,172	306	26	0,09

Из анализа таблицы 4 следует, что для алюминиевых образцов также характерно проявление наименьшего показателя D в трибосистеме у присадки с наибольшими нелинейными свойствами, а именно - $Al/(A+T)$. Аналогичные по смыслу результаты были получены при анализе зависимостей D от водоотталкивающих свойств (в.с.) присадки на основе меди или алюминия. Значения D для смазок с

модифицированными *Si*-порошками уменьшаются (трение падает) по мере повышения величины водоотталкивающих свойств (гидрофобности ($1/a$)) присадки (таблица 6). Данные рисунка 1 подтверждают, что для систем с *Al*-присадками D падает по мере роста отношения $|N/L|$.

Таким образом, установлено, что при прочих равных условиях, для трибосистем с *Si*- и *Al*-присадками максимальное соотношение нелинейной и линейной компоненты в зависимостях $D=F(c.o.)$ и $D=D(v.c.)$ дает наилучшие антифрикционные свойства. Достигнуто хорошее совпадение результатов расчета D с данными измерения D акустико-эмиссионным методом при аппроксимации опытных данных уравнением вида $D=L(x)+N(x)$, где x -скорость окисления присадки при повышенных температурах или адсорбционная характеристика присадки ($1/a$ или a) – см. таблицы 3, 6, 7.

Относительная погрешность аппроксимации, как правило, находится на уровне 3-5 % и не превышает погрешность измерения D акустико-эмиссионным методом. Эта аппроксимация может быть положена в основу методики предварительного контроля и отбора присадок для достижения максимального антифрикционного эффекта в смазке [ГИАБ. №2. 86 (2016)]. При этом для корректного отбора присадок по адсорбционно-химическим характеристикам, измеренным в лаборатории, важно, чтобы условия их последующих трибологических испытаний и промышленной эксплуатации не изменяли существенно концентрацию и дисперсность присадки, величину механической нагрузки, тип трибологической пары и температуру использования смазки.

Зная формулу зависимости $D=D(x)$ (коэффициента трения от x), можно по известной величине гидрофобности присадки ($1/a$) рассчитать ожидаемое значение $D(fp)$. Продуктивность такого подхода подтверждается не только результатами тестов на стендах, но и промышленными испытаниями (таблица 7). Это объясняется тем, что в.с. и с.о. являются параметрами, определяющими, в конечном счете, надежность и эффективность смазочных материалов при высоких нагрузочных давлениях и длительных сроках эксплуатации. Обратим внимание, что оценка водоотталкивающих свойств по величине адсорбции паров воды (a) на присадке эксикаторным методом и гравиметрическое определение скорости высокотемпературного окисления являются относительно простыми и весьма точными. Эффективность такого метода контроля, основополагающей процедурой которого является определение массы (с точностью $\pm 0,0005$ г) на аналитических весах, также иллюстрируют данные таблицы 7.

Таблица 6 - Соотношение нелинейной (N) и линейной (L) компоненты в зависимости $D=\Phi(x)^*$ для Cu -содержащих трибосистем (средняя удельная поверхность присадки $0,34\pm 0,02 \text{ м}^2/\text{г}$), где $x=1/a$, где a - адсорбция воды (г/г) на присадке

Вид порошка-присадки	D (эксп)	D (расч)	a	$1/a$	Линейная компонента $L=A+Bx$	Нелинейная компонента $ Np $	$N/L, \%$
Cu/A	580	574	0,0205	48,78	574	$2 \cdot 10^{-90}$	≈ 0
Cu/A	1300	1360	0,0299	33,44	1360	$1 \cdot 10^{-19}$	≈ 0
Cu/T	1100	1102	0,0268	37,31	1162	59	5,0
$Cu/T/A$	270	269	0,0260	38,46	1103	833	75,5
Cu	-	1923	0,0445	22,47	1923	$6 \cdot 10^{-220}$	≈ 0
$Cu/(A+T)$	1480	1421	0,0310	32,25	1421	$3 \cdot 10^{-31}$	≈ 0

* $D_{расч}$ определяли по формуле:

$$D_x = A + Bx + N(x) = 3075,51 - 51,255x - 833,84e^{-2(x-38,462)^2}$$

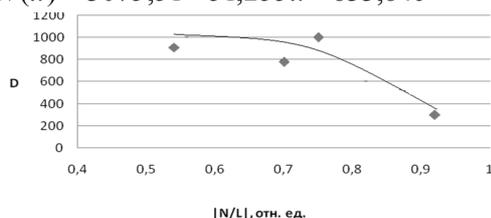


Рисунок 1 - График зависимости D от $|N/L|$ для Al -содержащих трибосистем

$|N/L|$ рассчитывали из уравнений $D= D(a) = -4382exp(-324(x-0,023)^2)+155400x^2-2222$ и $D= D(1/a) = 4,5x+655exp(-0,03(x-435)^2)$

Таблица 7 - Сопоставление адекватности математического описания (D_p и f_p) результатам измерений ($D_{эксп}$ и $f_{эксп}$) сертифицированными средствами контроля (АПИ-11, ДМ29М) и данным испытаний смазок на производстве (МК Констракшн, НК «Лукойл»)

Образец присадки (смазки)	$1/a$	$D_{эксп}$	$D_p=D(a)$	$D_p=D(1/a)$	$f_{эксп}$	$f_p=f(1/a)$	*Ресурс работы на производстве, ч
$Al/T/T$	570	≈ 800	810	805	0,0086	$\approx 0,0085$	-
$Al/A/T$	450	≈ 960	950	956	0,0085	$\approx 0,0089$	3600
$Al/(A+T)$	770	300	280	290	0,0075	0,0074	Более 5100
$Ni/T/A$	47	≈ 1080	1070	1080	-	-	-
Масло И-20	-	1500	-	-	0,0089	-	3500
ИГТ-18-масло со спецприсадками	-	-	-	-	-	-	5200

^v Значения D были измерены после из прогнозной оценки (D_p)

^x Расчетные значения коэффициента трения f_p были найдены после его измерений на ДМ29М

* [ГИАБ. №2. 86 (2016)]

2. Метод ускоренного контроля антифрикционных характеристик жидкой смазки с твердыми присадками в диапазоне нагрузочных давлений от 1,7 до 50 МПа, реализующий различные режимы трения, который заключается в последовательном применении машины трения в виде подшипника скольжения с тензодатчиком, программным комплексом, и акустико-эмиссионной диагностики.

Как следует из предыдущего материала, уменьшение трения происходит, как правило, в системах с наибольшей нелинейностью. Поэтому, рассчитав величины N или N/L , возможно контролировать и прогнозировать антифрикционные свойства системы, а, значит, и качество смазки [Записки Горного института. Т. 216. 122. (2015)]. Для внедрения такого инновационного подхода в инженерную практику важно ускорить процедуры расчета и построения графиков путем автоматизации проводимых измерений.

Достоинство метода акустико-эмиссионной диагностики – возможность тестировать смазки при высоких давлениях (10-60 МПа), позволяющих контролировать работу трибосистемы в режимах граничного и «сухого» трения. Это важно, поскольку названные режимы трения часто реализуются на производстве. Анализатор акустико-эмиссионного сигнала АРП-11, по утверждению разработчиков прибора, регистрирует энергетическую характеристику D – интегральный показатель трения (акустической эмиссии). Для того, чтобы контролировать силовые характеристики трения предпочтительней машина трения, позволяющая работать в режиме жидкого трения и переходных режимах.

Выбранная стандартная машина трения ДМ-29М имеет пару трения - сталь-бронза. Часовые индикаторы, входящие в измерительное устройство, показывают смещение плеча, идущего от подшипника скольжения, относительно точки отсчета, которая фиксируется с помощью верхнего индикатора 6 на рисунке 2. Нижний индикатор (не изображен на рисунке 2) показывает прогиб пружины, и с помощью тарировочного графика производится пересчет в силу трения ($F_{тр}$). Далее рассчитывается $F_{тр}$ в узле трения. Погрешность измерений относительно невелика, но требуется дополнительная обработка данных с часовых индикаторов для получения интересующих величин: силы и коэффициента трения f , построения графиков их изменения относительно изменения нагрузочного давления, характеристик присадки. Кроме того, затруднена возможность оперативного прогнозирования.

Мы предлагаем метод ускорения снятия показаний и контроля

изменения $F_{тр}$ и f на данной машине трения. Для этого вместо нижнего часового индикатора используем специальный тензодатчик (рисунки 2, 3) через блок *NI USB-6009*, подключенный к компьютеру через *USB* интерфейс. Для регистрации, обработки и визуализации измеряемых получаемых данных создан специальный программный комплекс на базе современной многофункциональной среды разработки компании *National Instruments* (США) *Lab View*. Текущая версия программы обеспечивает выполнение следующих функций: юстировка начальных параметров; постоянный контроль антифрикционных свойств (сила и коэффициент трения системы) в онлайн режиме; режим снятия показаний; запись результатов образцов в таблицу, с одновременным построением графиков; поддерживает сохранение данных в программу *Excel*; производить взаимобратный пересчет f и $1/a$.

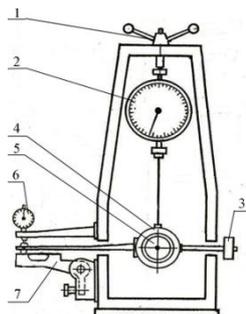


Рисунок 2 - Схема установки ДМ-29М (1 – винт нагружения; 2 – динамометр; 3 – груз балансирный; 4 – подшипник; 5 – вал; 6 – индикатор часового типа (микрометр), 7 – тензодатчик)

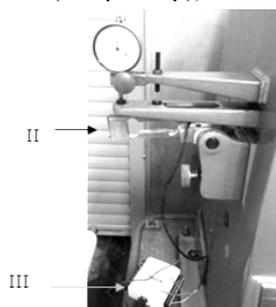


Рисунок 3 - Фрагмент машины трения ДМ-29М с присоединенным тензодатчиком (II) и платой сбора данных (III)

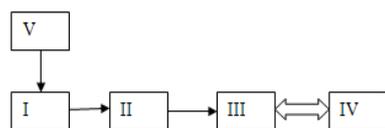


Рисунок 4 - Обобщенная функциональная схема программного комплекса контроля антифрикционных характеристик трибосистем на машине трения
(I) (I - объект исследования, II - тензодатчик, III - плата сбора данных, IV - ПК, V - внешнее воздействие)

На рисунке 4 приведена обобщенная функциональная схема программного комплекса контроля антифрикционных характеристик трибосистем на машине трения. Интерфейс программы представляет собой группы элементов индикации и управления. Эта программа позволяет в упрощенном режиме снимать показания во всем диапазоне давлений в 3-5 быстрее, чем при использовании обычных часовых индикаторов; сразу, в реальном времени получать значения силы и коэффициента трения.

Программа имеет 3 режима работы: калибровка (настройка), снятие показаний и расчет. При включении программы в окне, расположенном в правом верхнем углу, отображаются актуальные дата и время.

В первом режиме («Калибровка») происходит зануление значений тензодатчика, это нужно для настройки начального положения датчика и уменьшения погрешности измерений. При данной настройке программа дублирует значение часового индикатора, для правильной настройки по предыдущим данным $F_{тр}$ и f . После завершения настройки, необходимо перейти в режим снятия показаний (основная работа программы). Данные из первого режима по настройке и обнулению тензодатчика автоматически переносятся напрямую в основную программу. Далее, после включения режима снятия измерений, требуется только изменять величину нагрузочного давления на самой установке, остальные показания программа будет считывать сама, необходимо только нажимать кнопку записи значения в таблицу с соответствующим значением нагрузки N . Значения $F_{тр}$ и f сразу же записываются в таблицу в зависимости от нагрузочного давления и производится построение графика $F_{тр}$ от N [Компетентность. №9-10. 203 (2016)].

В третьем режиме работы программа позволяет производить взаимнообратный расчет показателя D и величины адсорбции воды на присадке (таблица 7), коэффициента трения f и величины водоотталкивающих свойств (гидрофобности) $1/a$ (рисунок 6). Так

зависимость между f и $1/a$, отражающей гидрофобные свойства поверхности металла-присадки, для Al-содержащих трибосистем, по Сыркову и Назаровой, описывается уравнением вида:

$$f = 0,011 - 4,7 \cdot 10^{-6} \cdot x + 1,931 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-0,02 \cdot (x - 435)^2) \quad (4)$$

Обратная зависимость, где $1/a = y$, $f = x$, имеет вид:

$$y(x) = -17380 + 954000 \cdot x + 82,531 \cdot x^{-1} + 151,516 \cdot \exp(-8480000 \cdot (x - 0,0087)^2) \quad (5)$$

Погрешность: $\varepsilon = 4\%$

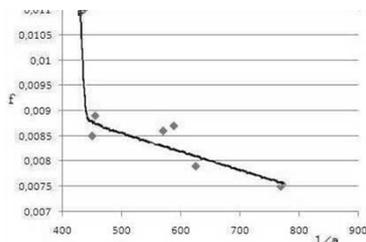


Рисунок 6 - Зависимость коэффициента трения от гидрофобности присадки

Эти расчеты позволяют объединить использование двух разных установок – с АРП11 и ДМ-29М в одной программе. В частности, благодаря знанию хотя бы одной величины f или $1/a$ мы можем спрогнозировать вторую (рисунок 7). Это дает возможность заранее оценить поведение и эффективность выбранной нами присадки и ее программы модификации при различных нагрузках, необходимость и целесообразность проведения испытания на стендах и, в случае плохих показателей, сэкономить время, трудовые и денежные затраты.

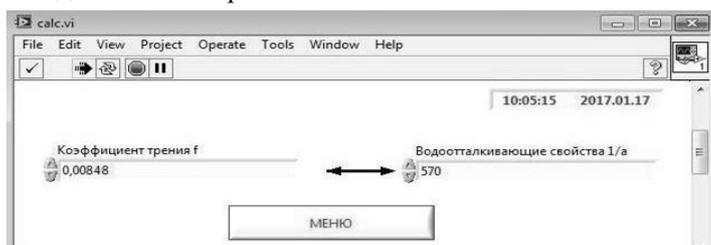


Рисунок 7 - Вид диалогового окна *calc.vi* с примером расчета коэффициента трения по водоотталкивающим свойствам

Фрагмент схемы алгоритма работы программного пакета приведен на рис. 8.

Программа позволяет, чтобы в ней автоматически производился расчет зависимости для $F_{тр}$ от нагрузки [Компетентность. №7. 12 (2016)]

или вклада нелинейных эффектов (N/L , где N – нелинейная компонента, L – линейная компонента в каждой точке зависимости), присущих наноструктурированным системам металл-смазка (см. таблицу 7).

Таблица 8 - Время проведения измерений (контроля) с использованием программного комплекса и без него

Снятие и обработка результатов 10 измерений и их обработка	Время, мин	
	без <i>Lab View</i>	с <i>Lab View</i>
Исследователь 1	15-20	2-3
Исследователь 2	14-19	3-4
Исследователь 3	16-21	4-5

Поскольку полученные данные таблицы и график для дальнейшей обработки и удобства хранения могут быть экспортированы в приложение *MS Excel*, то обработка данных происходит в разы быстрее (таблица 8) и сводится к минимуму случайное искажение результатов при перенесении из одной рабочей программы в другую. Это позволяет оперативно оценивать получаемую информацию, что в значительной мере определяет эффективность обеспечения промышленной безопасности [Компетентность. №9-10. 203 (2016)].

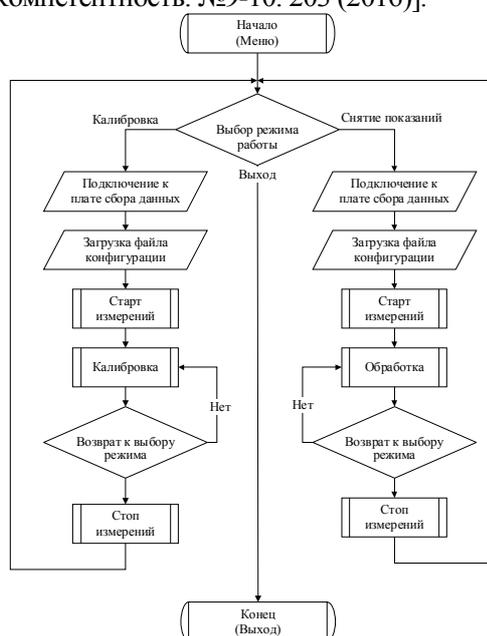


Рисунок 8 - Фрагмент схемы алгоритма работы программного продукта

Данный программный комплекс можно использовать не только для неразрушающего контроля с применением машины трения ДМ-29М, но и для других трибомашин с проведением необходимой калибровки, что делает его полезным и удобным как для лабораторных работ, так и при промышленном использовании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной научно-технической задачи по созданию метода неразрушающего контроля трибосистем со смазкой, содержащей низкоразмерные модификаторы присадок металла.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлено, что лучшие антифрикционные свойства показывают системы с добавкой в индустриальное масло модифицированных меди и алюминия с наибольшим отношением N/L в зависимостях интегрального показателя трения от водоотталкивающих свойств и скорости окисления присадки-наполнителя. На этой основе с использованием оригинального математического описания с привлечением функции Гаусса предложены упрощенные методики контроля и отбора присадок к смазке.

2. Разработанный метод контроля антифрикционных свойств трибосистемы в разы сокращает время проведения измерений, обработки данных, охватывает достаточно большой диапазон нагрузочных давлений, дает возможность прогнозирования поведения трибосистем со смазкой, содержащей дисперсные присадки с низкоразмерными модификаторами в поверхностном слое.

3. Созданный программный комплекс для реализации процедур контроля позволил сформировать базу экспериментальных значений силы и коэффициента трения при различных нагрузочных давлениях для системы металл-смазка, а также результатов их обработки, в том числе данных о вкладе линейной и нелинейной компонент в зависимости антифрикционных характеристик от адсорбционно-химических свойств присадки, для проведения статистического анализа свойств трибосистем, показывающего их эффективность.

4. Разработанный метод ускоренного контроля антифрикционных характеристик жидкой смазки с дисперсными присадками поверхностно-модифицированных металлов внедрен в ООО «МК Констракшн» (Москва) и рекомендован для расширенного промышленного использования.

Основные положения диссертации изложены в следующих публикациях:

1 Сырков, А.Г. Применение достижений нанотрибологии и наноструктурной пассивации поверхности для контроля свойств смазки и защиты металлического оборудования горно-химических предприятий / А.Г. Сырков, И.В. Плескунов, А.А. Виноградова // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 2. — С. 86-98.

2 Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2017612194. Программный комплекс для контроля антифрикционных характеристик трибосистем на машине трения / А.В. Бойков, А.Г. Сырков, А.А. Виноградова, М.О. Силиванов // Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16 февраля 2017 г.

3 Виноградова, А. А. Соотношение линейной и нелинейной компоненты в зависимости интегрального показателя трения трибосистемы от реакционной способности металла-наполнителя / А.А. Виноградова, А.Г. Сырков, А.С. Симаков // Конденсированные среды и межфазные границы. — 2013. — Т. 15, № 2. — С. 203-205.

4 Пинжаков, Р.А. Нелинейность свойств трибосистем, содержащих поверхностно-модифицированные наполнители на основе никеля / Р.А. Пинжаков, А.А. Виноградова, А.Г. Сырков // Сборник XX Международной юбилейной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — Томск, 2014. — Т. 3 — С. 321-322.

5 Бойков, А.В. Особенности разработки программного комплекса для контроля антифрикционных характеристик трибосистем / А.В. Бойков, А.А. Виноградова, А.Г. Сырков // Компетентность. — 2016. — № 9-10. — С. 203-205.

6 Виноградова, А.А. Методы контроля триботехнических характеристик и нелинейности свойств смазок: инновации / А.А. Виноградова, А.В. Бойков, А.Г. Сырков. // Компетентность. — 2016. — № 7. — С. 12-16.

7 Виноградова, А.А. Регулирование нелинейности и уровня свойств гетерогенных материалов, содержащих поверхностно-модифицированные алюминий и медь / А.А. Виноградова, М.О. Силиванов, А.Г. Сырков // Материалы научной конференции, посвященной 186-й годовщине образования Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). — СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета), 2014. — С. 37.