

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
№ 1 (29), 2026

Print ISSN 2658-5030
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.ф.-м.н., 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: ПИ № ФС77-74321 от 19 ноября 2018 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>Болотов А.Н., Новикова О.О., Раткевич Е.А.</i> Современные исследования магнитных смазочных материалов	5
<i>Власов А.М., Казаков Ю.Б.</i> Регулируемая по удерживаемому перепаду давлений, потерям трения, частоте вращения и тепловому режиму магнитожидкостная герметизация вала электродвигателя.....	15
<i>Галиханов М.Ф., Мочалова Е.Н., Мусаев Т.Т.</i> Повышение механических и трибологических характеристик эпоксидных покрытий с введением графитового наполнителя и отверждением в постоянном электрическом поле	26
<i>Новикова О.О., Новиков В.В., Болотов А.Н.</i> Анализ фрикционных свойств алмазосодержащей керамики и определение ее области применения	34
<i>Измайлов В.В., Гусев А.Ф., Новоселова М.В.</i> О регрессионных зависимостях, используемых для описания фрикционного взаимодействия технических поверхностей.....	46
<i>Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В.</i> О фрикционных характеристиках поверхности лазерной наплавки никелевого сплава.....	53
<i>Архаров А.П.</i> Усовершенствование установки вала с конической поверхностью на центрах станка.....	61

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

<i>Андрианова А.А., Яблонев А.Л.</i> Гидравлическое обоснование параметров инкубационной системы, устанавливаемой на отработанных торфяных месторождениях.....	67
<i>Афанасьев А.И., Зубов В.В., Симисинов Д.И., Шестаков В.С.</i> Математическая модель разгона куска горной породы в роторе центробежной дробилки с вертикальной осью вращения.....	77

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

<i>Дзюба С.М., Емельянова И.И.</i> Об одном новом свойстве рекуррентных движений динамических систем на компактных многообразиях	86
<i>Марилов Н.Г., Козырева Л.В., Марилова Е.И.</i> Автоматизация процессов управления риск-менеджментом с применением Telegram-бота.....	93
<i>Смирнов В.А., Орлов В.П.</i> Создание модели привода стабилизации беспилотного летательного аппарата.....	108

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

<i>Bolotov A.N., Novikova O.O., Ratkevich E.A.</i> Modern research on magnetic lubricants....	5
<i>Vlasov A.M., Kazakov Yu.B.</i> Magnetic fluid sealing of an electric motor shaft, adjustable in terms of maintained pressure differential, friction losses, rotation frequency and thermal mode.....	15
<i>Galikhanov M.F., Mochalova E.N., Musaev T.T.</i> Improving the mechanical and tribological characteristics of epoxy coatings with the introduction of graphite filler and curing in a constant electric field.....	26
<i>Novikova O.O., Novikov V.V., Bolotov A.N.</i> Analysis of the friction properties of diamond-containing ceramics and determination of their applications.....	34
<i>Izmailov V.V., Gusev A.F., Novoselova M.V.</i> On the regression relationships used to describe the frictional interaction of engineering surfaces.....	46
<i>Izmailov V.V., Afanasieva L.E., Novoselova M.V.</i> On the frictional characteristics of the laser-deposited nickel alloy surface.....	53
<i>Arkharov A.P.</i> Improvement of the installation of a shaft with a conical surface on the centers of the machine.....	61

SUBSOIL USE AND MINING SCIENCES

<i>Andrianova A.A., Yablonev A.L.</i> Hydraulic justification of the parameters of the incubation system installed at abandoned peat deposits.....	67
<i>Afanasyyev A.I., Zubov V.V., Simisinov D. I., Shestakov V.S.</i> Mathematical model of acceleration of a piece of rock in the rotor of a centrifugal crusher with a vertical axis of rotation.....	77

INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

<i>Dzyuba S.M., Emelyanova I.I.</i> On a new property of recurrent motions of dynamic systems on compact manifolds.....	86
<i>Marilov N.G., Kozyreva L.V., Marilova E.I.</i> Automation of risk management processes using a Telegram-bot.....	93
<i>Smirnov V.A., Orlov V.P.</i> Development of a stabilization actuator model for an unmanned aerial vehicle.....	108

СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

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

© Болотов А.Н., Новикова О.О., Раткевич Е.А., 2026

Статья посвящена исследованию магнитных смазочных материалов (МСМ). Представлен анализ структуры, состава и свойств, включающих дисперсную фазу из ферромагнитных наночастиц и дисперсионную среду (минеральные масла или синтетические жидкости). Рассмотрены особенности влияния магнитного поля на реологию и работоспособность МСМ, а также механизмы формирования противозносных и антифрикционных свойств. Приведен обзор новейших экспериментальных исследований, показавших существенное повышение эффективности МСМ по сравнению с традиционными маслами, а также проанализированы перспективы дальнейшего совершенствования таких материалов путем оптимизации состава и технологии изготовления. Сделан вывод о значительном потенциале МСМ для широкого спектра отраслей промышленности.

Ключевые слова: магнитные смазочные материалы, ферромагнитные наночастицы, дисперсионная среда, реология магнитных смазок, трибология магнитных смазок, магнитожидкостные подшипники.

ВВЕДЕНИЕ

Ученые, инженеры и технологи современных промышленных производств постоянно ищут новые решения для повышения эффективности и долговечности машин и механизмов. Одним из наиболее перспективных направлений являются магнитные смазочные материалы (МСМ), которые сочетают уникальные физические и химические свойства, позволяющие улучшить рабочие характеристики различных устройств [1–7]. Эти материалы представляют собой коллоидные системы, содержащие дисперсионную среду и дисперсную фазу, состоящую из мелких частиц ферромагнитных материалов, таких как железо, никель или кобальт [8–13]. Они обеспечивают эффективное распределение смазки в зонах трения, снижают износ и продлевают срок службы оборудования [2, 4, 8, 9]. Внешнее магнитное поле может существенно изменить реологические свойства МСМ, т. е. поле контролирует реологические свойства смазочного материала, одновременно сохраняя его текучесть [14–18]. При использовании МСМ грузоподъемность системы может быть увеличена за счет повышения вязкости в магнитном поле; смазка может удерживаться в нужных местах, что предотвращает ее утечку и загрязнение; мелкие магнитные частицы могут способствовать снижению износа трущихся поверхностей [19–22]. Эти преимущества

делают МСМ более перспективными, чем традиционные смазочные материалы на масляной основе, во многих сферах применения [23–26]. Однако таким материалам присущи и определенные ограничения, включая высокую стоимость производства и требования к квалифицированному обслуживанию. Несмотря на это, они продолжают привлекать внимание исследователей и инженеров благодаря своим уникальным свойствам. Исследование данной темы основывается на последних научных публикациях и экспериментальных данных, представленных в источниках [3, 4, 8].

Цель исследования: изучить современные исследования физико-химических и трибологических свойств МСМ для определения тенденций их прогрессирующего развития, установления их потенциальных возможностей и ограничения области применения в промышленности.

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Состав и структура. Магнитные смазочные материалы представляет собой сложную трехкомпонентную систему, каждый элемент которой выполняет определенную функцию (табл. 1).

Таблица 1. Структура магнитной жидкости

Компоненты	Содержание, процент от объема	Функция	Примеры материалов
Магнитные наночастицы	3...8	Обеспечение магнитных свойств	Fe_3O_4 (магнетит), $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (маггемит)
Поверхностно-активные вещества (ПАВ)	5...15	Предотвращение агломерации частиц	Олеиновая кислота, полимерные ПАВ
Несущая жидкость	70...90	Основа для суспендирования частиц	Минеральные масла, синтетические жидкости

Дисперсионная среда чаще всего представлена органическими растворителями или синтетическими маслами, обладающими низкой вязкостью и высокой устойчивостью к окислению (табл. 2).

Таблица 2. Характеристики основных типов дисперсионных сред магнитных масел

Тип несущей жидкости	Рабочий диапазон температур, °C	Давление насыщенных паров, Па, при 20 °C	Область применения
Углеводородные масла	–40...+150	$10^{-3} \dots 10^{-1}$	Общие применения
Синтетические эфиры	–60...+200	$10^{-6} \dots 10^{-4}$	Вакуумная техника
Перфторполиэфиры	–80...+300	$10^{-8} \dots 10^{-6}$	Высокий вакуум
Фторуглеродные жидкости	–50...+250	$10^{-4} \dots 10^{-2}$	Химическая стойкость

Дисперсная фаза включает мелкие частицы ферромагнитных материалов, таких как железо, никель или кобальт, покрытые стабилизирующими агентами, предотвращающими агрегирование частиц и обеспечивающими устойчивость коллоида [3]. Размер частиц варьируется от нескольких нанометров до десятков нанометров, что обеспечивает высокую подвижность и равномерное распределение частиц в среде.

Вязкость и текучесть. Одним из ключевых параметров МСМ является вязкость, определяющая их поведение при трении и износе. Вязкость зависит от концентрации дисперсной фазы, размера частиц и типа стабилизирующих агентов. Высокий уровень вязкости способствует образованию толстой защитной пленки на поверхностях трения, однако чрезмерная вязкость может привести к увеличению потерь на трение и снижению эффективности смазки. Оптимальное соотношение вязкости и текучести достигается путем подбора оптимального состава и условий производства [1, 3, 4, 9, 13]. Реологические свойства МСМ можно быстро и обратимо изменить, переведя их из состояния ньютоновской жидкости в состояние жесткого полутвердого тела с помощью магнитного поля (табл. 3) [4].

Таблица 3. Характерные свойства МСМ [4]

Свойство	Типичное значение	Влияние магнитного поля
Плотность, г/см ³	0,8...1,8	Практически не изменяется
Динамическая вязкость, мПа·с	1...1 000	Увеличивается в 2...10 раз
Намагниченность насыщения, кА/м	10...100	Основная характеристика
Теплопроводность, Вт/(м·К)	0,1...0,6	Увеличивается на 10...40 %
Температура Кюри, °С	550...580	Критическая точка свойств

Устойчивость к воздействию внешних факторов. Важнейшей характеристикой магнитных смазочных материалов является их устойчивость к воздействию внешних факторов, включая температуру, влажность и агрессивные среды. Высокая температура приводит к деградации дисперсной среды и разрушению стабилизирующей оболочки вокруг частиц, что вызывает образование агрегатов и потерю смазывающих свойств. Поэтому выбор подходящей основы и стабилизаторов играет ключевую роль в обеспечении длительной устойчивости материала в эксплуатационных условиях [5, 6].

Противоизносные и антифрикционные свойства. Принцип работы МСМ основан на способности магнитного поля концентрировать феррожидкость в определенных зонах. При размещении постоянных магнитов или электромагнитов вблизи подшипниковых узлов создается градиент магнитного поля, который удерживает смазочный материал именно там, где он необходим.

Противоизносные и антифрикционные свойства МСМ обусловлены их способностью формировать защитный слой на поверхностях трения. Этот слой предотвращает непосредственный контакт металлических поверхностей, уменьшает износ и снижает потери на трение. Эффективность защиты зависит от химического состава дисперсной среды, размеров и формы частиц, а также от наличия специальных добавок, повышающих химическую активность и адгезию покрытия к металлу [7–9, 11].

Экспериментальные исследования в области смазки МСМ в основном были сосредоточены на трибологических характеристиках различных МСМ. В работе [2] исследовали наноферромагнит $Mn_{0,78}Zn_{0,22}Fe_2O_4$ в качестве добавки к турбинному маслу с помощью четырехшариковой схемы трения. Было показано, что МСМ обеспечивает гораздо более эффективное снижение трения и противоизносную способность, чем базовое масло. В исследовании [1] трибологические характеристики МСМ, приготовленных на основе различных добавок Fe_3O_4 в синтетическом α -олефиновом углеводородном масле (РАО4), оценивались в четырехшариковом трибометре. Было установлено, что использование МСМ увеличивает максимальную нагрузку без заедания и уменьшает диаметр пятна износа по сравнению с жидкостью-носителем. Затем исследовались характеристики МСМ, полученных на основе Fe_3O_4 с различной степенью намагниченности методом совместного осаждения, при кольцевой схеме испытаний. Результаты эксперимента показали, что МСМ лучше снижают трение под воздействием внешнего магнитного поля по сравнению с жидкостью-носителем, а правильное распределение магнитного поля способствует фиксации смазки в зоне контакта пар трения.

В работе [10, 22] в качестве смазки для повышения эффективности работы упорного шарикоподшипника в условиях недостаточной смазки на трибостенде использовалась коммерческая феррожидкость на основе Fe_3O_4 . Результаты эксперимента показали, что феррожидкость может легко удерживаться на поверхности кольца даже при высокой скорости вращения под действием внешнего магнитного поля. Таким образом можно сократить расход смазки и избежать или отсрочить возникновение ее дефицита.

Саху (Sahoo R.) с соавторами [12] предложили использовать обратные МСМ, представляющие собой дисперсии немагнитных частиц (обычно диоксида кремния или полистирола) в МСМ, для смазки трибопар, в которых количество смазки невелико, а область смазки сильно ограничена. Предлагаемые МСМ состоят из немагнитных твердых частиц, таких как MoS_2 , политетрафторэтилен или диоксид кремния, диспергированных в полиальфаолефине. Для этих экспериментов использовался трибометр MCR-302 с конфигурацией «шарик на трех пластинах» и стальными контактами (AISI 316). При соответствующих градиентах магнитного поля приготовленные МСМ можно было направить в интересующую область и таким образом локально контролировать трение.

Исследование показало, что магнитные масла на основе перфторполиэфира демонстрируют лучшие смазочные свойства по сравнению с другими типами масел, особенно в области средних нагрузок [13].

Некоторые ориентировочные требования к свойствам МСМ для различных типов подшипников приведены в табл. 4.

Таблица 4. Свойства МСМ для конкретных типов подшипников

Тип подшипников	Рекомендуемая вязкость, мПа·с	Намагниченность, кА/м	Ориентировочный срок службы
Шариковые радиальные	50...2 000	20...40	Более 3 лет
Роликовые конические	100...500	40...60	Более 5 лет
Игольчатые	20...100	15...30	Более 2 лет
Скольжения	100...600	15...80	Более 6 лет

В МСМ магнитных частиц в базовых жидкостях-носителях намного меньше, чем в жидкостях с магнито-реологической памятью. Под воздействием внешнего магнитного поля наноразмерные магнитные частицы не всегда образуют цепочечные структуры, и МСМ сохраняют текучесть. Реологическими свойствами МСМ можно управлять с помощью внешнего магнитного поля, что позволяет увеличить грузоподъемность узлов трения при гидродинамической смазке. Для описания воздействия магнитной силы на магнитные частицы были разработаны математические модели. Для таких случаев используется модифицированное уравнение Рейнольдса на основе модели Нойрингера – Розенцвейга [1]. Было проведено численное моделирование на основе различных моделей и ситуаций, связанных со смазкой.

Рабочий температурный диапазон магнитных жидкостей зависит от типа несущей жидкости и стабильности ПАВ. Современные составы могут работать в диапазоне от -60 до $+200$ °С.

Влияние магнитного поля на свойства магнитных смазочных материалов. Под воздействием магнитного поля происходит упорядочивание частиц дисперсной фазы вдоль силовых линий поля, что приводит к изменению вязкости и прочности смазывающего слоя. Это явление используют для регулирования толщины и распределения смазочного материала в зоне трения, обеспечивая оптимизацию процессов трения и износа. Кроме того, магнитное поле усиливает адгезионные свойства материала, способствуя его лучшему сцеплению с металлическими поверхностями и повышению общей эффективности смазки [9, 14–16].

Помимо физических процессов, воздействие магнитных полей вызывает ряд химических реакций, которые влияют на стабильность и долговечность смазочного материала. Исследования указывают на возможность ускорения окислительных процессов в присутствии сильного магнитного поля. Это связано с тем, что внешняя энергия поля активирует молекулы кислорода, ускоряя реакции окисления компонентов масла. Важно отметить, что этот процесс может привести как к положительным изменениям (например, образованию защитных пленок), так и отрицательным последствиям (деградации состава масла) [18].

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что магнитные поля способствуют образованию более прочных адсорбционных слоев на поверхностях металла. Эти слои снижают трение и предотвращают коррозию, увеличивая срок службы оборудования. Примером такого эффекта являются результаты экспериментов, проведенных группой российских исследователей [15].

Коррозия поверхности в присутствии МСМ. Использование МСМ может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на возникновение коррозии [7, 17]. Позитивное влияние проявляется в том, что за счет своего магнитного характера МСМ способен сформировать надежный защитный слой на поверхности металла, препятствуя прямому контакту между поверхностью и окружением и тем самым снижая вероятность химической коррозии. Антиблокирующие добавки, часто присутствующие в магнитных маслах, дополнительно подавляют электрохимические реакции, ведущие к развитию коррозии.

Негативное влияние обусловлено тем, что сами ферромагнитные частицы могут выступать катализаторами электрохимических реакций, ускоряющих процесс коррозии, особенно в присутствии воды или агрессивных сред. В условиях длительного хранения или неправильного использования магнитные масла могут терять свою однородность, оседая на дне емкости или образуя комки, что отрицательно сказывается на антикоррозионных характеристиках.

Чтобы предотвратить негативные последствия, производители добавляют специальные присадки и проводят обработку основного состава, направленную на повышение устойчивости к коррозии. В качестве антикоррозионных присадок используют добавки, способные покрывать поверхности тонким слоем органических молекул, образующим защитный барьер от воды и кислорода. Часто в МСМ добавляют ингибиторы коррозии, поглощающие активные кислородные радикалы и свободные катионы.

Кроме того, наночастицы можно обрабатывать специальными веществами, которые предотвращают непосредственное соприкосновение частиц с металлическими поверхностями, исключая возможные очаги коррозии.

Магнитные смазочные жидкости на основе ионных жидкостей. Ионные жидкости [19] – это соли с температурой плавления ниже 100 °С. По сравнению с обычными смазочными материалами ионные жидкости обладают незначительной летучестью, негорючестью и высокой термической стабильностью (не утрачивают свойства при температуре выше 300 °С). Кроме того, ионные жидкости не мигрируют при перепаде температур. Эти свойства очень важны для смазочных материалов, особенно для тех, которые используются в экстремальных условиях. Указанные преимущества позволяют также применять ионные жидкости в качестве новых жидкостей-носителей для синтеза фталоцианинов. В настоящее время известны коллоиды на основе ионных жидкостей, которые состоят из чистого $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и CoFe_2O_4 , диспергированных в ионных жидкостях. Модификация поверхности частиц в условиях высокоионной атмосферы внутри ионных жидкостей по-прежнему остается основной проблемой для достижения долгосрочной коллоидной стабильности. Кроме того, поскольку количество ионных жидкостей огромно, а их свойства можно изменять, варьируя комбинацию используемых катионов и анионов, синтез подходящих и стабильных смазочных материалов на основе ионных жидкостей, структура и свойства которых соответствуют требованиям к смазке, может оказаться непростой задачей.

Таким образом, МСМ обладают уникальным набором физических и химических свойств, позволяющим эффективно решать проблемы трения и износа в широком спектре промышленных приложений. Их популярность обусловлена возможностью точного контроля над распределением и поведением материала в условиях эксплуатации, что делает их незаменимыми компонентами современных технологий смазки и герметизации.

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К преимуществам МСМ относятся:

1. Повышенная эффективность смазки. Магнитные смазочные материалы обладают способностью эффективно распределяться в зоне трения благодаря воздействию магнитного поля. Вследствие этого достигается равномерное покрытие трущихся поверхностей, что снижает износ и повышает долговечность механизмов. Кроме того, такие материалы способны проникать в труднодоступные зоны, где невозможно применять традиционные смазки.

2. Увеличение ресурса подшипниковых узлов. Исследования показали, что использование МСМ может значительно увеличить срок службы подшипниковых узлов. Так, применение магнитных жидкостей позволило повысить ресурс подшипников на 30–50 %, поскольку магнитные жидкости образуют устойчивую пленку, которая предотвращает прямой контакт металлических поверхностей.

3. Устойчивость к высоким температурам и нагрузкам. Магнитные смазочные материалы демонстрируют повышенную устойчивость к высоким температурам и механическим нагрузкам. Их способность сохранять свои свойства при воздействии высоких температур обусловлена наличием специальных добавок и стабилизаторов. Согласно исследованию [20], магнитные наномасла сохраняют свою стабильность вплоть до +200 °С, тогда как традиционные масла начинают терять свои свойства уже при температуре выше +150 °С.

4. Герметизация и защита от загрязнений. Еще одним важным преимуществом МСМ является их способность обеспечивать надежную герметизацию узлов трения. Магнитное поле удерживает смазку внутри подшипников и других подвижных соединений, предотвращая ее утечку и попадание посторонних веществ.

5. Экономия энергии и ресурсов. Благодаря снижению коэффициента трения и уменьшению потерь на трение, МСМ способствуют экономии энергии и повышению общей энергоэффективности оборудования. Согласно данным, представленным в научной литературе, применение магнитных масел приводит к сокращению энергозатрат на 10...15 %, что делает их экономически выгодными для предприятий [13].

К недостаткам МСМ, которые следует учитывать при их применении, относятся:

1. Высокая стоимость производства. Получение МСМ требует сложных технологических процессов и использования дорогостоящих ингредиентов, что увеличивает их себестоимость. По оценкам специалистов, цена таких продуктов примерно в 1,5...2 раза превышает цену традиционных смазочных материалов. Это ограничивает их массовое распространение и применение на небольших предприятиях.

2. Ограниченная доступность МСМ. Производственные мощности сосредоточены преимущественно в крупных компаниях, специализирующихся на инновационных разработках, что создает сложности для малых и средних предприятий, желающих перейти на использование этих технологий.

3. Сложность внедрения и адаптации. Интеграция МСМ в производственные процессы требует значительных изменений в оборудовании и технологической цепочке. Необходимо переоборудовать системы подачи смазки, установить специальные магнитные элементы и провести дополнительные испытания. Эти меры увеличивают капиталовложения и сроки окупаемости проекта.

4. Требование квалифицированного персонала. Эффективное использование МСМ предполагает наличие высококвалифицированных специалистов, способных правильно настроить и обслуживать систему. Отсутствие у персонала должной квалификации может привести к ошибкам в эксплуатации и снижению ожидаемого эффекта от внедрения.

5. Необходимость регулярной проверки состояния. Регулярная проверка состояния МСМ необходима для обеспечения их эффективной работы. Нарушение целостности защитной оболочки частиц или изменение вязкости могут негативно сказаться на производительности оборудования. Поэтому требуется постоянный мониторинг и контроль качества используемых материалов.

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК

Биосовместимые МСМ. Исследователи активно работают над созданием биосовместимых МСМ, снижающих токсичность на 90 %. Подобные разработки открывают путь к использованию этих материалов в медицинских устройствах, обеспечивая безопасность пациентов и расширяя спектр возможных приложений [21].

Высокотемпературные составы. Создание магнитных жидкостей, способных стабильно функционировать при температуре до 400 °С, становится важным направлением исследований, существенно расширяющим область применения данных материалов, включая их использование в авиационной и космической промышленности, где условия эксплуатации техники требуют высокой термической стойкости.

Наноструктурированные магнитные жидкости – одно из ключевых направлений современных исследований [22]. Контроль размера и морфологии наночастиц, модификация ПАВ повышают стабильность и эксплуатационные характеристики материалов. Эти улучшения делают возможным использование магнитных жидкостей в широком спектре промышленных областей, требующих высоких показателей долговечности и эффективности.

Инновации в космической технике. Особое внимание уделяется разработке инновационных решений для космических технологий. Проект FARGO на Международной космической станции демонстрирует потенциал магнитных жидкостей в создании адаптивных уплотнений и смазочных систем. Эта разработка способствует повышению надежности оборудования в условиях космоса.

Улучшенная защита от коррозии и повышение износостойкости. Важно обеспечить защиту металлических поверхностей от коррозии и длительный срок службы деталей, в связи с чем были разработаны специальные покрытия и добавки на основе магнитных жидкостей. Направленность исследований на разработку эффективных антикоррозионных покрытий, повышающих долговечность изделий и уменьшающих затраты на техническое обслуживание [27], демонстрирует значительный прогресс, связанный с улучшением характеристик и расширением сфер применения МСМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, МСМ обладают уникальными физическими и химическими свойствами, делающими их эффективным средством снижения трения и износа в механизмах различного назначения. Их использование значительно улучшает рабочие характеристики оборудования и способствует увеличению его ресурса, но при этом существуют некоторые ограничения, такие как высокая стоимость производства и необходимость специальных знаний для правильного применения. Важным аспектом является развитие новых направлений исследований, связанных с повышением стабильности и экологической безопасности составов для работы в условиях экстремально высоких температур и механических нагрузок. Использование МСМ для повышения надежности и экономической эффективности промышленного сектора обуславливает актуальность дальнейших исследований и инноваций [23–26].

ЛИТЕРАТУРА

1. Huang W., Wang X. Ferrofluids Lubrication: a Status Report // *Lubrication Science*. 2016. V. 28. № 1. P. 3–26.
2. Li-Jun W., Chu-Wen G., Ryuichiro Y., Yue W. Tribological Properties of Mn-Zn-Fe Magnetic Fluids under Magnetic Field // *Tribology International*. 2009. V. 42. № 6. P. 792–797.
3. Zhang Y., Li C. Magnetic Lubricants: Preparation, Physical Mechanism, and Application // *Hybrid-Energy Sustainable Machining*. 2025. P. 253–304.
4. Sun L., Zhang Y., Cui X., An Q.-L., Chen Y., Jia D.-Z., Gong P., Liu M.-Z., Dambatta Y.-S., Li C.-H. Magnetic Lubricants: Preparation, Physical Mechanism, and Application // *Friction*. 2025. V. 13. № 7. Art. № 9441010.

5. Hong Q., Huang X., Jiang J. Preparation and Characterization of Novel Polymer-Modified Magnetic Oils with Improved Tribological Performances // *Materials & Design*. 2019. V. 165. Art. № 107661.
6. Trivedi K. Analyzing lubrication properties of magnetic lubricant synthesized in two lubricating oils // *Wear*. 2021. V. 477. Art. № 203861.
7. Pownraj C., Valan Arasu A. Effect of Dispersing Single and Hybrid Nanoparticles on Tribological, Thermophysical, and Stability Characteristics of Lubricants: A Review // *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*. 2021. V. 143. № 2. P. 1773–1809.
8. Chouhan M., Thakur L., Sindhu D., Patel M. An Investigation on the Optimization of Anti-Wear Performance of Nano-Fe₃O₄ Based Ferromagnetic Lubricant // *Jurnal Tribologi*. 2020. V. 25. P. 119–135.
9. 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.
10. Xu M., Jin G., Dai Q., Huang W., Wang X. Ferrofluid Lubrication for Ball Bearings to Avoid Starvation // *Industrial Lubrication and Tribology*. 2020. V. 72. № 10. P. 1227–1231.
11. Xu Y., Zhao Y., Sun L. Recent Advances in Synthesis Methods and Tribological Behaviors of Magnetic Materials // *Advanced Powder Technology*. 2018. V. 29. № 1. P. 113–126.
12. Sahoo R., Ussa-Aldana P., Lancon D., Rondelez F., Morillas J.R., Hidalgo-Alvarez R., de Vicente J. Design of Smart Lubricants Using the Inverse Ferrofluid Approach // *Tribology International*. 2022. V. 166. Art. № 107346.
13. 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.
14. Bolotov A.N., Burdo G.B. Effect of Magnetic Field on the Physical and Mechanical Properties of Oils and Non-Magnetic Substance // *AIP Conference Proceedings*. 2021. Art. № 020004.
15. 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.
16. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. The Effect of Nanodispersed Magnetic Oil and Magnetic Field on Plastic and Corrosion Properties of Metal Surfaces // *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE)*. Springer Science. 2021. P. 1246–1253.
17. Trivedi K., Kothari A., Parekh K., Upadhyay R. Effect of Particle Concentration on Lubricating Properties of Magnetic Fluid // *Journal of Nanofluids*. 2018. V. 7. № 3. P. 420–427.
18. Luo S., Elouarzaki K., Xu Z.J. Electrochemistry in Magnetic Fields // *Angewandte Chemie International Edition*. 2022. V. 61. № 27. Art. № 202203564.
19. Shi X., Huang W., Wang X. Ionic Liquids-Based Magnetic Nanofluids as Lubricants // *Lubrication Science*. 2018. V. 30. № 2. P. 73–82.
20. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Магнитные нанодисперсные смазочные масла, стабилизированные полимерами // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 30–37.

21. Gansau C. Novel Biocompatible Magnetic Fluids // *European Cells & Materials*. 2002. V. 3. P. 158–159.
22. Ahmed Abdalgilil Mustafa W., Dassenoy F., Sarno M., Senatore A. A Review on Potentials and Challenges of Nanolubricants as Promising Lubricants for Electric Vehicles // *Lubrication Science*. 2022. V. 34. № 1. P. 1–29.
23. Huang W., Wang X. Ferrofluids Lubrication: A Status Report // *Lubrication Science*. 2016. V. 28. № 1. P. 3–26.
24. Michalec M., Svoboda P., Krupka I., Hartl M. Tribological Behavior of Smart Fluids Influenced by Magnetic and Electric Field – A Review // *Tribology in Industry*. 2018. V. 40. № 4. P. 515–528.
25. Uhlmann E., Spur G., Bayat N., Patzwald R. Application of Magnetic Fluids in Tribotechnical Systems // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2002. V. 252. P. 336–340.
26. Xu M., Dai Q., Huang W., Wang X. Using Magnetic Fluids to Improve the Behavior of Ball Bearings Under Starved Lubrication // *Tribology International*. 2020. V. 141. Art. № 105950.
27. Ouyang Y., Qiu R., Xiao Y., Shi Z., Hu S., Zhang Y., Chen M., Wang P. Magnetic Fluid Based on Mussel-Inspired Chemistry as Corrosion-Resistant Coating of NdFeB Magnetic Material // *Chemical Engineering Journal*. 2019. V. 368. P. 331–339.

Для цитирования: Болотов А.Н., Новикова О.О., Раткевич Е.А. Современные исследования магнитных смазочных материалов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 1 (29). С. 5–14.

MODERN RESEARCH ON MAGNETIC LUBRICANTS

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

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

The article is devoted to the study of magnetic lubricants (ML). An analysis of the structure, composition and properties of ML is presented, including a dispersed phase consisting of ferromagnetic nanoparticles and a dispersion medium such as mineral oils or synthetic liquids. The features of the influence of a magnetic field on the rheology and efficiency of ML, as well as mechanisms for forming anti-wear and anti-friction properties, are considered. An overview of recent experimental studies demonstrating a significant increase in the effectiveness of ML compared to traditional oils is provided, and prospects for further improvement of these materials through optimization of their composition and manufacturing technology are analyzed. Conclusions are drawn about the considerable potential of ML for a wide range of industrial sectors, such as machinery construction, aviation and space exploration, emphasizing the importance of continuing scientific research in this direction.

Keywords: magnetic lubricants, ferromagnetic nanoparticles, dispersion medium, rheology of magnetic lubricants, tribology of magnetic lubricants, magnetic-liquid bearings.

Поступила в редакцию/received: 03.11.2025; после рецензирования/revised: 10.11.2025;
принята/accepted: 14.11.2025

РЕГУЛИРУЕМАЯ ПО УДЕРЖИВАЕМОМУ ПЕРЕПАДУ ДАВЛЕНИЙ, ПОТЕРЯМ ТРЕНИЯ, ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ И ТЕПЛОВОМУ РЕЖИМУ МАГНИТОЖИДКОСТНАЯ ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ВАЛА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

А.М. ВЛАСОВ, канд. техн. наук, Ю.Б. КАЗАКОВ, д-р техн. наук

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34, e-mail: leshka.vlasov@gmail.com

© Власов А.М., Казаков Ю.Б., 2026

На эффективность магнитожидкостной герметизации вала влияют перепад давлений и внешняя температура, условия и режим работы электродвигателя (пуск, торможение, останов, реверс, частота вращения и электрическая нагрузка). Электромагнитные процессы в электродвигателе посредством воздействия вращающегося магнитного потока рассеяния обмоток влияют на скорость течения магнитной жидкости, момент и потери трения в магнитожидкостном герметизаторе. Целесообразно регулирование свойств магнитожидкостной герметизации вала по условиям работы электродвигателя. Предложенная конструкция регулируемого магнитожидкостного герметизатора и разработанный алгоритм его регулирования позволяют осуществлять адаптацию магнитожидкостной герметизации вала к изменениям условий работы электродвигателя. Экспериментально подтверждена возможность изменения максимального удерживаемого перепада давлений в регулируемом магнитожидкостном герметизаторе.

Ключевые слова: магнитожидкостная герметизация вала, электродвигатель, регулирование, перепад давлений, потери трения, тепловой режим, частота вращения.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность герметизации вала электродвигателя (ЭД) зависит от условий и режима его работы. Специальные ЭД (например взрывозащищенные, предназначенные для работы в опасных условиях) могут работать в режимах с пусками и торможениями, реверсами, с изменениями перепада давлений $\Delta p_{\text{внеш}}$, частоты вращения n , электрических нагрузок (ток $I_{\text{эд}}$), внешних температур $T_{\text{внеш}}$. Вероятность нарушения герметизации ЭД с механическими уплотнениями возрастает при изменении n , в повторно-кратковременном режиме работы по сравнению с продолжительным режимом [1, 2]. Необходимость обеспечения эффективности уплотнения вала в разных режимах работы ЭД требует подстройки системы герметизации, возможности регулирования свойств герметизаторов. В механических уплотнениях невозможно обеспечить оперативное регулирование свойств герметизации с изменением условий работы.

Высокими уплотнительными свойствами обладают магнитожидкостные герметизаторы (МЖГ), в которых уплотнение зазора между полюсом с Z зубцами и валом обеспечивается магнитной жидкостью (МЖ), смачивающей их поверхности и удерживаемой в зазоре магнитными силами магнитного потока постоянного магнита (ПМ) [3]. Воздействующий на МЖ $\Delta p_{\text{внеш}}$ стремится выдавить ее из зазора, вследствие чего положение, форма и площадь S магнитожидкостной пробки, соприкасающейся с

валом, в магнитном поле ПМ изменяются. Это вызывает в МЖ магнитное усилие, направленное на ее возврат исходное положение. При $\Delta p_{\text{внеш.мах}}$ МЖ принимает критическое положение. При $\Delta p_{\text{внеш}} > \Delta p_{\text{внеш.мах}}$ возникает пробой МЖГ и нарушение герметизации.

Чаще всего МЖГ устанавливаются перед подшипниковым узлом. По сравнению с механическими уплотнениями герметизация подшипника с помощью МЖГ обеспечивает увеличение безаварийного срока эксплуатации ЭД до 50 %, позволяет в несколько раз снизить вероятность нарушения герметичности ЭД [1, 2]. Потери на жидкостное трение в МЖГ до двух раз меньше потерь на трение в сальниковых уплотнениях.

Выпускаемые МЖГ с ПМ рассчитаны на работу в номинальных установившихся режимах. При изменении n и, соответственно, окружных скоростей вала $v_{\text{вала}}$ и МЖ $v_{\text{МЖ}}$ изменяется центробежная сила, стремящаяся оторвать МЖ от вращающегося вала, ослабляется ее поверхностное сцепление с валом. Увеличение $v_{\text{МЖ}}$ снижает критический (максимальный) удерживаемый зубцом МЖГ $\Delta p_{v_{\text{кр}}}$ [4]:

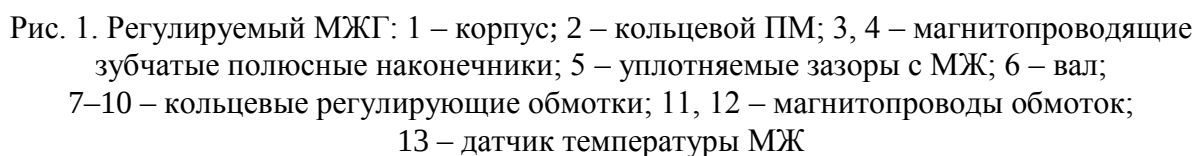
$$\Delta p_{v_{\text{кр}}} = \Delta p_{\text{ст.кр}} - \rho_{\text{МЖ}} \delta v_{\text{МЖ}}^2 / (2R), \quad (1)$$

где $\Delta p_{\text{ст.кр}} = \mu_0 \int_{H_{\text{min}}}^{H_{\text{max}}} M dH$ – критический удерживаемый перепад давлений в статическом режиме при $n = 0$; H_{min} , H_{max} – минимальные и максимальные магнитные напряженности магнитного поля в МЖ; M – намагниченность МЖ, являющаяся функцией H ; $\rho_{\text{МЖ}}$ – плотность МЖ; δ – зазор между вращающимся валом радиусом R и неподвижным полюсом радиусом r .

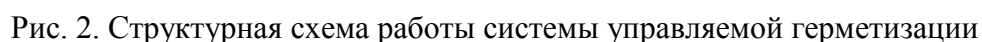
Экспериментальными исследованиями [4] установлено, что при $\Delta p_{\text{внеш}} = 0$ критическая линейная скорость $v_{\text{МЖ.кр}}$, при которой МЖ еще сцеплена с валом и удерживается на нем, составляет не более 80 м/с. С ростом $\Delta p_{\text{внеш}}$ $v_{\text{МЖ.кр}}$ снижается. Для уравнивания центробежной силы и удержания МЖ в зазоре необходимо повышать действующую на нее магнитную силу (например, повышая H). Во всех режимах работы ЭД должно обеспечиваться выполнение условия $\Delta p_{v_{\text{кр}}} > \Delta p_{\text{внеш}}$. При возрастании $\Delta p_{\text{внеш}}$ для заданной $v_{\text{МЖ}}$ или при возрастании n для заданного $\Delta p_{\text{внеш}}$ это условие может нарушиться. Увеличением магнитного потока можно повысить $\Delta p_{\text{ст.кр}}$. В МЖГ с ПМ и неизменным магнитным потоком $\Phi_{\text{пм}}$ это невозможно. Целесообразна разработка регулируемой магнитожидкостной герметизации вала ЭД с управлением по удерживаемому перепаду давлений, потерям трения, частоте вращения и тепловому режиму.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Регулирование уплотнительных свойств МЖГ эффективно при использовании дополнительных подмагничивающих обмоток [5] (рис. 1). Для управления удерживаемым МЖГ $\Delta p_{\text{внеш}}$ в добавление к ПМ с магнитным потоком $\Phi_{\text{пм}} = \Phi_1$ возможно применить «обмотку (р)» (число витков W_p , ток I_p), создающую магнитный поток $\Phi_p = \Phi_2$, и «обмотку (n)» (W_n , I_n), создающую магнитный поток $\Phi_n = \Phi_3$.



Структурная схема работы регулируемой магнитожидкостной герметизации вала, адаптируемая к изменяемым условиям и режиму работы ЭД, представлена на рис. 2.



Система содержит:

датчик температуры МЖ $T_{\text{МЖ}}$ $D_{\text{т}}$,

датчик $D_{\text{р}}$,

регулятор $I_{\text{р}}$,

датчик $D_{\text{п}}$,

регулятор $I_{\text{п}}$,

блоки усиления сигналов силового блока,

МЖГ с МЖ,

«обмотку (р)» с током $I_{\text{р}}$ и потоком $\Phi_{\text{р}}$,

«обмотку (п)» с током $I_{\text{п}}$ и потоком $\Phi_{\text{п}}$,

ПМ с потоком $\Phi_{\text{ПМ}}$.

Электродвигатель работает с возможным изменением мощности P , напряжения U и частоты сети f , определяющими n и $I_{\text{эд}}$. При нагрузке в торцевой зоне ЭД лобовыми частями обмоток статора и ротора $I_{\text{эд}}$ создает магнитный поток рассеяния $\Phi_{\text{б}}$. В системе задается ограничение на максимально допустимую температуру МЖ $T_{\text{МЖmax}}$, при достижении которой датчик температуры выдает сигнал на прекращение работы. При $T_{\text{МЖ}} < T_{\text{МЖmax}}$ разрешается регулирование $I_{\text{р}}$ и $I_{\text{п}}$. При $T_{\text{МЖ}} > T_{\text{МЖmax}}$, или при $\Delta p_{\text{внеш.тах}} > \Delta p_{\text{вкр}}$, или при $v_{\text{МЖ}} > v_{\text{МЖкр}}$, задаваемых в качестве ограничений, система выдает сигнал на отключение ЭД, так как МЖГ не способен обеспечить требуемую герметизацию. Датчики $D_{\text{р}}$, $D_{\text{п}}$ и $D_{\text{т}}$ вырабатывают сигналы о величинах $\Delta p_{\text{внеш.тах}}$, n и $T_{\text{МЖ}}$. Сигналы передаются в модель объекта управления (МОУ), где по величинам сигналов на основе заложенных функциональных зависимостей формируются управляющие воздействия на регуляторы $I_{\text{р}}$ и $I_{\text{п}}$. После усилителей СБ токи $I_{\text{р}}$ и $I_{\text{п}}$ подаются в «обмотку (р)» и «обмотку (п)», что вызывает изменение регулирующих магнитных потоков $\Phi_{\text{р}}$ и $\Phi_{\text{п}}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Электромагнитные процессы в ЭД влияют на результирующий магнитный поток в МЖГ. Изменения P , U и f влияют на $I_{\text{эд}}$ и величину торцевого магнитного потока рассеяния $\Phi_{\text{б}}$. Последний, замыкаясь через магнитопроводящий подшипниковый щит (в специальных ЭД для повышения прочности корпуса подшипниковые щиты часто выполняют стальными), МЖГ, вал и проникая в зазор дополнительно к $\Phi_{\text{ПМ}}$, $\Phi_{\text{р}}$ и $\Phi_{\text{п}}$, воздействует на МЖ. При максимальном $I_{\text{эд}}$ (в режиме пуска) влияние $\Phi_{\text{б}}$ на работу МЖГ будет наибольшим. В торцевой зоне ЭД $\Phi_{\text{б}}$, проникающий в МЖГ, вращается с частотой $n_{\text{маг.поля}}$, определяемой частотой сети f .

В асинхронном ЭД вал вращается с частотой $n_{\text{вал}} < n_{\text{маг.поля}}$. Вследствие вязкости МЖ увлекается валом во вращение с частотой вращения слоев МЖ $n_{\text{МЖR}} = n_{\text{вал}}$ у поверхности вала и с $n_{\text{МЖr}} = 0$ у поверхности неподвижных полюсов. При $\Phi_{\text{б}} = 0$ профиль изменения $n_{\text{МЖ}}$ в зазоре линейный от 0 до $n_{\text{вал}}$. При $\Phi_{\text{б}} > 0$ МЖ, обладающая магнитными свойствами, реагирует на вращение $\Phi_{\text{б}}$ с $n_{\text{маг.поля}} > n_{\text{вал}}$ и дополнительно увлекается во вращение. Профили изменения $n_{\text{МЖ}}$ в зазоре в номинальном и пусковом режимах ЭД при разных $\Phi_{\text{б}}$ представлены на рис. 3.

Под влиянием $\Phi_{\text{б}}$ профиль $n_{\text{МЖ}}$ становится нелинейным, и при значительном $\Phi_{\text{б}}$ некоторые слои МЖ в зазоре могут даже вращаться с частотой $n_{\text{МЖ}} > n_{\text{вал}}$ и подтягивать за собой ротор, передавая на него часть электромагнитной энергии статора. В момент пуска при $n_{\text{вал}} = 0$ для слоев МЖ у вала и полюсов $n_{\text{МЖR}} = n_{\text{МЖr}} = 0$, но в середине зазора

МЖ, увлекаемая вращающимся $\Phi_{б,мах}$, может иметь $n_{мж} > 0$ (рис. 3б). Реологическая характеристика псевдопластичной МЖ $\eta = f(\gamma)$ [7] из-за наличия начального напряжения сдвига слоев МЖ τ_0 при $\gamma = 0$ ($\eta \rightarrow \infty$ из-за структурирования ферромагнитных частиц в МЖ при $n_{мж} = 0$) и при $\gamma \rightarrow \infty$ с $\eta \rightarrow \eta_{min}$, где $\gamma = v_{мж} / \delta$ – скорость сдвига слоев МЖ, может вызывать уплощение профиля $n_{мж}$.

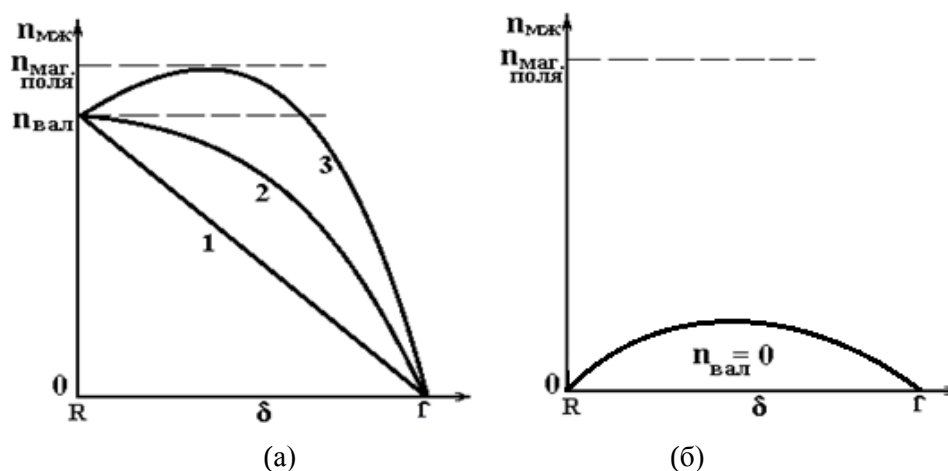


Рис. 3. Изменение скорости вращения МЖ по радиусу зазора:
номинальная нагрузка ЭД (а); режим пуска (б):
влияние ЭД на МЖГ отсутствует (1); небольшое (2); максимальное (3)

Так как МЖ дополнительно увлекается во вращение магнитными силами вращающегося с $n_{маг.поля}$ $\Phi_б$, то часть энергии $\Delta P_{МЖэм}$ от всей энергии $\Delta P_{МЖ}$, требуемой на вращение МЖ, поступает от электромагнитной энергии $P_{эм.ст}$ со стороны статора ЭД и от электромагнитной энергии $P_{эм.рот}$ со стороны ротора ЭД. Другую часть энергии $\Delta P_{МЖмех.вал}$ от всей энергии на вращение $\Delta P_{МЖэм}$ МЖ получает через вязкостные свойства от энергии $P_{2мех}$ вращающегося с $n_{вал}$ вала (рис. 4). При этом в зависимости от режима работы ЭД энергия $\Delta P_{МЖмех.вал}$ может быть направлена как на дополнительное ускорение вращающегося ротора, так и на его торможение. В зависимости от величины $\Phi_б$ соотношения частей энергий $\Delta P_{МЖэм}$ и $\Delta P_{МЖмех.вал}$ полной энергии $\Delta P_{МЖ}$ будут меняться.

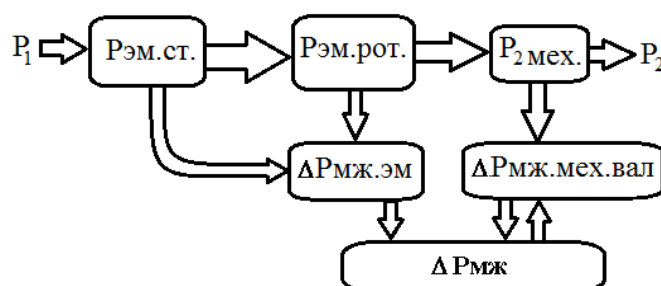


Рис. 4. Энергетическая диаграмма ЭД с МЖГ

Мощность диссипационных потерь в МЖ от вязкого трения перемещающихся слоев МЖ покрывается потребляемой от ЭД мощностью $\Delta P_{\text{МЖ}}$ и зависит от объема МЖ $V_{\text{МЖ}}$, η и γ :

$$\Delta P_{\text{МЖ}} = \gamma^2 \eta V_{\text{МЖ}}. \quad (2)$$

Повышение η и γ увеличивает потери на вязкостное трение движущихся слоев МЖ. Эти потери определяет момент трения МЖГ:

$$M_{\text{тр}} = 30 \Delta P_{\text{МЖ}} / (\pi n).$$

С другой стороны, через параметры и конструкцию МЖГ:

$$M_{\text{тр}} = \frac{\eta R Z S v}{\delta}. \quad (3)$$

У псевдопластичной МЖ η нелинейно зависит от B и γ . Взаимозависимость вязкостных и магнитных свойств МЖ может описываться как [8]:

$$\eta_{B,\gamma} = \eta_{B,\gamma_{\text{max}}} + (\eta_{B,\gamma_{\text{min}}} - \eta_{B,\gamma_{\text{max}}}) [1 + (C_B \gamma)^2]^l, \quad (4)$$

где $\eta_{B,\gamma_{\text{max}}}$ – наименьшая вязкость МЖ при индукции B и при максимально γ ; $\eta_{B,\gamma_{\text{min}}}$ – наибольшая вязкость МЖ при индукции B и при наименьшей γ ; C_B – коэффициент, зависящий от значения B ; l – показатель степени.

Увеличение n и снижение δ повышают γ , что увеличивает $M_{\text{тр}}$, повышение η также увеличивает $M_{\text{тр}}$. При изменении n пропорционально изменяется γ и квадратично изменяются выделяемые в МЖ вязкостные потери, которые, разогревая МЖ, ограничивают применимость МЖГ [9, 10], так как при предельной температуре МЖ $T_{\text{МЖmax}} < (130 \dots 150)^\circ \text{C}$ происходит ее вскипание и потеря герметизирующих свойств МЖГ. Оценочное значение $T_{\text{МЖ}}$ относительно $T_{\text{внеш}}$ при теплопроводности МЖ λ :

$$T_{\text{МЖ}} = T_{\text{внеш}} + \eta v_{\text{МЖ}}^2 / (2\lambda). \quad (5)$$

С ростом $T_{\text{МЖ}}$ экспоненциально снижается η [7]. Изменение B вызывает изменение нелинейных магнито-зависимых реологических, вязкостных и теплофизических свойств МЖ [6]. Характеристика намагничивания МЖ нелинейная, с зоной насыщения. Повышение магнитной индукции B , воздействующей на МЖ, увеличивает τ_0 и η , а также потери на трение в МЖ. В общем случае $\Delta P_{\text{МЖ}} M_{\text{тр}} = f(Z, \eta, \gamma, B, T_{\text{МЖ}})$. Таким образом, сложность определения свойств МЖ обусловлена взаимными зависимостями свойств МЖ. Например, в зазоре под зубцом в МЖ γ наибольшая, при которой η должна быть минимальной, но наибольшая B , при которой η должна быть максимальной. Температура МЖ снижает η , усложняется профиль $n_{\text{МЖ}}$. Поэтому для корректного анализа уплотнительных свойств МЖГ в ЭД с учетом сложных нелинейных взаимных зависимостей

$\eta = f(\gamma, B, T)$, взаимодействия вращающего Φ_6 с неподвижным $\Phi_{пм}$, конструкции торцевой зоны ЭД с пространственным расположением лобовых частей обмоток статора и ротора требуется сложное трехмерное моделирование с решением нелинейных магнитной, теплофизической и магнитогидродинамической задач.

На основе полученных соотношений могут быть сформулированы ограничения на $v_{МЖкр}$ по заданным $\Delta p_{внеш}$ и/или $T_{МЖmax}$.

По заданному $\Delta p_{внеш}$:

$$v'_{МЖкр} \leq \sqrt{D[M_S(B_{max} - B_{min}) - \Delta p_{внеш}/Z] / (\rho_{МЖ}\delta)}, \quad (6)$$

по заданному $T_{МЖmax}$:

$$v''_{МЖкр} \leq \sqrt{2(T_{МЖmax} - T_{внеш})\lambda / \eta}. \quad (7)$$

Из вычисленных значений $v'_{МЖкр}$ и $v''_{МЖкр}$ выбирается меньшее $v_{МЖкр}$, сравнивается n с $n_{кр} = 60v_{МЖкр} / (\pi D)$ и выбирается канал регулирования I_p или I_n .

Принимается, что если $\Delta p_{внеш} \leq \Delta p_{max}$, $T_{МЖ} \leq T_{МЖmax}$ и $n \leq n_{МЖкр}$, то регулирование МЖГ возможно. Тогда с учетом запаса коэффициента $K_3 = 1,5 \dots 3$ ток в регулирующей «обмотке (p)»

$$I_p = \frac{1,59\delta 10^6}{MW_p} \left[K_3 \Delta p_{внеш} / Z + \rho_{МЖ} \left(\frac{\pi D n}{60} \right)^2 \delta / D \right], \quad (8)$$

а ток в регулирующей «обмотке(n)»

$$I_n = \frac{1,59\delta 10^6}{W_n} \left[\frac{8\lambda(T_{МЖmax} - T_{МЖ}) - \left(\frac{\pi D n}{60} \right)^2 \eta_{B=0}}{2,65} \right]^2. \quad (9)$$

На основе полученных соотношений разработана блок-схема управлением токами в регулирующих обмотках МЖГ в зависимости от сигналов D_p , D_n , D_t (рис. 5).

Разработанная в системе LabVIEW имитационная модель исследования работы системы регулирования по сигналам датчиков n , $\Delta p_{внеш}$, $T_{внеш}$ при заданных ограничениях на n_{max} , $\Delta p_{внеш,max}$ и $T_{МЖmax}$ с шагами регулирования токов ΔI_p и ΔI_n в обмотках представлена на рис. 6.

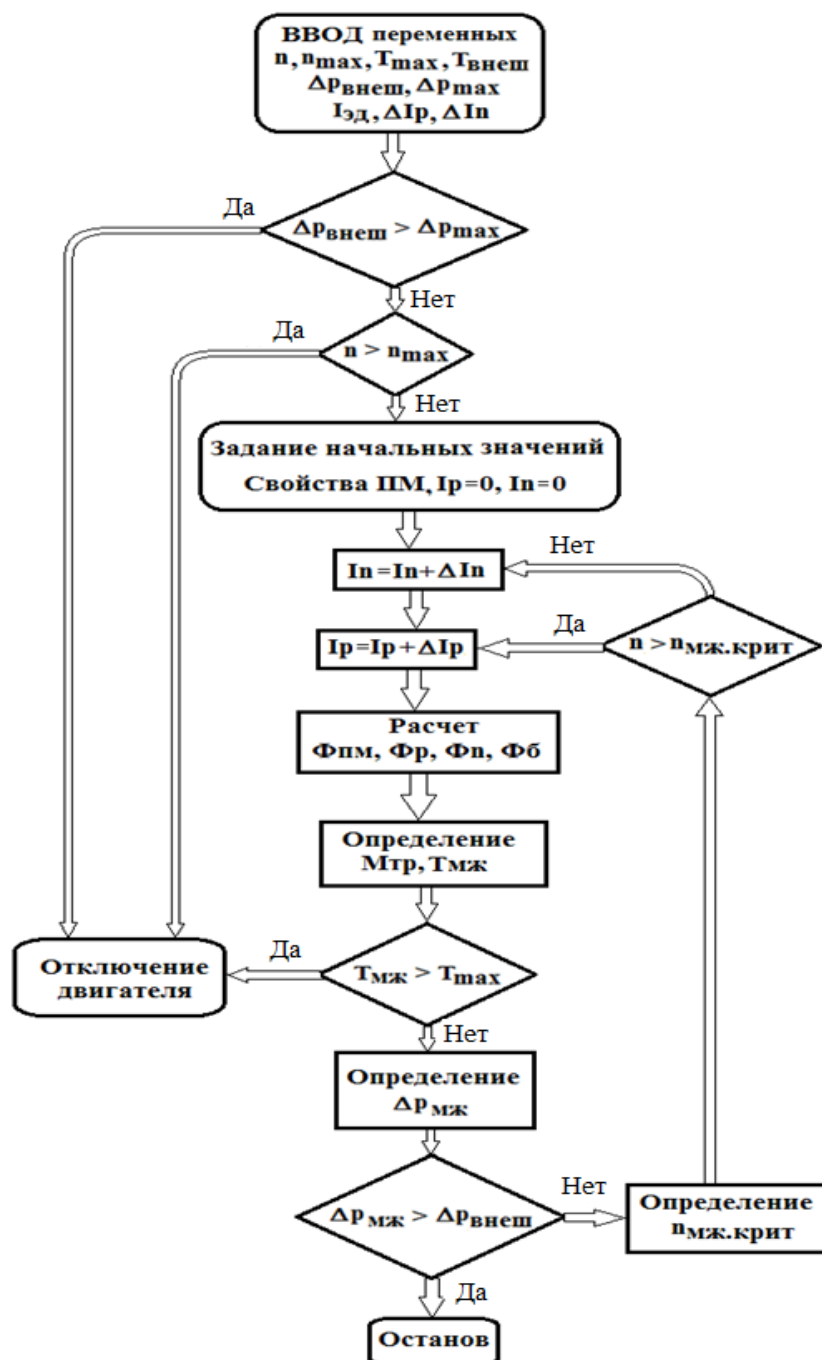


Рис. 5. Блок-схема управлением МЖГ

Влияние регулирующей токовой обмотки на свойства МЖГ экспериментально оценено на опытном образце [11] (рис. 7), содержащем ферритовый ПМ (коэрцитивная сила по индукции $H_{CB} = 185$ кА/м, остаточная индукция $B_r = 0,3$ Тл) и обмотку управления с $W = 200$ витками и током управления I_y . В экспериментах измерялся $\Delta p_{вкр}$ при изменении n и I_y .

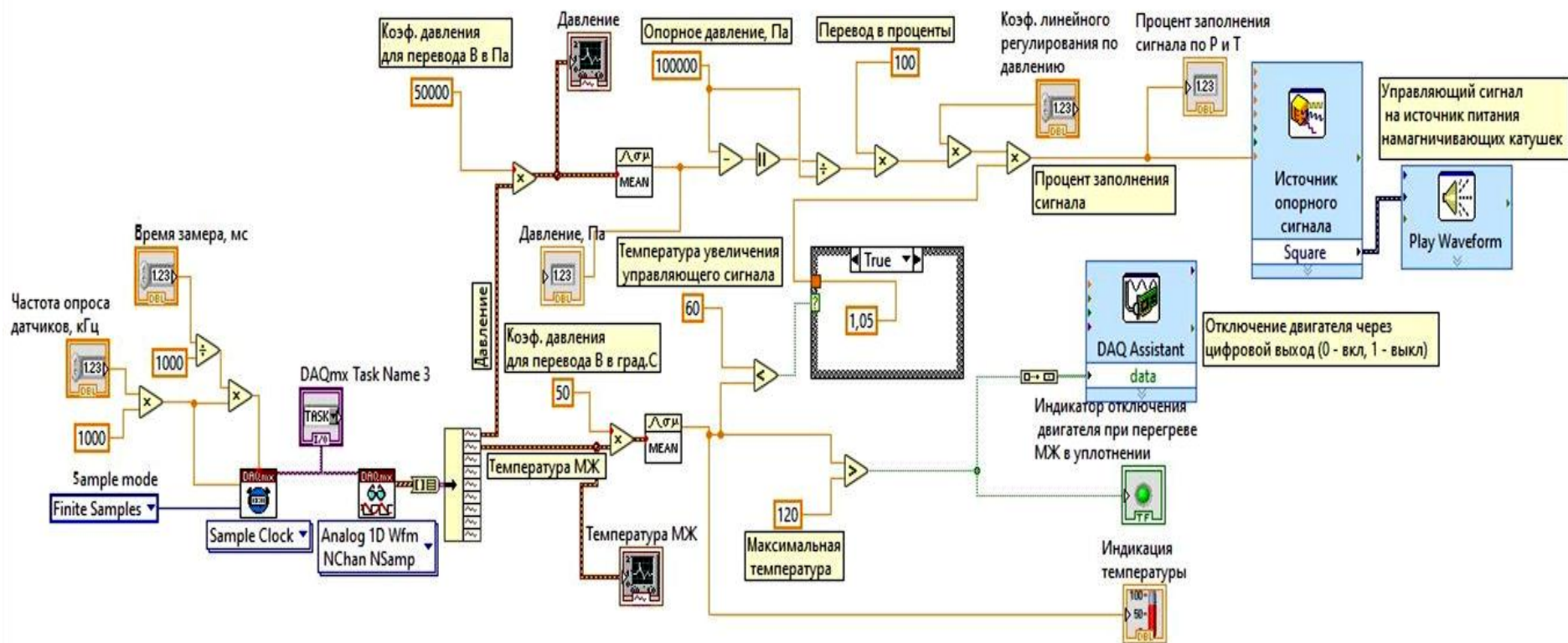


Рис. 6. Имитационная модель системы регулирования напряжения обмотки МЖГ



Рис. 7. Конструкция опытного управляемого МЖГ

При действии только ПМ ($I_y = 0$) и снижении n от 31 800 об/мин до полного останова ($n = 0$) $\Delta p_{\text{вкр}}$ увеличился с 0,125 до 0,27 ати. Возрастание I_y от 0 до +4 А при $n = 0$ вызвало повышение $\Delta p_{\text{вкр}}$ до 0,37 ати. Изменение направления и величины I_y от 0 до –3 А вызвало при $n = 0$ снижение $\Delta p_{\text{вкр}}$ до 0,21 ати, т. е. при и регулировании I_y от –3 до +4 А для $n = 0$ $\Delta p_{\text{вкр}}$ изменился от 0,21 до 0,37 ати – с диапазоном (–22,2... +37) %. Чувствительность изменения $\Delta p_{\text{вкр}}$ по I_y при $n = 0$ составила 0,0229 ати/А. При таком же регулировании I_y для $n = 3180$ об/мин $\Delta p_{\text{вкр}}$ изменился от 0,1 до 0,15 ати – с диапазоном (–20...+20) %. Чувствительность изменения $\Delta p_{\text{вкр}}$ по I_y составила 0,007 ати/А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение эффективности уплотнения валов электродвигателей, работающих с изменяемыми условиями и режимом работы, возможно при использовании магнито-жидкостной герметизации вала, регулируемой по удерживаемому перепаду давлений, потерям трения, частоте вращения и тепловому режиму. Предложенная конструкция регулируемого магнитожидкостного герметизатора, средства и алгоритм его регулирования позволяют осуществлять адаптацию герметизации вала к изменениям условий эксплуатации. Экспериментально подтверждена возможность регулирования максимального удерживаемого перепада давлений управляемым магнитожидкостным герметизатором при изменении тока регулирующей подмагничивающей обмотки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радионов А.В., Харламова Е.В. Повышение уровня экологической безопасности при использовании магнитожидкостных герметизаторов и частотных преобразователей в процессах эксплуатации электродвигателей серии ВАСО // *Екологічна безпека*. 2016. № 2 (22). С. 9–14.
2. Radionov A., Podoltsev A., Peczkis G. The Specific Features of High-velocity Magnetic Fluid Sealing Complexes // *Open Engineering*. 2018. V. 8. № 1. P. 539–544.
3. Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Страдомский Ю.И., Перминов С.М. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование. Иваново: ИГЭУ, 2010. 184 с.
4. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. М.: Химия, 1989. 279 с.
5. Власов А.М., Казаков Ю.Б. Исследование влияния регулирующей обмотки на изменение магнитной индукции в зазоре магнитожидкостного герметизатора: XX юбилейная Всероссийская с международным участием Плесская науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. Иваново: ИГЭУ, 2022. С. 311–317.

6. Krakov M.S., Nikiforov I.V. Effect of Diffusion of Magnetic Particles on the Parameters of the Magnetic Fluid Seal: A numerical simulation // *Magnetohydrodynamics*. 2014. V. 50. № 1. P. 35–44.

7. Морозов Н.А., Казаков Ю.Б. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях. Иваново: ИГЭУ, 2011. 264 с.

8. Nesterov S.A. Stradomskii Yu.I., Belov V.S. Study of Interconnected Physical Processes in the Magnetic Fluid Staler // *Problemele energeticii regionale*. 2021. V. 3 (51). P. 1–9.

9. Krakov M.S., Nikiforov I.V. Regarding the Influence of Heating and the Soret Effect on a Magnetic Fluid Seal // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. V. 431. P. 255–261.

10. Chen Y., Li D., Zhang Y., Li Z., Zhou H. The Influence of the Temperature Rise on the Sealing Performance of the Rotating Magnetic Fluid Seal // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2020. V. 56. № 11. Art no. 4600510.

11. Казаков Ю.Б., Власов А.М. Экспериментальное исследование влияния регулирующей обмотки на удерживаемый магнитожидкостным герметизатором перепад давления: *Материалы междун. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XXII Бенардосовские чтения)*. В 3 т. Электротехника. Иваново: ИГЭУ, 2023. Т. 3. С. 319–321.

Для цитирования: Власов А.М., Казаков Ю.Б. Регулируемая по удерживаемому перепаду давлений, потерям трения, частоте вращения и тепловому режиму магнитожидкостная герметизация вала электродвигателя // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 1 (29). С. 15–25.

MAGNETIC FLUID SEALING OF AN ELECTRIC MOTOR SHAFT, ADJUSTABLE IN TERMS OF MAINTAINED PRESSURE DIFFERENTIAL, FRICTION LOSSES, ROTATION FREQUENCY AND THERMAL MODE

A.M. VLASOV, Cand. Sc., Yu.B. KAZAKOV, Dr Sc.

Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin,
34, Rabfakovskaya St., 153003, Ivanovo, e-mail: leshka.vlasov@gmail.com

The efficiency of magnetic fluid shaft sealing is affected by the pressure difference and external temperature, conditions and operating mode of the electric motor (start, braking, stopping, reversing, rotation speed and electrical load). Electromagnetic processes in an electric motor, through the action of the rotating magnetic flux of the windings, affect the flow rate of the magnetic fluid, the torque and friction losses in the magnetic fluid seal. It is advisable to regulate the properties of the magnetic fluid shaft seal according to the operating conditions of the electric motor. A design of an adjustable magnetic fluid seal is proposed and an algorithm for its regulation is developed, which allows for the adaptation of the magnetic fluid seal of the shaft to changes in the operating conditions of the electric motor. The possibility of changing the maximum retained pressure difference in an adjustable magnetic fluid seal has been experimentally confirmed.

Keywords: magnetic fluid shaft sealing, electric motor, regulation, pressure drop, friction losses, thermal conditions, rotation speed.

Поступила в редакцию/received: 03.12.2025; после рецензирования/revised: 05.12.2025;
принята/accepted: 08.12.2025

**ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ
И ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ
С ВВЕДЕНИЕМ ГРАФИТОВОГО НАПОЛНИТЕЛЯ
И ОТВЕРЖДЕНИЕМ В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

М.Ф. ГАЛИХАНОВ¹, д-р техн. наук, Е.Н. МОЧАЛОВА^{1, 2}, канд. техн. наук,
Т.Т. МУСАЕВ^{1, 2}, асп.

¹Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан,
420111, Казань, ул. Н.Э. Баумана, 20, e-mail: mgalikhanov@yandex.ru

²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015, Казань, ул. К. Маркса, 68, e-mail: enmochalova@mail.ru

© Галиханов М.Ф., Мочалова Е.Н., Мусаев Т.Т., 2026

Исследовано влияние условий отверждения композитов на основе эпоксидной смолы DER-331 и модифицированного аминного отвердителя Л-20 и введения дисперсного графитового наполнителя на их механические и трибологические свойства. Экспериментально показано, что отверждение с применением электрического поля приводит к ориентации полярных групп и частиц наполнителя. Это дополнительно повышает твердость и снижает коэффициенты трения на 25 %. Введение 4 мас. % графита обеспечивает значительное снижение коэффициента трения и небольшое упрочнение материала, что способствует улучшению его износостойкости. Комплексный подход, объединяющий выбор матрицы, применение наполнителя и наложение постоянного электрического поля в процессе отверждения, позволит повысить износостойкость эпоксидных покрытий для продления срока их службы и расширения сферы практического применения.

Ключевые слова: эпоксидная смола, модифицированный аминный отвердитель, графит, поляризация, коэффициент трения, прочность, твердость.

ВВЕДЕНИЕ

Изделия из эпоксидных полимеров, равно как и изделия с эпоксидными покрытиями, подвергаются трению и износу под нагрузками в самых разнообразных условиях эксплуатации, где важны прочность, долговечность и устойчивость к механическим повреждениям [1–3]. Эпоксидные покрытия применяются для защиты металлов и других материалов в промышленности, нефтегазовой сфере, машиностроении и химической промышленности, где требуется прочная защита от физического трения и химического воздействия. Например, покрытия из эпоксидных полимеров в ряде случаев испытывают нагрузки на трение и износ, в том числе при их использовании:

на поверхности машин и механизмов, таких как конвейеры, насосы и валы, где они могут подвергаться трению во время работы;

в производственных и складских помещениях, где применение тяжелых машин или других транспортных средств (например, погрузчиков) вызывает высокие нагрузки и трение при контакте с полом;

для защиты деталей автомобильной промышленности и машиностроения от коррозии и износа, а также для улучшения сцепления в местах с высокой нагрузкой;

в качестве изоляционных покрытий на компонентах, где механические нагрузки могут вызвать повреждения или износ, и др. [1–3].

Кроме того, в химической промышленности эпоксидные покрытия могут быть подвержены эрозионному износу и деградации из-за воздействия агрессивных сред – растворителей, кислот или щелочей.

К типичным условиям, при которых изделия из эпоксидных композитов или с эпоксидными покрытиями подвергаются трению и износу, можно отнести механический контакт деталей и узлов с относительным движением поверхностей, контакт со средами с микроабразивными частицами, а также с агрессивными химическими средами, вызывающими абразивный, химический и эрозионный износ. Очевидно, что комбинация механического воздействия и химической коррозии ускоряет разрушение покрытия.

Повышение износостойкости эпоксидных покрытий может достигаться за счет введения наполнителей, модификации химической структуры эпоксидной матрицы, использования внутренних смазок, оптимизации технологии нанесения эпоксидных покрытий и т. д. [4–10]. Например, в работе [4] исследована износостойкость композитного покрытия «эпоксидная смола / Al_2O_3 ». Показано, что добавление низкомолекулярного полиамидного и феноламинного композитного отвердителя в эпоксидную смолу может улучшить износостойкость покрытия. Этого эффекта можно также добиться введением наполнителя Al_2O_3 [4]. В статье [5] рассмотрены механические и трибологические свойства эпоксидных композитов, наполненных частицами графита. Показано, что с увеличением содержания графита улучшались показатели ударной вязкости и твердости, снижался коэффициент трения. Кроме того, с увеличением содержания графита резко уменьшалась скорость износа из-за образования слоя смазки на контактной поверхности, что эффективно снижало вероятность разрушения образца [5].

Работа [6] посвящена улучшению трибологических свойств эпоксидных покрытий за счет введения различных нанонаполнителей, таких как оксид графена, дисульфид молибдена и политетрафторэтилен (ПТФЭ). Например, добавление MoS_2 в эпоксидную смолу привело к снижению коэффициента трения на 90 %, в то время как композиты с 1,0 мас. % оксида графена и с 10 мас. % ПТФЭ показали снижение скорости износа и коэффициента трения на 88 %. Кроме того, при введении гибридных нанонаполнителей, таких как комбинации MoS_2 и графена, коэффициент трения за счет синергетического эффекта снизился на 99 % по сравнению с чистыми эпоксидными покрытиями [6]. Новые композиты эпоксидных смол с графеном были разработаны и в ходе исследования [9], где показано, что износостойкость композиции с 5 мас. % графена в 628 раз превышает износостойкость чистой эпоксидной смолы.

В исследовании [10] установлено, что добавление упрочняющих частиц TiO_2 и Al_2O_3 значительно улучшает механические и трибологические характеристики эпоксидного лакокрасочного композита.

В ряде работ показано, что отверждение эпоксидных материалов в постоянном электрическом поле приводит к созданию электретов с повышенными механическими характеристиками, в частности, твердостью [11–13] и износостойкостью покрытий.

В связи с вышесказанным было интересно создать эпоксидную композицию с повышенными значениями механических и трибологических характеристик за счет введения дисперсного наполнителя и применения постоянного электрического поля, что и явилось целью настоящей работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изготовления образцов композитов использовали эпоксидную смолу DER-331 (производитель The Dow Chemical Company), модифицированный аминный отвердитель (олигоамид, Л-20) и наполнитель в виде дисперсии графита марки ГС-1.

Эпоксидные композиции различного состава получали при стехиометрическом содержании смолы и отвердителя при различных температурах и временах отверждения. Для этого полученную смешением эпоксидной смолы и различных химических добавок (отвердителя, наполнителя) композицию помещали в металлическую форму с тефлоновым покрытием. После этого форму закрывали и выдерживали в термошкафу с определенной температурой $T_{отв}$ в течение заданного времени $\tau_{отв}$. Таким образом получался круглый образец толщиной 1 мм, стороны которого были сформированы нижней и верхней полуформами, а ребро – тефлоновым кольцом с внутренним диаметром 100 мм. Часть образцов отверждали при наложении постоянного электрического поля, подавая на полуформы постоянное напряжение $U_{пол} = 5 \dots 15$ кВ, в результате чего полуформы выполняли роль электродов (рис. 1).

Стоит отметить, что напряженность электрического поля между плоскими электродами можно рассчитать по формуле для однородного поля:

$$E = U / d,$$

где E – напряженность электрического поля, В/м; U – приложенное напряжение, В; d – расстояние между электродами, м (толщина образца).

В нашем случае $U = 5\,000 \dots 15\,000$ В, расстояние между электродами $d = 1$ мм или 0,001 м. Значит, $E = 5\,000\,000 \dots 15\,000\,000$ В/м = 5...15 МВ/м.

Диаметр электродов при таком приближении не влияет на значение напряженности, так как поле между плоскими электродами считается однородным, если зазор мал и края не оказывают значительного влияния на распределение поля.

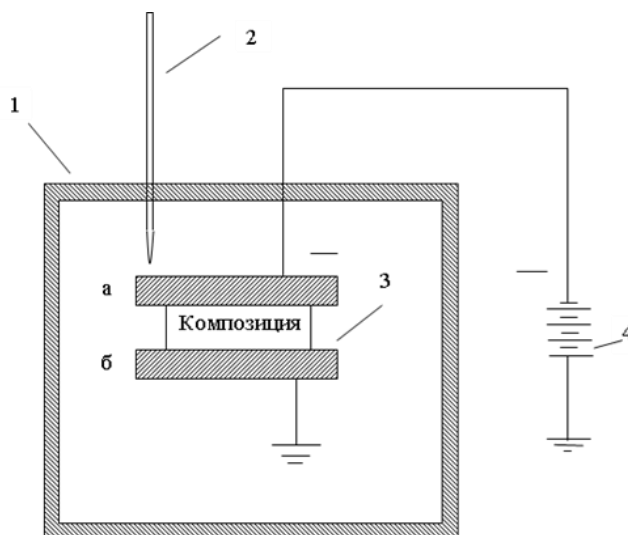


Рис. 1. Схема установки для отверждения эпоксидной композиции в постоянном электрическом поле: 1 – термошкаф; 2 – термометр; 3 – металлическая форма, состоящая из двух плоских полуформ (а – верхний электрод, б – нижний электрод); 4 – источник высокого напряжения

Содержание гель-фракции g определяли экстракцией измельченных пленок в аппарате Сокслета кипящим ацетоном в течение 24 ч с последующей сушкой до постоянной массы. Параметры электростатического поля (в частности, потенциал поверхности на 50-е сутки хранения $V_{э50}$, время жизни электрета $\tau_{жэ}$) образцов, отвержденных в постоянном электрическом поле, измерялись при помощи прибора ИПЭП-1. Твердость по Шору H_D определяли для отвержденных образцов в соответствии с ГОСТ 24621-2015 на твердомере (дюрометре) HG1B. Прочность при разрыве σ_p (разрушающее напряжение при разрыве) измеряли в соответствии с ГОСТ 11262-2017.

Статический μ_s и кинетический μ_k коэффициенты трения исходных и поляризованных образцов определяли на приборе Thwing Albert FP-2260 Film Friction/Peel Tester. При измерении коэффициентов трения испытываемые образцы с помощью тросика, соединенного с силоизмерительным датчиком (усилие до 19,6 Н, погрешность 0,5...1 % во всем диапазоне чувствительности), приводились в движение по горизонтальной гладкой стальной поверхности со скоростью 152,4 мм/мин. Нормальная контактная нагрузка $N = 84,7$ мН создавалась весом образца (масса образцов 8,64 г). Температура измерения комнатная. Силоизмерительный датчик определяет сопротивление в начальный момент движения (статический коэффициент трения) и далее постоянно (кинетический коэффициент трения), после чего показывает среднее значение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эпоксидные полимеры широко применяются в качестве защитных покрытий благодаря их отличной адгезии, химической устойчивости и механической прочности. Для отверждения достаточно часто используют модифицированный аминный отвердитель, в результате чего получается структура с хаотичным расположением структурных элементов, представленная на рис. 2а. На рис. 2б дано схематическое изображение фрагмента эпоксидной композиции с наложением постоянного электрического поля.

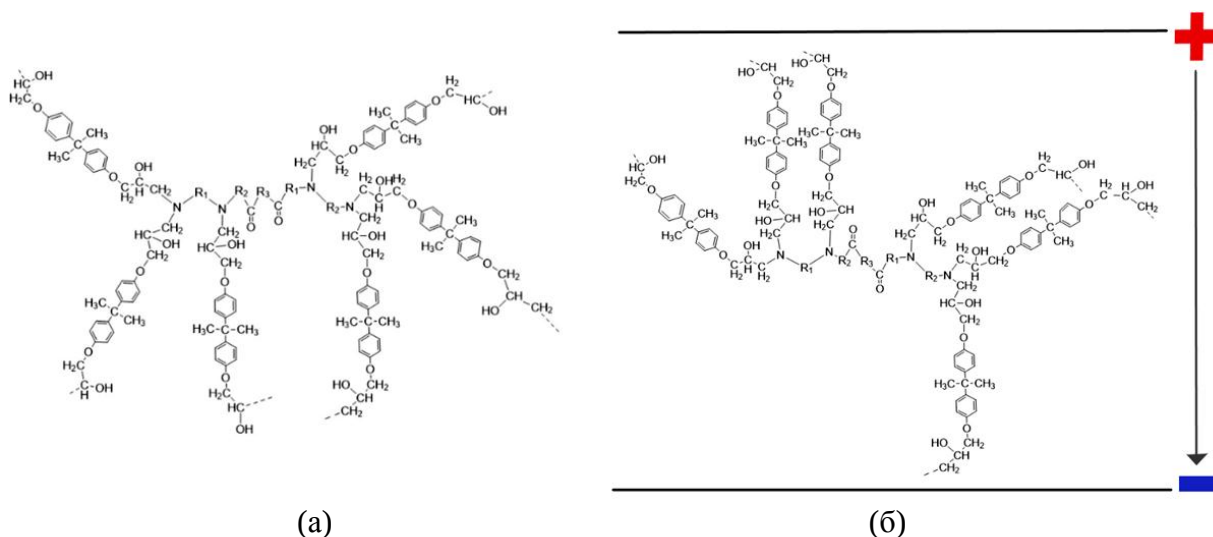


Рис. 2. Схематическое изображение фрагмента эпоксидной композиции, отвержденной модифицированным аминным отвердителем без (а) и с наложением (б) постоянного электрического поля

Были установлены оптимальные параметры отверждения: $U_{пол} = 15$ кВ, $T_{отв} = 120^\circ\text{C}$, $\tau_{отв} = 180$ мин. Получаемый при этих условиях отверждения материал обладает достаточно хорошими физико-механическими характеристиками, в том числе твердостью и высоким разрушающим напряжением при разрыве (таблица, образец № 1).

С учетом того, что одним из твердых смазочных материалов, уменьшающих трение между контактирующими поверхностями и снижающих износ, является графит со слоистой кристаллической структурой [14], было предложено добавить его в состав композиции. Графит улучшает износостойкость изделий и покрытий благодаря тому, что действует сразу по нескольким механизмам. Во-первых, графитовые частицы усиливают полимерную матрицу, способствуют равномерному распределению нагрузки во время трения, уменьшая локальные концентрации напряжений, провоцирующие образование микротрещин и ускоренный износ. Во-вторых, частицы наполнителя позволяют повысить теплопроводность покрытий, снижая тем самым температурный износ и деформации. В-третьих, частицы графита наряду с механическим упрочнением обеспечивают пониженный коэффициент трения за счет образования на поверхности тонкой самосмазывающейся пленки, что особенно важно для узлов трения.

Исследования показали, что введение графита в состав эпоксидной композиции существенно снижает ее коэффициент трения, при этом изменения ее прочностных характеристик незначительны. Причем чем выше концентрация наполнителя, тем ниже значения статического и кинетического коэффициентов трения материала, но при этом снижаются показатели прочности. Было установлено, что оптимальное содержание графита в композиции составляет 4 мас. % (таблица, образец № 2).

Механические и трибологические характеристики композитов

№ образца	Состав композиции	g , %	V_{50} , кВ	$\tau_{жс}$, сут	σ_p , МПа	H_D	μ_s	μ_k
1	DER-331 + Л-20	97,7	0	0	45,5	82,7	1,12	0,95
2	DER-331 + Л-20 + + графит (4 мас. %)	97,8	0	0	46,7	83,3	0,32	0,28
3	DER-331 + Л-20	98,7	80	>1 095	48,1	83,0	1,11	0,95
4	DER-331 + Л-20 + + графит (4 мас. %)	98,8	120	>1 095	48,7	85,0	0,24	0,21

В работе [6] снижение коэффициента трения эпоксидного полимера при введении графита объясняется тем, что частицы наполнителя отклоняют траекторию развития трещин и предотвращают распространение микротрещин, образовавшихся в эпоксидной матрице при трении, препятствуя появлению следов износа, что в конечном счете снижает скорость износа покрытий. Данное объяснение можно применить и к разрабатываемым композициям.

Следующим этапом работы стала проверка возможности повышения механических характеристик эпоксидных материалов за счет их отверждения в постоянном электрическом поле. Эксперименты показали, что таким образом можно

незначительно (на 2...5 %, т. е. на уровне ошибки эксперимента) улучшить механические и трибологические показатели.

Как правило, для эпоксидных смол электрическая прочность составляет примерно 20...30 кВ/мм. Это значит, что при напряженности поля порядка 15 кВ/мм (как в нашем случае) напряженность поля ниже значения пробоя, и, следовательно, происходит поляризация материала. Поляризация эпоксидных полимеров – это процесс преимущественной ориентации электрически полярных группировок (например, эпоксидных и гидроксильных) в одном направлении внутри полимерной матрицы. Данные изменения схематически изображены на рис. 2б.

Показателем, свидетельствующем о наличии поляризованного состояния материала, может служить потенциал поверхности, который у эпоксидного полимера, отвержденного в постоянном электрическом поле (т. е. поляризованного в процессе химического отверждения), составляет 580 В сразу после отверждения и 80 В на 50-е сутки хранения. Это вполне ожидаемо, так как поляризованные полимеры (электреты) изначально обладают высокими электретными свойствами, которые уменьшаются по экспоненциальной зависимости от времени хранения (эксплуатации).

Ориентация структурных элементов материала ведет к изменению его внутренней структуры в целом, что отражается на механических свойствах. К основным причинам некоторого повышения прочности и твердости эпоксидного полимера при поляризации можно отнести следующие:

- повышается общий уровень упорядоченности в аморфной полимерной матрице, что уменьшает количество дефектов и свободного пространства между макромолекулами;

- преимущественная ориентация электростатически активных группировок усиливает диполь-дипольное взаимодействие между цепями полимера, ковалентные и водородные связи становятся более направленными и плотными, что повышает жесткость матрицы;

- упорядоченная ориентация снижает локальные колебания и подвижность молекулярных сегментов, в силу чего повышается сопротивление механическим деформациям.

Экспериментальные данные из литературных источников [11–13] подтверждают небольшое, но систематическое повышение прочности и твердости эпоксидных систем при ориентации полярных групп, что согласуется с данными физико-механических измерений. Безусловно, следует учитывать, что эффект повышенной прочности не всегда линейно пропорционален степени поляризации, поскольку избыточная ориентация может создавать внутренние напряжения и зоны концентрирования напряжений, потенциально способные инициировать дефекты.

Однако снижение значений статического и кинетического коэффициентов трения композиций эпоксидной смолы с графитом после поляризации при отверждении довольно значительно – на 25 % (см. таблицу, образец № 4). Вероятно, это связано с тем, что ориентация макромолекулярной структуры полимера сопровождается и ориентацией пластинчатых частиц графита, что повышает эффективность их действия.

Немаловажно отметить и повышенные значения потенциала поверхности композиций эпоксидной смолы с графитом – 120 В на 50-е сутки хранения (в 1,5 раза выше, чем у ненаполненного материала). Это говорит о большей стабильности поляризационного состояния эпоксидной композиции. Способность дисперсных наполнителей повышать потенциал поверхности поляризованных полимеров при их

введении в количестве 2...6 об. % [15–17] в основном связывалась с поляризацией Максвелла – Вагнера (на границе раздела фаз). В данном случае электропроводящие частицы дисперсий также могут служить поставщиками дополнительных инжектированных носителей зарядов, выполняющими свои функции и после снятия внешнего воздействия электрического поля.

Можно заметить, что приведенные в таблице значения гель-фракции эпоксидных полимеров (содержание сшитой части полимера) не достигают 100 %. Несшитая часть эпоксидного полимера обеспечивает ориентацию дипольных групп или сегментов макромолекул во время воздействия внешнего электрического поля, сохраняя тем самым способность материала к поляризации практически до окончания процесса отверждения. Высокое содержание гель-фракции обеспечивает сохранение поляризованного состояния на протяжении длительного срока хранения (эксплуатации) материала. Можно также предположить, что наличие несшитой части способствует доориентации частиц графита параллельно плоскости трения при работе изделия и, следовательно, понижению коэффициента трения материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, комплексный подход, объединяющий выбор матрицы, введение наполнителя и наложение постоянного электрического поля в процессе отверждения, позволит существенно повысить износостойкость эпоксидных покрытий, что продлит срок их службы и расширит сферы практического применения.

Введение 4 мас. % графитового наполнителя в эпоксидную композицию незначительно упрочняет материал и существенно (в ~3, 4 раза) снижает статический и кинетический коэффициенты трения за счет формирования самосмазывающегося слоя.

Отверждение эпоксидных композитов в постоянном электрическом поле вызывает ориентированную поляризацию полимерной матрицы и ориентацию графитовых частиц, что ведет к повышению твердости материала на 2...5 % и снижению коэффициента трения на 25 %.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена за счет предоставленного в 2024 году Академией наук Республики Татарстан гранта № 5208 на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

ЛИТЕРАТУРА

1. Unnikrishnan K.P., Thachil E.T. Toughening of Epoxy Resins // *Designed Monomers and Polymers*. 2006. V. 9. № 2. P. 129–152.
2. Ковалева Е.Г., Радоуцкий В.Ю. Эпоксидные полимеры в строительстве: проблемы и перспективы // *Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова*. 2011. № 2. С. 39–42.
3. Колганов А.В. Наливные полы для промышленного и гражданского строительства // *Инженерные исследования*. 2021. № 1 (1). С. 33–37.
4. Xia S.Q., Wang L.G., Wang E.Z., Yue X. Study on the Wear Resistance of Al₂O₃ Particles Reinforced Epoxy Resin Composite Coating // *Advanced Materials Research*. 2013. V. 821. P. 1148–1151.

5. Ibrahim M.M., El-Tayeb N.S.M., Shazly M., El-Sayed Seleman M.M. An Experimental Study on the Effect of Graphite Microparticles on the Mechanical and Tribological Properties of Epoxy Matrix Composites // *Functional Composite Materials*. 2024. V. 5. № 1. P. 1–13.
6. Fuseini M., Zaghloul M.M.Y., Abakar D., Zaghloul M.M.Y. Review of Epoxy Nano-filled Hybrid Nanocomposite Coatings for Tribological Applications // *FlatChem*. 2025. V. 49. P. 100768.
7. Song L., Jiang T., Yu H., Zhou Y., Cao X., Wang P., Zhang B., Yu Z., Pan K., Wei S. Research Progress on the Tribological Properties of Epoxy-based Solid-lubricating Composites // *Polymer composites*. 2024. V. 45. № 18. P. 16452–16466.
8. Shan Z., Jia X., Li S., Li Y., Yang J., Fan H., Song H. Self-lubricating and Wear-resistant Epoxy Resin Coatings Based on the “Soft-hard” Synergistic Mechanism for Rapid Self-healing under Photo-thermal Conditions // *Chemical Engineering Journal*. 2024. V. 481. P. 148664.
9. Zhang. Z., Du Y., Zhu C., Guo L., Lu Y., Yu J., Parkin I.P., Zhao J., Guo D. Unprecedented enhancement of wear resistance for epoxy-resin graphene composites // *Nanoscale*. 2021. V. 13. № 5. P. 2855–2867.
10. Quraishi I.M., Chikalthankar S.B. Improving Wear Resistance of Epoxy Composites via Ceramic Nanoparticle Reinforcements by using Taguchi Technique // *Applied Science and Engineering Journal for Advanced Research*. 2025. V. 4. P. 18–25.
11. Мочалова Е.Н., Лимаренко Н.А., Галиханов М.Ф., Дебердеев Р.Я. Влияние количества отвердителя, температуры отверждения и поляризации на физико-механические характеристики эпоксисаманных клеевых композиций на основе олигомера DER-331 // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2016. № 6. С. 20–25.
12. Мочалова Е.Н., Галиханов М.Ф., Микрюкова Я.К. Электретные и прочностные свойства полимерных материалов на основе эпоксидного олигомера и аминных отвердителей // *Журнал прикладной химии*. 2019. Т. 92. Вып. 11. С. 1394–1400.
13. Musayev T.T., Mochalova E.N., Galikhanov M.F. Influence of the Nature of Curing Agents, Modifiers, and Fillers on the Functional Characteristics of Epoxy Polymers // *Construction Materials and Products*. 2025. № 8 (3). С. 1–21.
14. Фиалков А.С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. М.: Аспект-пресс, 1997. 717 с.
15. Galikhanov M. Corona Electrets Based on Filler-Loaded Polymers: Structure, Properties and Applications // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2022. V. 29. № 3. P. 788–793.
16. Ismayilova R.S., Kuliev M.M. Features of the Charge State of UHMWPE + α -SiO₂ Nanocomposites // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2020. V. 56. № 3. P. 267–271.
17. Godzhaev E.M., Magerramov A.M., Zeinalov S.A., Osmanova S.S., Allakhya-rov E.A. Coronoelectrets Based on Composites of High Density Polyethylene with a TlGaSe₂ Semiconductor Filler // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010. V. 46. № 6. P. 615–619.

Для цитирования: Галиханов М.Ф., Мочалова Е.Н., Мусаев Т.Т. Повышение механических и трибологических характеристик эпоксидных покрытий с введением графитового наполнителя и отверждением в постоянном электрическом поле // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 1 (29). С. 26–34.

IMPROVING THE MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF EPOXY COATINGS WITH THE INTRODUCTION OF GRAPHITE FILLER AND CURING IN A CONSTANT ELECTRIC FIELD

M.F. GALIKHANOV¹, Dr. Sc., E.N. MOCHALOVA^{1, 2}, Cand. Sc.,
T.T. MUSAEV^{1, 2}, Postgraduate

¹Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences,
20, N.E. Bauman St., 420111, Kazan, e-mail: mgalikhanov@yandex.ru

²Kazan National Research Technological University,
68, K. Marx St., 420015, Kazan, e-mail: enmochalova@mail.ru

The effect of the curing conditions of epoxy composites based on epoxy resin DER-331 and modified amine hardener L-20 and the introduction of a dispersed graphite filler on their mechanical and tribological properties is investigated. It has been experimentally shown that curing using an electric field leads to the orientation of polar groups and filler particles, which additionally increases hardness and reduces friction coefficients by 25%. Introduction of 4 wt. % graphite provides a significant reduction in the coefficient of friction and a slight hardening of the material, which improves its wear resistance. An integrated approach combining the choice of a matrix, the use of a filler and the application of a constant electric field during the curing process will increase the wear resistance of epoxy coatings, which will extend their service life and expand the scope of practical application.

Keywords: epoxy resin, modified amine hardener, graphite, polarization, coefficient of friction, strength, hardness.

Поступила в редакцию/received: 29.10.2025; после рецензирования/revised: 01.11.2025;
принята/accepted: 05.11.2025

УДК 621.891

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-1-34-46

АНАЛИЗ ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕЙ КЕРАМИКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

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

В статье теоретически и экспериментально исследованы фрикционные свойства композиционного материала, представляющего собой керамическую матрицу из оксидов алюминия, легированную микродисперсными алмазами. Рассмотрены контактное взаимодействие и фрикционные характеристики данного материала в условиях упругого контакта микронеровностей в процессе установившегося режима изнашивания и при хрупком разрушении поверхностей в области высоких давлений. Результаты триботехнических испытаний подтвердили хорошие антифрикционные

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 1 (29), 2026*

характеристики алмазосодержащего керамического материала в условиях сухого трения, что поясняется наличием в составе материала графита, играющего роль твердой смазки. Проведен подробный анализ влияния гранулометрических характеристик и концентрации алмазных зерен на микропрочность, критическое давление, коэффициент трения исследуемых поверхностей. Даны рекомендации по практическому применению деталей из алмазосодержащего керамического материала в трибоузлах наукоемкой техники.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, алмазосодержащий керамический материал, твердосмазочный материал, антифрикционные свойства, микропрочность, трение, износ.

ВВЕДЕНИЕ

Керамические элементы узлов трения все чаще используются в ответственных механизмах современной техники, что обусловлено их достаточно высокими противоизносными, прочностными, антикоррозионными, теплотехническими свойствами [1, 2]. Однако для ответственных трибоузлов, эксплуатируемых в условиях сухого трения, ограниченного количества смазочного материала, или при продолжительном отсутствии технического обслуживания необходимо применять материалы, обладающие также эффектом твердой смазки.

Наиболее часто в качестве материалов, характеризующихся низким сопротивлением сдвига, применяются полимерные материалы, графит или дисульфид молибдена. Их используют в качестве покрытия на поверхности трения готовой детали (как правило, смешивая с различного рода связующими, также обладающими антифрикционными свойствами) либо в качестве наполнителей керамической матрицы. В результате исследований нами был синтезирован композит, в котором в керамическую матрицу из оксидов алюминия включены зерна микродисперсного алмаза, частично графитизированного в процессе формирования материала. В данном композите прочностные, теплотехнические и прочие свойства керамической матрицы дополнены антифрикционными свойствами дисперсных алмазов [3, 4] и графитовых пленок. Согласно разработанной технологии, алмазосодержащий керамический материал (АКМ) синтезируется на поверхности композиционной детали алюминиево-алмазного состава методом микродугового оксидирования (МДО) [5, 6].

Проведенные предварительные исследования показали, что получен инновационный материал, который в зависимости от зернистости алмаза обладает как абразивными, так и антифрикционными свойствами [5]. При оценке фрикционных характеристик данного материала, легированного алмазами с зернистостью <20/14, получены неоднозначные результаты: при увеличении давления в зоне трения стабильно низкие значения износа резко увеличиваются. Можно предположить, что определенная нагрузка для данного материала является критической, при которой происходит изменение вида деформирования микронеровностей: усталостный износ при упругом контактировании сменяется хрупким разрушением, характерным для керамик [7–10].

Для керамических материалов одним из критериев критической нагрузки, соответствующей разрушению, выступает микропрочность. В связи с тем, что разработанный нами материал является композиционным, возникает вопрос о правомерности применения данного критерия. В исследовании О.И. Пушкарева [11] обоснована возможность использования понятия «микропрочность» для описания свойств материалов с дискретностью частиц в диапазоне 250...400 мкм.

Основные положения модели упругого контактного взаимодействия поверхностей материалов «алмазосодержащая керамика – керамика» рассмотрены нами в работе [10], но теоретические зависимости фрикционных характеристик данной пары материалов в условиях хрупкого разрушения исследованы недостаточно. Дополнительные экспериментальные исследования позволят определить область рациональных нагрузок для алмазных керамических узлов, эксплуатируемых в условиях дефицита или отсутствия жидких смазочных материалов. Анализ влияния составляющих АКМ (размера и дисперсности алмазов) позволит целенаправленно синтезировать детали трибоузлов с заданными свойствами и определить области оптимального применения разработанного материала.

Цель исследования состоит в экспериментальном анализе математической модели фрикционных свойств алмазосодержащей керамики и разработке на основе этого рекомендаций по получению и внедрению в промышленность инновационных материалов и покрытий, полученных по предложенной технологии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения экспериментов из алюминиевой пудры и синтетических алмазов марки АС-6 с различными гранулометрическими характеристиками методом порошковой металлургии были синтезированы заготовки испытуемых образцов [5]. Алюминиевая пудра и дисперсные алмазы были тщательно смешаны и помещены в пресс-форму. В образцах варьировались зернистость алмазов d и их концентрация K . Далее материал подвергался холодному брикетированию и последующему спеканию в муфельной печи при температуре 570...575 °С в условиях вакуума в течение 30...40 мин. Этот этап обеспечил формирование однородной структуры композита с оптимальными физико-механическими свойствами.

На втором этапе поверхность композиционного материала была модифицирована методом МДО. Процесс протекал при плотности тока 10 А/дм² в присутствии электролита, состоящего из гидроксида натрия (NaOH), концентрация 0,5...3 г/л, и жидкого стекла (Na₂SiO₃), концентрация 6 г/л. В результате этого процесса был сформирован упрочненный слой, включающий в себя оксиды алюминия α -, β - и γ -модификаций, в матрице которых равномерно распределены зерна частично графитизированного дисперсного алмаза. Для оценки достоверности результатов испытаний керамическое покрытие аналогичного состава, но без алмазов было сформировано на поверхности алюминиевого сплава Д16.

Триботехнические исследования проводились на машине трения МТ-2 по схеме трения «палец – кольцо», контробразец цилиндрической формы был изготовлен из электротехнической керамики BaO-SiO₂-Al₂O₃. Эксперименты осуществлялись в отсутствие смазочного материала и в присутствии воды как смазочной среды. Линейная скорость скольжения составляла 0,75 м/с.

Коэффициенты τ_0 и β определялись в соответствии с методикой, предложенной в патенте [12]. Оценка микрогеометрии фрикционных поверхностей проводилась с применением стандартных методов профилометрии, регламентированных ГОСТ 19300-86. Анализ микроструктуры осуществлялся с помощью металлографического микроскопа, а микропрочность оценивалась методом микротвердометрии на установке ПМТ-3 с использованием пирамиды Виккерса в качестве индентора.

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ИЗНОСА АНТИФРИКЦИОННОЙ КЕРАМИКИ

При построении модели использовано представление о молекулярно-механической теории трения [13, 14]. С учетом того, что взаимодействуют керамические материалы, принят линейно-упругий характер деформирования микронеровностей в установившемся режиме трения и преимущественно хрупкое разрушение материалов при превышении некоторого критического давления. Используются понятия «эквивалентная поверхность», «опорная кривая». Поверхность керамического алмазосодержащего материала моделируется в виде полупространства с распределенными сферическими сегментами одинакового радиуса R , которое представляет собой комбинацию из материала керамической связки и включенных в нее микродисперсных алмазов с объемной плотностью τ . С учетом значительной толщины упрочненного керамического слоя при построении модели использованы формулы, полученные Герцем [15], а также принято, что взаимное влияние микронеровностей незначительно [14].

Упругое сближение контактирующих поверхностей получено в виде

$$a_y = R_p \left[\frac{1,5\pi q_a I_e}{t_m \nu (\nu - 1) K_3} \left(\frac{R}{R_p} \right)^{0,5} \right]^{\frac{1}{\nu + 0,5}}, \quad (1)$$

где q_a – номинальное давление в контакте; R_p , t_m , ν – параметры шероховатости взаимодействующих поверхностей [14]; K_3 – коэффициент, характеризующий опорную кривую [14]; $I_e = \left(\frac{I_a I_c}{\tau I_c + (1 - \tau) I_a} \right)$ – эквивалентная упругая постоянная; $I_a = \frac{1 - \mu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \mu_k^2}{E_k}$, $I_c = \frac{1 - \mu_c^2}{E_c} + \frac{1 - \mu_k^2}{E_k}$ – упругие постоянные контактов алмаз – контробразец, связка – контробразец; E_a , E_c , E_k – модули упругости материалов алмаза, матрицы и контробразца, μ_a , μ_c , μ_k – коэффициенты Пуассона материалов алмаза, керамической связки и контробразца.

Выразив нагрузку на единичную микронеровность при давлении на нее равном микропрочности согласно [15] и используя формулу (1), рассчитали величину критического номинального давления, при котором преимущественно упругое взаимодействие сменяется хрупким разрушением:

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

где σ – микропрочности материала [11].

Для коэффициентов трения при упругом контакте f_y и хрупком взаимодействии f_x в области закритических давлений получено:

$$f_y = \frac{\tau_0 \sqrt{t_m} (\pi \delta I_e)^{\frac{2\nu}{2\nu + 1}}}{2 \Delta^{\frac{\nu}{2\nu + 1}} q_a^{\frac{1}{2\nu + 1}}} + \beta + 0,19 \alpha_c \frac{t_m \Delta^{\frac{\nu}{2\nu + 1}} \delta^{\frac{\nu + 1}{2\nu + 1}}}{0,75(\nu + 1)} \left(\frac{q_a I_e}{\pi} \right)^{\frac{1}{2\nu + 1}}, \quad (3)$$

$$f_x = \frac{\tau_0}{\nu \sigma} + \beta + 0,19 \alpha_c \frac{1,5 \sqrt{\Delta}}{\delta \nu} \left(\frac{2 q_a}{t_m \sigma \nu} \right)^{\frac{1}{2\nu}}, \quad (4)$$

где $\Delta = \frac{R_p}{R}$, $\delta = \frac{1,5}{\nu(\nu-1)K_3}$; τ_0 и β – сдвиговое сопротивление молекулярной связи при отсутствии нормальной нагрузки и коэффициент упрочнения молекулярной связи. Коэффициент гистерезисных потерь α_2 принят равным 0,02 исходя из предположения, что при фрикционном изнашивании хрупких и высокопрочных материалов вклад пластических деформаций пренебрежимо мал [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные в результате испытаний интенсивность изнашивания и коэффициент трения в условиях граничного трения представлены на рис. 1. Интенсивность изнашивания остается постоянной и достаточно низкой при нагрузках до 8...10 МПа. При превышении некоторого значения q_a износ материалов резко увеличивается с увеличением нагрузки (рис. 1а). У керамического материала, имеющего алмазный наполнитель, интенсивность изнашивания ниже, чем у оксидного МДО-покрытия, сформированного на алюминиевом сплаве. Однако давление, соответствующее «катастрофическому износу» для алмазосодержащего материала, также ниже.

Коэффициент трения в присутствии смазки для исследуемых материалов аналогично интенсивности изнашивания незначительно меняется до некоторого критического давления, затем его величина существенно возрастает (рис. 1б). Зернистость алмаза d менее существенно влияет на коэффициент трения (рис. 1б, кривые 1, 2), чем его концентрация K (рис. 1б, кривые 1, 3). Коэффициент трения керамического покрытия, полученного только из оксидов алюминия, значительно выше (рис. 1б, кривые 1, 4), чем у исследуемого покрытия с антифрикционной добавкой из графитизированного алмаза. Полученные зависимости коэффициента трения в случае граничного трения для всех исследуемых материалов имеют экстремальный характер: коэффициент трения имеет минимальное значение при некотором давлении. Это согласуется с молекулярно-механической теорией трения для случая упругого контактного взаимодействия шероховатых поверхностей.

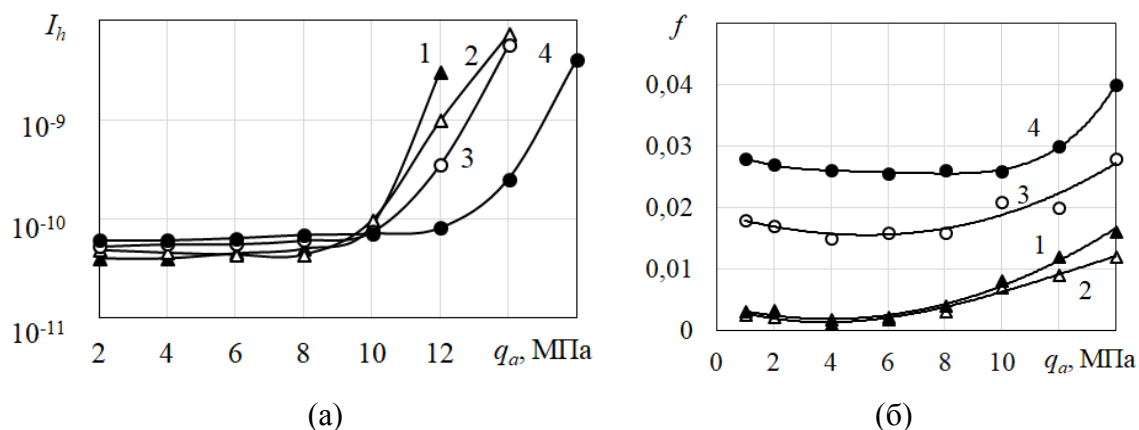


Рис. 1. Фрикционные характеристики керамических покрытий в присутствии смазки водой: интенсивность изнашивания (а); коэффициент трения (б); 1 – АМК: $d = 20/14$, $K = 100$; 2 – АМК: $d = 14/10$, $K = 100$; 3 – АМК: $d = 20/14$, $K = 50$; 4 – МДО Д16

Критическое давление, полученное экспериментально и рассчитанное по формуле (2), приведено в табл. 1. Там же указаны измеренные экспериментально микротвердость и микропрочность исследуемых образцов.

Таблица 1. Триботехнические свойства испытываемых материалов

№	Материал пары трения	Микропрочность σ , ГПа	Микротвердость H , ГПа	Критическое давление, МПа	
				Результаты эксперимента	Расчет по формуле (2)
1	АКМ $d = 20/14$, $K = 100$	1,78	6,71	6,4	5,71
2	АКМ $d = 14/10$, $K = 100$	1,96	6, 62	6,2	5,65
3	АКМ $d = 20/14$, $K = 50$	2,25	5,83	7,5	6,47
4	МДО Д16	2,68	16,48	11,0	10,16

Применение алмазов более низких фракций ведет к возрастанию микропрочности образцов, снижению их микротвердости и критического давления. Уменьшение концентрации алмазных зерен вызывает увеличение микропрочности, критического давления и снижение микротвердости.

Качественно характер зависимостей коэффициента трения без смазочного материала и в присутствии воды близок: стабильные значения f после приработки сменяются значительным возрастанием при превышении некоторого давления (рис. 2). Коэффициент трения в отсутствие смазки при давлении до 8 МПа для аналогичных по составу материалов увеличивается в несколько десятков раз. Наиболее существенно изменяется f для АКМ с максимальным объемным содержанием алмазов (см. рис. 1б и рис. 2, кривые 1 и 2). Несмотря на рост коэффициента трения для данных материалов, он при этом все же сопоставим со значением f для твердосмазочных материалов на основе фторопласта [13].

Коэффициент трения для алмазосодержащих материалов с одинаковой концентрацией алмазов, но разной зернистостью имеет практически одинаковое значение и близкую нагрузочную зависимость (рис. 2, кривые 1, 2). Снижение концентрации алмазных зерен существенно увеличивает коэффициент трения аналогично условиям граничного трения (см. рис. 1б и рис. 2, кривые 3). Установлено, что рост f при сухом и граничном трении для аналогичных материалов в случае закритической нагрузки в отсутствие смазки значительно меньше. Для материала с составом $d = 20/14$, $K = 100$ (см. рис. 1б и рис. 2, кривые 1) увеличение коэффициента трения при нагрузке выше q_{ax} снижается примерно в 3,5 раза. Для покрытия, сформированного на основе из материала Д16, этот параметр ниже приблизительно в 1,7 раза. Экстремальный характер зависимости коэффициента сухого трения исследуемых материалов не выражен, минимальная величина f в установившемся режиме трения не выявлена.

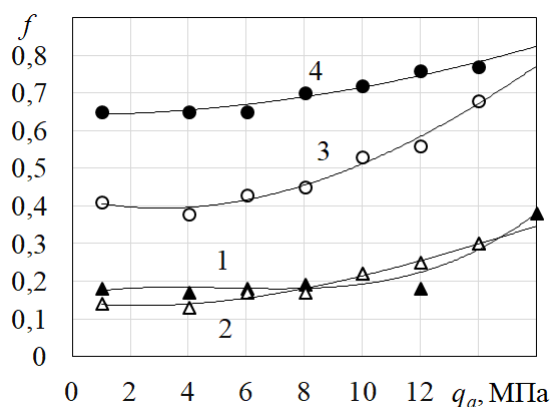


Рис. 2. Экспериментальные зависимости коэффициента трения керамических покрытий в отсутствие жидкой смазки: 1 – АКМ: $d = 20/14$, $K = 100$; 2 – АКМ: $d = 14/10$, $K = 100$; 3 – АКМ: $d = 20/14$, $K = 50$; 4 – МДО Д16

Результат сопоставления экспериментальных данных и расчета по формулам (3) и (4) приведен на рис. 3. Расчет приведен для условий сухого трения, так как согласно принятой методике фрикционные параметры τ_0 и β более корректно определялись именно в отсутствие смазки. В теоретической модели коэффициент трения при упругом взаимодействии выраженно уменьшается с ростом нагрузки, в зоне хрупкого разрушения влияние давления менее существенно. Можно сказать, что предложенные соотношения (3) и (4) удовлетворительно соответствуют результатам эксперимента.

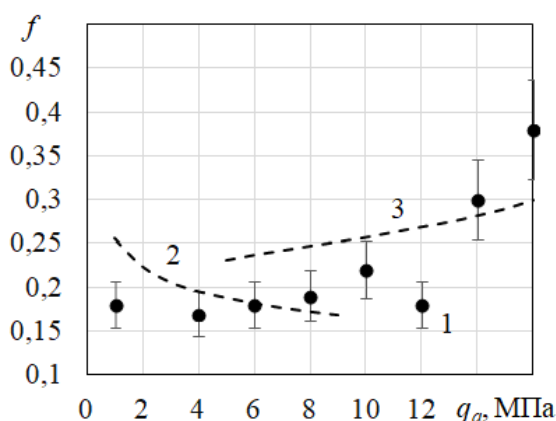


Рис. 3. Сопоставление экспериментального определения коэффициента трения и расчетной модели. 1 – АКМ: $d = 20/14$, $K = 100$; 2 – расчет по формуле (3); 3 – расчет по формуле (4)

ОБСУЖДЕНИЕ

1. Результаты испытаний подтвердили правильность предположения о линейно-упругом характере контакта композиционных материалов в установившемся режиме испытаний, а также о преимущественно хрупком разрушении взаимодействующих микронеровностей при превышении некоторой критической нагрузки.

2. Эффект твердой смазки, обусловленный наличием пленок графита, оказывает существенное влияние на снижение интенсивности изнашивания и коэффициента трения даже в присутствии водной смазочной среды. Особенно большое влияние

оказывает присутствующая в керамическом материале основа частично графитизированного алмаза на коэффициент граничного трения.

3. Теоретические значения критического давления, рассчитанные для нескольких различных по концентрации и зернистости алмазов образцов по формуле (2) с точностью до 15 %, соответствуют экспериментальным данным. На макроуровне процесс трещинообразования начинает сказываться при давлениях $q_a = 1,1 \dots 1,5 q_{ax}$.

4. При анализе влияния концентрации и зернистости алмаза на критическое давление необходимо оценить их воздействие на микропрочность. С увеличением объемной доли алмаза в композиционном материале уменьшается объем связующего материала матрицы, в ней возрастают внутренние напряжения, растет число концентраторов напряжений. Это приводит к снижению микропрочности. Можно сказать, что зернистость практически не влияет на q_{ax} . При увеличении зернистости алмаза увеличивается правый сомножитель в формуле (2), но микропрочность при этом снижается. Повышение концентрации алмазов приводит к снижению q_{ax} , так как уменьшается микропрочность композиционного материала.

5. Коэффициент трения при упругой деформации микронеровностей согласно результатам эксперимента и анализу формулы (3) мало зависит от размера алмазного зерна, но снижается с увеличением концентрации алмазов. Это вызвано возрастанием твердости поверхности композиционного материала и ростом графитовых твердосмазочных пленок. В условиях хрупкого разрушения размер алмазных зерен и их количество влияют на коэффициент трения через микропрочность материала (формула (4)). Так же зернистость (косвенно шероховатость) влияет на изменение коэффициента трения через показатель степени $\frac{1}{2\nu}$. Здесь ν изменяется в достаточно широких пределах (1,5...3) и определяется шероховатостью взаимодействующих поверхностей, способом предварительной обработки поверхности и размером алмазного зерна.

6. Согласно аналитической модели, давление в контакте по-разному влияет на коэффициенты трения при увеличении нагрузки. В зоне упругой деформации с увеличением нагрузки f_y снижается. В экспериментальных данных снижение выражено более слабо. При закритических давлениях (формула (4)) коэффициент трения возрастает с увеличением нагрузки, что вызвано ростом механической составляющей f_x . Результаты эксперимента подтверждают этот вывод.

7. На величину коэффициента трения во всем диапазоне нагрузок существенно влияют коэффициенты τ_0 , β и α_2 . Их значение во многом определяется наличием свободного графита в зоне трибоконтакта. Количество графита, образующегося в процессе оксидирования алмазно-керамической матрицы, коррелирует с объемом алмазных зерен в материале и возрастает при увеличении концентрации и зернистости алмазов. Можно отметить, что характер зависимостей коэффициента сухого и граничного трения во всем диапазоне нагрузок близок и имеет некоторое смещение по вертикальной оси. Очевидно, что на коэффициенты τ_0 , β и α_2 влияет вид смазки. В дальнейших исследованиях необходимо уделить большее внимание изучению данных параметров применительно к различным условиям трения АКМ.

8. Алмазосодержащий керамический материал показал значительно более высокие антифрикционные характеристики по сравнению с базовым МДО-покрытием, сформированным на сплаве Д16. Благодаря твердосмазочным свойствам графитовых пленок коэффициент трения в установившемся режиме для них ниже в 1,6...14,4 раза при трении со смазочным материалом и в 1,6...4,5 раза при работе без смазки. Во

многим за счет графитовой пленки наблюдается выглаженная до зеркального блеска поверхность образцов из АКМ после испытаний.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЛМАЗОСОДЕРЖАЩЕЙ КЕРАМИКИ

Практический интерес представляет применение результатов данного исследования в направлении создания и внедрения в промышленность инновационных материалов, изготовленных согласно предложенной технологии.

С ростом значимости глобальных проблем энергосбережения и защиты окружающей среды важно стремиться к снижению материалоемкости узлов трения при сохранении и повышении их износостойкости. Например в аэрокосмической, судостроительной промышленности важно максимальное снижение общей массы разрабатываемой конструкции за счет отдельных элементов. Антифрикционное алмазосодержащее покрытие на керамическом основании обеспечивает в условиях низких температур и вакуума длительное безаварийное функционирование узла.

Перспективно применение алмазосодержащих керамических покрытий, сформированных методом микроплазменного электролитического оксидирования вместо тяжелых металлических сплавов. В машиностроении трибоузлы из АКМ можно использовать для замены традиционных стальных деталей. При этом прогнозируется значительное увеличение износостойкости и материалоемкости [1, 3].

Известно традиционное применение в узлах трения деталей из вентильных металлов (алюминия, титана), упрочненных методом МДО (это подшипники скольжения, поршни, цилиндры, торцевые уплотнения и др.). Оксидное покрытие, несомненно, повышает износостойкость деталей, однако для некоторых критически важных отраслей, таких, например, как авиация, данного метода инженерии поверхности недостаточно для обеспечения заданного комплекса фрикционных характеристик [3]. В этом случае решением является использование деталей из алмазосодержащих композиционных материалов, модифицированных МДО до керамикоподобного алмазного антифрикционного покрытия. Применяемые в традиционном машиностроении детали пар трения, упрочненные электролитическим оксидированием и эксплуатируемые в условиях недостатка смазочного материала или сухого трения, могут быть заменены деталями из алмазосодержащих материалов с перспективой значительного снижения коэффициента трения.

Имеются данные о положительных результатах применения дисперсных алмазов в качестве твердой смазки для искусственных имплантатов [16]. Известно, что срок службы металлических имплантатов для тазобедренных и коленных суставов весьма ограничен вследствие износа и коррозии. Все компоненты АКМ нетоксичны и биосовместимы с человеческим организмом. Возможно, по результатам дополнительных исследований будет доказана применимость разработанного материала для решения этой проблемы.

Еще одним перспективным направлением использования деталей из АКМ является изготовление элементов колясок, костылей, тростей, протезов для людей с ограниченными возможностями здоровья. Традиционно применяемые детали из алюминиевых сплавов имеют низкую устойчивость к механическим повреждениям, слабую адгезию с лакокрасочными материалами, плохое сцепление с кожей ладоней и недостаточно инертны к ней. Детали из титановых сплавов, помимо их высокой стоимости, способны вызывать аллергические реакции. Элементы конструкций из

алмазосодержащей керамики повысят коррозионностойкость и биосовместимость деталей медицинских изделий, подвергающихся фрикционному воздействию.

Хорошие результаты показывает МДО-покрытие алюминиевых деталей для защиты от воздействия химически активных растворов, морской воды, экстремальных атмосферных воздействий и других агрессивных сред [17]. В случае если триботехнические характеристики поверхностей трения недостаточны, можно заменить материал деталей трибоузлов на антифрикционный АКМ.

Трибоповерхности узлов трения, изготовленные из АКМ и упрочненные микроплазменным электролитическим оксидированием, показывают весьма хорошие результаты в трибоузлах, смазываемых современными магнитными материалами [18]. Известно, что магнитные смазочные среды оказывают коррозионное воздействие на контактирующие поверхности, агломераты из магнитных частиц также абразивно изнашивают поверхности (микротвердость частиц магнетита около 5 ГПа) [19].

Нами получен положительный пример применения пары трения АКМ – керамика в качестве рабочего узла коллоидной мельницы (диспергатора). Сменные втулки из АКМ обеспечивали необходимую дисперсность измельчаемого материала – кристаллического бета-каротина, который, как ненасыщенный углеводород, характеризуется низкой устойчивостью к воздействию света, кислорода, высоких температур, pH среды, наличию ионов металлов. Таким образом, разработанный материал можно рекомендовать к использованию для изготовления фрикционных узлов современного оборудования фармацевтической, пищевой и химической отраслей.

Предложенная модель позволяет синтезировать АКМ с заданными триботехническими свойствами. На этапе проектирования можно варьировать зернистость (шероховатость) и концентрацию частиц алмазов для получения требуемого коэффициента трения при необходимой контактной нагрузке трибоузла.

По результатам моделирования можно будет предварительно, до проведения дорогостоящих натурных испытаний, оценить область устойчивой работы трибоузлов по величине контактного давления.

Модель может применяться для оценки фрикционных характеристик не только АКМ, но и других упругих двухкомпонентных композиционных материалов, а также композиционных материалов, полученных по иной технологии. Анализ физико-механических свойств материалов, входящих в соотношения (2)...(4), фрикционных параметров τ_0 , β и α_2 позволит целенаправленно подбирать структурные составляющие для создания новых композиционных материалов с заданными свойствами.

В предыдущих исследованиях авторы показали, что по аналогичной технологии можно получать не только антифрикционные, но и абразивные АКМ. Метод решения, основанный на молекулярной механической теории изнашивания, успешно применен в работе [10] для оценки работоспособности абразивного алмазосодержащего керамического материала. Этот факт подтверждает правомерность предлагаемого подхода, а также, по нашему предположению, означает, что полученный в настоящем исследовании результат можно применять для определения коэффициента трения абразивных материалов, которые очень широко востребованы в обрабатывающей промышленности. Данное предположение планируется проверить в предстоящих исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментальных исследований подтвердили фрикционную модель работоспособности АКМ. Проанализировано влияние нагрузки на изменение вида контактного взаимодействия: переход от упругого взаимодействия в установив-

шемся режиме к хрупкому разрушению микронеровностей в диапазоне интенсивных нагрузок. Подтверждена правомерность введения критерия микропрочности для расчета критического давления, соответствующего изменению вида контактного взаимодействия и вида износа.

Проведен подробный анализ влияния зернистости и концентрации алмазных зерен на микропрочность, критическое давление, коэффициент трения исследуемых поверхностей при упругом и хрупком деформировании. Полученные результаты помогут выбрать технологию получения и состав АКМ, который будет соответствовать условиям эксплуатации реального узла трения.

Показана важность дополнительного изучения трибологических параметров τ_0 , β и α_2 для описания износа трибоузла в условиях сухого и граничного трения. Установлено, что характер нагрузочных зависимостей коэффициента трения АКМ без смазочного материала и в присутствии воды совпадает, но отличается на порядок.

Результаты триботехнических испытаний АКМ подтвердили его достаточно хорошие антифрикционные характеристики в отсутствие смазки. Алмаз и графит, присутствующие в зоне трибоконтакта, снижают коэффициент трения в 1,6...4,5 раза по сравнению с МДО-покрытием на сплаве Д16 при сухом трении.

По результатам проведенных испытаний определена предполагаемая область применения деталей узлов трения из АКМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов Ю.Н. Обобщенные факторы для характеристики изнашивания технической керамики // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2004. № 3. С. 13–22.
2. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Твердосмазочные керамические покрытия с нано- и микродисперсным наполнителем // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2018. № 10. С. 150–158.
3. 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. Art. № 130010.
4. Гусаков Г.А., Гасенкова И.В., Мухуров Н.И., Шаронов Г.В. Исследование влияния термообработки на микротвердость и износостойкость покрытий из анодного оксида алюминия, модифицированных наноалмазами // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2019. Т. 64. № 2. С. 157–165.
5. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Минералокерамический композиционный материал: синтез и фрикционные свойства // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2020. Т. 22. № 3. С. 59–68.
6. 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.
7. 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.
8. Kim J.H., Choi S.G., Kim S.S. A Fracture Mechanics Approach to Wear Mechanism of Ceramics Under Non-conformal Rolling Friction // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2019. V. 20(6). P. 983–991.

9. Судник Л.В., Витязь П.А., Ильющенко А.Ф. Алмазосодержащие абразивные нанокomпозиты. Минск: Беларуская навука, 2012. 319 с.
10. 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.
11. Пушкарёв О.И., Кулик О.Г., Никуйко Л.А. Размерный эффект и его влияние на микромеханические свойства абразивных материалов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2017. Т. 83. № 2. С. 49–52.
12. Патент РФ 2525585. Способ определения коэффициента трения покоя поверхностного слоя электропроводящего материала / В.В. Измайлов, А.Ф. Гусев, Д.А. Гусев, И.Н. Нестерова, М.В. Новоселова. Заявл. 09.04.2013. Опубл. 20.08.2014, Бюл. № 23.
13. Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) М.: Машиностроение, 2003. 575 с.
14. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
15. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 510 с.
16. Gopal V., Chandran M., Rao M.S.R., Mischler S., Cao S., Manivasagam G. Tribocorrosion and Electrochemical Behaviour of Nanocrystalline Diamond Coated Ti Based Alloys for Orthopaedic Application // *Tribology International*. 2017. V. 106. P. 88–100.
17. Kuznetsov Yu.A., Markov M.A., Krasikov A.V. Formation of Wear-and Corrosion-resistant Ceramic Coatings by Combined Technologies of Spraying and Micro-arc Oxidation // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2019. V. 92. № 7. P. 875–882.
18. 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.
19. 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.

Для цитирования: Новикова О.О., Новиков В.В., Болотов А.Н. Анализ фрикционных свойств алмазосодержащей керамики и определение ее области применения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 1 (29). С. 34–46.

ANALYSIS OF THE FRICTION PROPERTIES OF DIAMOND-CONTAINING CERAMICS AND DETERMINATION OF THEIR APPLICATIONS

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

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

The paper theoretically and experimentally studies the frictional properties of a composite material, which is a ceramic matrix of aluminum oxides, doped with micro-dispersed diamonds. The contact interaction and frictional characteristics of this material

are considered under conditions of elastic contact of micro-irregularities in the process of steady-state wear and brittle fracture of surfaces in the high-pressure area. The results of tribotechnical tests confirmed the good antifrictional characteristics of the diamond-containing ceramic material under dry friction conditions, which is explained by the presence of graphite in the material, which acts as a solid lubricant. A detailed analysis of the influence of granulometric characteristics and diamond grain concentration on the microstrength, critical pressure, and friction coefficient of the studied surfaces was conducted. Recommendations are given on the practical application of parts made of diamond-containing ceramic material in tribo units of science-intensive equipment.

Keywords: microarc oxidation, diamond-containing ceramic material, solid lubricant material, antifriction properties, microstrength, friction, wear.

Поступила в редакцию/received: 07.11.2025; после рецензирования/revised: 12.11.2025;
принята/accepted: 17.11.2025

УДК 621.891

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-1-46-53

О РЕГРЕССИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЯХ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

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

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

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

На примере контакта твердых тел с первоначальным касанием в точке (контакт шар – плоскость) проанализировано соответствие известных в трибологии линейных зависимостей, описывающих фрикционное взаимодействие технических поверхностей: удельной силы трения от фактического контактного давления и силы трения от внешней нормальной нагрузки. Отмечена необходимость учета адгезионного взаимодействия контактирующих тел, которое может быть сравнимо с величиной внешней нормальной силы, действующей на контактное соединение. Показано, что линейной зависимости удельной силы трения от фактического контактного давления непосредственно соответствует нелинейная зависимость силы трения от внешней нормальной нагрузки. Тем не менее, в некотором диапазоне изменения последней эта зависимость хорошо аппроксимируется линейным уравнением, известным как двучленный закон трения Кулона. Приведено сравнение результатов экспериментального измерения сил трения с их расчетными значениями, которое показало их хорошее соответствие для испытанных металлических пар трения.

Ключевые слова: сила трения, удельная сила трения, закон трения Кулона, контактная адгезия.

ВВЕДЕНИЕ

В трибологии хорошо известны две линейные эмпирические зависимости, описывающие фрикционное взаимодействие контактирующих поверхностей деталей машин и механизмов [1, 2]:

1. На интегральном уровне (уровне сил) это закон трения Ш. Кулона, описывающий соотношение силы трения F_{mp} и внешней нормальной контактной нагрузки N :

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

где F_0 – сила трения в отсутствие нормальной нагрузки; f_c – коэффициент трения по Кулону. Наличие слагаемого F_0 в уравнении (1) связывают с адгезионным взаимодействием контактирующих тел. Если рассматривать уравнение (1) как уравнение регрессии зависимой переменной (отклика) F_{mp} на независимую переменную (предиктор) N , то коэффициенты F_0 и f_c определяются методами математической статистики и являются постоянными (не зависящими от нормальной нагрузки) величинами для данной пары трения;

2. На дифференциальном уровне (уровне напряжений) это соотношение удельной силы трения τ и фактического контактного давления p_r :

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

где τ_0 – удельная сила трения в отсутствие нормальных напряжений; β – так называемый пьезокоэффициент; p_r – фактическое контактное давление. Удельная сила трения $\tau = F_{mp} / A_r$ представляет собой среднее касательное напряжение в контакте трущихся тел, а фактическое контактное давление $p_r = N / A_r$ – среднее нормальное напряжение в контакте (A_r – фактическая площадь контакта).

Уравнение (2) также связано с именем Ш. Кулона, оно известно в механике горных пород [3] как кулоновский критерий разрушения среды. В механике связных грунтов [4] уравнение (2) используется в виде

$$\tau_{kp} = \operatorname{tg} \theta \cdot \sigma_n + c, \quad (3)$$

и предложено Кулоном для расчета прочности связных грунтов при сдвиге τ_{kp} как функции нормального напряжения σ_n через коэффициенты $\operatorname{tg} \theta$ и c . Величина $\operatorname{tg} \theta$ – тангенс угла трения θ – аналог коэффициента трения f_c , а постоянная c – аналог τ_0 .

Помимо горных пород и грунтов, уравнение (2) также применимо к металлам, что подтверждается многочисленными экспериментами, например, известными опытами П. Бриджмена [5].

Вместо уравнения (1), для описания фрикционного взаимодействия часто используется более простое одночленное соотношение сил в виде так называемого закона трения Г. Амонтона

$$F_{mp} = f_A \cdot N, \quad (4)$$

где f_A – коэффициент трения по Амонтону. Очевидно, что при отсутствии адгезионного взаимодействия в контакте ($F_0 = 0$) законы трения Кулона и Амонтона совпадают.

Однако при наличии адгезионного взаимодействия в контакте трущихся тел, характерного, например, для металлов, параметр $F_0 > 0$, и коэффициент трения по

Амонтону, определенный в соответствии с уравнением (4) как отношение силы трения к нормальной силе, зависит от нагрузки:

$$f_A = \frac{F_{mp}}{N} = \frac{F_0}{N} + f_c.$$

Информативность величины f_A в этом случае невелика, так как для расчета силы трения в каком-либо фрикционном соединении требуется располагать не одним конкретным числовым значением коэффициента трения, а функциональной зависимостью $f_A(N)$.

С физической точки зрения более ценно уравнение (2), так как оно содержит удельные фрикционные характеристики, присущие данной паре материалов трущихся тел в данных условиях эксплуатации и не зависящие от размеров контактирующих деталей. С метрологической точки зрения полезнее уравнение (1), так как экспериментально измерять силы гораздо проще, чем непосредственно напряжения, но параметры фрикционного взаимодействия, входящие в уравнение (1), не обладают общностью, поскольку зависят в том числе от размеров контактирующих тел.

В связи с вышесказанным цель данной работы заключалась в анализе методических аспектов перехода от интегральных характеристик фрикционного взаимодействия к дифференциальным и обратно на конкретных примерах пар трения.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Рассмотрим контакт двух твердых тел с первоначальным касанием в точке по схеме шар – плоскость. Такая конфигурация позволяет воспользоваться для учета адгезионного взаимодействия контактирующих тел моделью адгезионного контакта Б.В. Дерягина с соавторами (так называемая модель ДМТ, или ДМТ в латинской транскрипции) [6]. Согласно этой модели, радиус площадки контакта a рассчитывается по теории Герца, но помимо приложенной к контакту внешней нормальной нагрузки N при расчете учитывается сила адгезионного взаимодействия $N_{adg} = 2\pi r\gamma$:

$$a = \left[\frac{3}{4} \cdot \frac{r}{E^*} (N + 2\pi r\gamma) \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (5)$$

где r – радиус сферической поверхности; γ – энергия адгезии; 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.

На основании уравнения (5) можно записать для силы трения

$$F_{тр} = \tau \pi a^2 = \tau C N^{\frac{2}{3}}, \quad (6)$$

где τ – удельная сила трения; $N' = N + N_{adg}$; $C = \pi \left(\frac{3r}{4E^*} \right)^{\frac{2}{3}}$.

Фактическое контактное давление p_r можно представить в виде

$$p_r = \frac{N'}{\pi a^2} = \frac{(N')^{\frac{1}{3}}}{C}, \quad (7)$$

тогда из уравнений (2), (6) и (7) получим:

$$F_{mp} = \tau_0 C (N')^{\frac{2}{3}} + \beta N'. \quad (8)$$

В отличие от уравнения (1), зависимость (8) нелинейная. Однако она выражает зависимость силы трения от суммарной нормальной нагрузки N' (с учетом силы адгезии), тогда как закон трения Кулона выражает зависимость силы трения от внешней нормальной нагрузки N . В координатах F_{mp} , N зависимость силы трения от нормальной нагрузки хорошо аппроксимируется прямой линией, как это и выражает закон трения Кулона (рис. 1). Согласно рис. 1 сила трения $F_0 = 0,18$ мН, коэффициент трения $f_c = 0,25$. Сравнение расчетной зависимости с экспериментальными результатами приведено ниже.

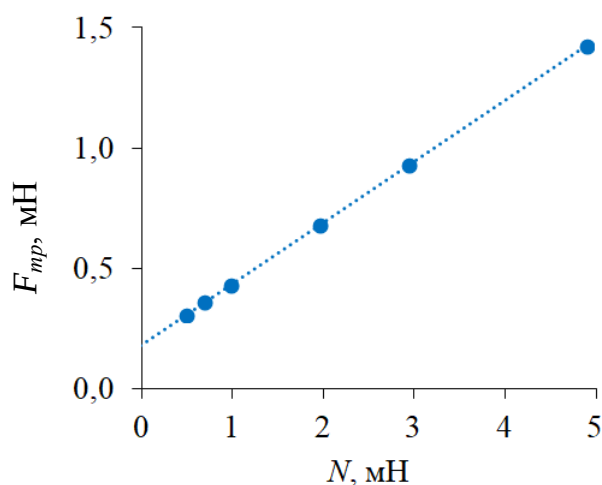


Рис. 1. Типичный вид расчетной зависимости силы трения от внешней нормальной нагрузки. Контакт стального шарового индентора с плоской медной поверхностью

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальное определение фрикционных характеристик различных пар трения проводили на микротрибометре [7] по схеме шар – плоскость, соответствующей приведенному выше теоретическому анализу. Материалы испытанных пар трения указаны в табл. 1.

Таблица 1. Исследованные пары трения

№ пары трения	Материалы контактирующих деталей	
	Плоская деталь	Шаровой индентор
1	Сплав Ni-Cr-B-Si (88 % Ni), лазерная наплавка [8]	Сталь ШХ15
2	Быстрорежущая сталь P6M5	Цирконий йодидный
3	Быстрорежущая сталь P6M5 [8]	Сплав ЗлМ800 (80 % Au, 20 % Cu)
4	Медь М1	Сталь ШХ15

Радиус шарового индентора $r = 0,5$ мм во всех парах трения. Внешняя нормальная нагрузка на контакт изменялась в диапазоне $N = 0,2 \dots 6$ мН. Шероховатость поверхности образцов Ra не более $0,16$ мкм. 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены сравнения экспериментальных зависимостей статической силы трения от внешней нагрузки и аналогичных расчетных зависимостей по описанной выше методике. Из рисунка видно, что как первые, так и вторые зависимости хорошо аппроксимируются линейной зависимостью (коэффициент корреляции R не менее $0,97$). Параметры удельной силы трения τ_0 и β , положенные в основу расчета интегральной статической силы трения $F_{тр}$, а также параметры расчетной и экспериментальной зависимости силы трения от внешней нормальной нагрузки (параметры закона Кулона F_0 и f_C) представлены в табл. 2. Расхождение расчетных и экспериментальных значений параметра F_0 в среднем составляет 21% , коэффициента трения f_C – 5% .

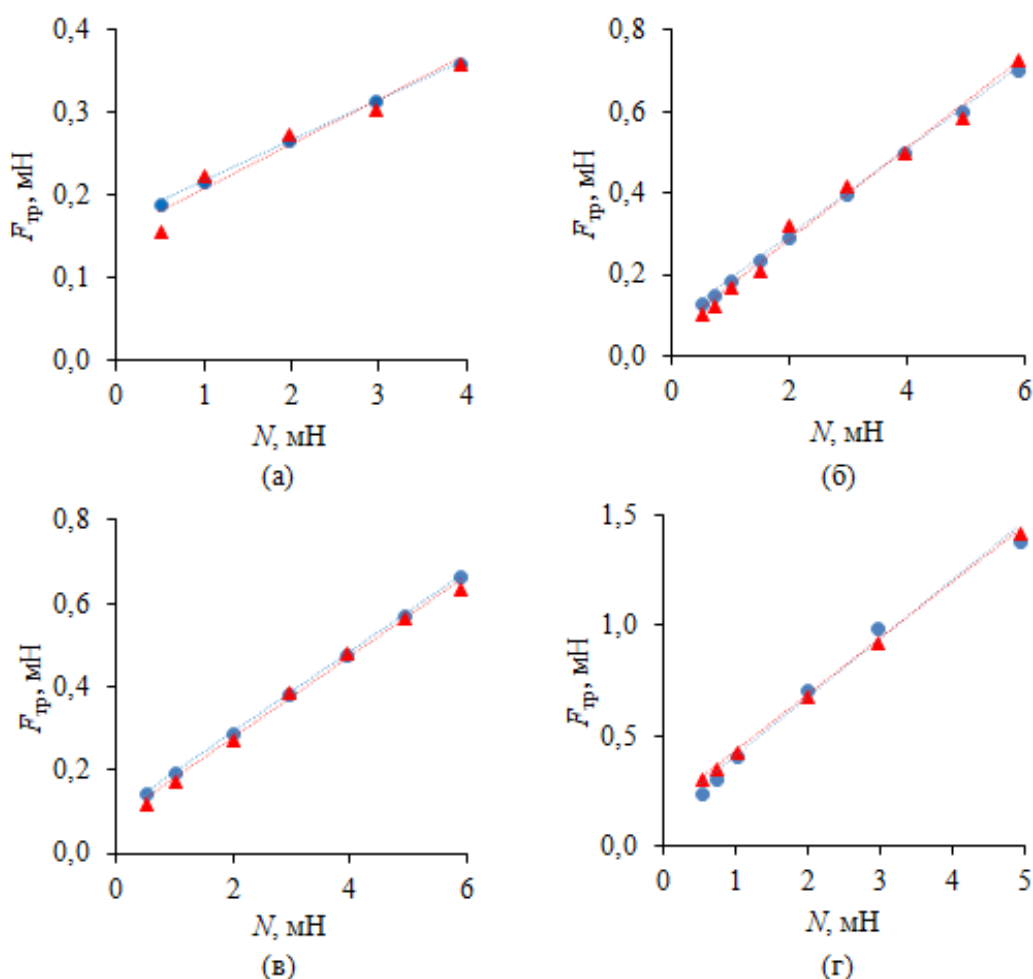


Рис. 2. Зависимости статической силы трения от внешней нормальной нагрузки на контакт для пар трения (см. табл. 1): пара № 1 (а); № 2 (б); № 3 (в); № 4 (г);

● – расчет, ▲ – эксперимент

Таблица 2. Фрикционные параметры исследованных пар трения

№ пары трения	Удельная сила трения			Интегральная сила трения			
				Расчет		Эксперимент	
	τ_0 , МПа	β	γ , Дж/м ²	F_0 , мН	f_c	F_0 , мН	f_c
1	10	0,020	0,70	0,17	0,049	0,16	0,053
2	4,5	0,087	0,17	0,085	0,11	0,063	0,11
3	1,4	0,090	0,30	0,10	0,096	0,084	0,097
4	1,0	0,25	0,22	0,18	0,25	0,15	0,26

Отдельного обсуждения заслуживает величина энергии адгезии γ . Поскольку она очень сильно зависит от состояния поверхности контактирующих тел (наличия физически и химически адсорбированных пленок, субшероховатости и других трудно учитываемых факторов), теоретически оценить ее весьма сложно. В данном случае оценку величины энергии адгезии можно провести из следующих соображений. Из уравнения (1) следует, что при внешней нормальной силе $N = -\frac{F_0}{f_c}$ сила трения равна нулю, т. е. адгезионное взаимодействие между контактирующими телами отсутствует (деформационной составляющей силы трения в описываемых экспериментах, как уже отмечалось, можно пренебречь). Модуль этой силы логично принять за силу адгезии $N_{адг} = \frac{F_0}{f_c}$. Аналогичным образом поступают в механике грунтов: нормальное давление σ , при котором сопротивление сдвигу связного грунта $\tau_{кр}$ обращается в нуль (см. уравнение (3)), называют давлением связности и расценивают как эквивалент сил сцепления частиц грунта [4].

Следуя DMT-модели адгезионного контакта (см. выше), по величине силы адгезии можно оценить величину энергии адгезии: $\gamma = \frac{F_0}{2\pi r f_c}$, где r – радиус шарового индентора. Полученные таким образом средние оценки для всех испытанных образцов следующие: для пары трения № 1 величина адгезии $\gamma = 0,68$ Дж/м²; № 2 – 0,18 Дж/м²; № 3 – 0,28 Дж/м²; № 4 – 0,18 Дж/м². Они согласуются с приведенными в табл. 2 значениями и, как показано в работах [9, 10], являются вполне реалистичными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере контакта твердых тел с первоначальным касанием в точке по схеме шар – плоскость проанализировано соотношение двух линейных корреляционных зависимостей фрикционных характеристик: на дифференциальном уровне (зависимость удельной силы трения от фактического контактного давления) и на интегральном уровне (зависимость силы трения от внешней нормальной контактной нагрузки). Показано, что при расчете зависимости силы трения от нормальной нагрузки $F_{тр}(N)$ на основании линейной зависимости удельной силы трения от фактического контактного давления $\tau(p_r)$ получается нелинейная функция, которая в некотором диапазоне нагрузок тем не менее хорошо аппроксимируется линейным уравнением, известным как закон трения Кулона. При этом в расчете, как правило, необходимо учитывать адгезионное взаимодействие контактирующих тел. Для контакта шар – плоскость, рассмотренного в статье, это можно сделать с помощью модели адгезионного контакта Б.В. Дерягина с соавторами (DMT-модель). Приведенные экспериментальные

результаты подтвердили адекватность таких расчетов для испытанных металлических пар трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хопин П.Н., Шишкин С.В. Трибология: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2021. 236 с.
2. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник. М.: ИНФРА-М, 2014. 336 с.
3. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352 с.
4. Ким М.С., Ким В.Х. Основы механики грунтов: учебное пособие. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 200 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. 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.
7. 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.
8. 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.
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. Мамонова М.В., Прудников В.В., Прудникова И.А. Физика поверхности. Теоретические модели и экспериментальные методы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 400 с.

Для цитирования: 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.

ON THE REGRESSION RELATIONSHIPS USED TO DESCRIBE THE FRICTIONAL INTERACTION OF ENGINEERING SURFACES

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

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

Using the initial point contact of solids (ball – plane contact) as an example, the correspondence between well-known tribological linear relationships describing the frictional interaction of technical surfaces is analyzed: the specific friction force dependence on the actual contact pressure and the friction force dependence on the external normal load. It is noted, that the adhesive interaction of contacting bodies, which can be compared with the

magnitude of the external normal force, has to be taken into account. It is shown that the linear dependence of the specific friction force on the actual contact pressure directly corresponds to the nonlinear dependence of the friction force on the external normal load. However, over a certain range of the latter's variation, this dependence is well approximated by a linear equation known as Coulomb's two-term friction law. A comparison of the experimental friction force measurements with their calculated values is provided, demonstrating good agreement for the tested metal friction pairs.

Keywords: friction force, specific friction force, Coulomb's friction law, contact adhesion.

Поступила в редакцию/received: 17.11.2025; после рецензирования/revised: 24.11.2025;
принята/accepted: 28.11.2025

УДК 621.791.92:621.891

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-1-53-61

О ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук,
М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

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

© Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., 2026

Исследованы фрикционные характеристики порошковой лазерной наплавки никелевого сплава: силы трения, коэффициента трения и удельной силы трения. Порошковую лазерную наплавку осуществляли последовательным нанесением трех слоев с использованием многоканального лазера. После наплавки поверхность покрытия дополнительно переплавляли на разных режимах лазерного излучения, изменяя условия кристаллизации сплава. В результате на всех образцах в поверхностном слое сформировалась однотипная микроструктура, различающаяся только размером структурных составляющих. Показано, что изменение режимов плавления поверхности покрытия в выбранном диапазоне не оказывает заметного влияния на фрикционные характеристики контакта стального индентора с поверхностью покрытия.

Ключевые слова: коэффициент трения, удельная сила трения, порошковая лазерная наплавка, многоканальный лазер, сплавы никеля.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение износостойкости материалов узлов трения является актуальной задачей трибологии. Технологические возможности лазерного модифицирования контактных поверхностей позволяют успешно решить указанную задачу путем нанесения наплавленных износостойких покрытий. Для этого широко используются различные присадочные материалы, например порошки состава Ni-Cr-B-Si [1–3]. Сплавы на основе никеля широко применяются в различных отраслях промышленности, таких как нефтегазовая, химическая, нефтехимическая, горнодобывающая, при производстве форм для стекла, для технического обслуживания и ремонта деталей машин [4–6].

Лазерные технологии позволяют управлять процессом структурообразования нанесенных покрытий, так как они обеспечивают контролируемый подвод тепла и подходят для деталей сложной геометрической формы [7–11]. Многие исследователи обнаружили, что износостойкость Ni-Cr-B-Si или аналогичных самофлюсующихся покрытий можно улучшить, применяя процесс переплавления нанесенных покрытий [7, 8]. Его обычно используют после различных напылительных технологий для улучшения структуры, уменьшения пористости, повышения качества связи между покрытием и подложкой.

Переплавление поверхности нанесенного порошковой лазерной наплавкой покрытия позволяет уменьшить шероховатость и сформировать микроструктуру, обеспечивающую улучшенный комплекс свойств [1, 12].

Цель данной работы – исследовать фрикционные характеристики поверхности порошковой наплавки Ni-Cr-B-Si на углеродистую конструкционную сталь в зависимости от режимов лазерной обработки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследования применялись образцы, полученные по технологии порошковой лазерной наплавки [12]. Материалом подложки служила углеродистая конструкционная сталь 30 (ГОСТ 1050-2013). Для наплавки использовались порошковые присадочные материалы системы Ni-Cr-B-Si. Слои присадочного материала расплавлялись непрерывным лазерным излучением с перекрытием валиков 30 %. Затем часть поверхности никелевого покрытия была переплавлена на режимах, представленных в табл. 1.

Таблица 1. Режимы лазерной обработки поверхности образцов сплава Ni-Cr-B-Si

№ образца	Состояние поверхности	Мощность, Вт	Скорость, мм/с	Диаметр пятна, мм
1	Исходная (наплавка)	2 300	5	6
2	После обработки по режиму 1	2 000	10	
3	После обработки по режиму 2	2 700	10	

Триботехнические характеристики определяли с помощью микротрибометра [13] по схеме шар – плоскость. Согласно этой схеме, гладкая плоская поверхность исследуемого покрытия контактирует с гладкой поверхностью сферического контробразца с известным радиусом кривизны r . В качестве контробразцов использовали индентор из стали ШХ15 ($r = 0,5$ мм).

Нормальная нагрузка N на контакт изменялась в диапазоне 0,49...5,88 мН. Измерение при одной нагрузке повторяли 10...20 раз.

Исследования микроструктуры проводили с помощью оптического металлографического микроскопа Carl Zeiss Axio Vert.A1MAT.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ микроструктуры. На рис. 1 представлено изображение шлифа полученного образца. Наплавка осуществлялась последовательным нанесением трех слоев. При лазерной наплавке первого слоя происходило расплавление присадочного материала и основы с формированием прочного соединения. В первом слое покрытия с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализа выявлено повышенное содержание железа до 7,0...23,5 % мас. на расстоянии до 600...700 мкм от линии

сплавления. Обогащение железом связано с конвекционным перемешиванием материалов подложки (углеродистой стали) и наплавки. Второй и третий слои наплавленного металла имеют химический состав, соответствующий исходному порошку, т. е. железа содержится около 4 % мас. В результате получено наплавленное покрытие толщиной около 2 мм.

На рис. 2 представлена микроструктура одного из исследуемых образцов. Наплавленный металл имеет дендритную структуру высокой дисперсности: матрицы γ – твердого раствора на основе никеля и некоторого количества упрочняющих боридов и карбидов. Такой тип структуры характерен для лазерных наплавов с использованием присадочных материалов системы легирования Ni-Cr-B-Si [10]. Дендриты ориентированы вдоль направления теплоотвода, эвтектика располагается в междендритных пространствах. Микроструктура наплавленного покрытия в области переплавления поверхности однотипная и отличается только размером структурных составляющих.

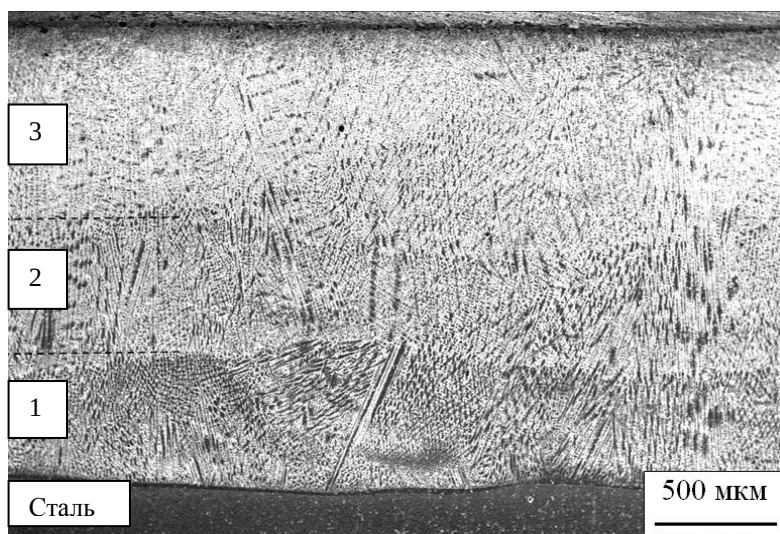


Рис. 1. Полученное растровой электронной микроскопией изображение поперечного шлифа покрытия. Цифрами 1, 2 и 3 отмечены наплавленные слои

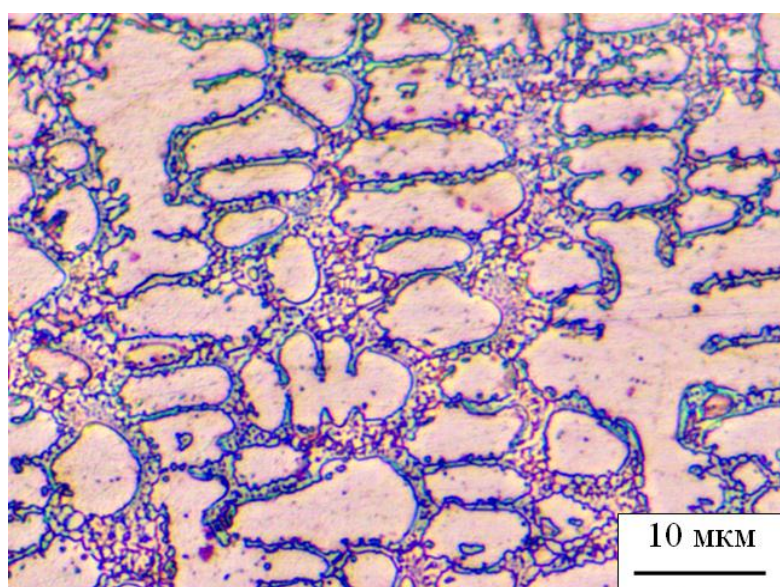


Рис. 2. Микроструктура покрытия Ni-Cr-B-Si. Оптическая микроскопия

Определение фрикционных характеристик. На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости статической силы трения $F_{\text{тр}}$ от нормальной нагрузки N для исследованных образцов. Все зависимости соответствует известному двучленному закону трения Ш. Кулона

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

где F_0 – статическая сила трения при $N = 0$; f_c – коэффициент трения по Кулону.

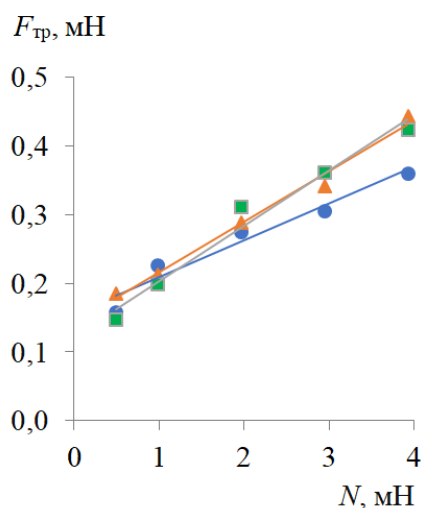


Рис. 3. Зависимости статической силы трения от нормальной нагрузки:

● – исходная; ▲ – по режиму № 1; ■ – по режиму № 2

Уравнение (1) можно рассматривать как уравнение линейной регрессии зависимой переменной $F_{\text{тр}}$ на независимую переменную N , параметры которой f_c и F_0 приведены в табл. 2. Все параметры статистически значимы. Обращают на себя внимание сравнительно большие значения параметра F_0 – статической силы трения при нулевой нормальной силе, приложенной к контакту. Такие значения свидетельствуют о существенном адгезионном взаимодействии в контакте поверхностей образцов сплава Ni-Cr-B-Si со стальным индентором. Следует также отметить малые значения коэффициента трения, нетипичные для контакта металлических поверхностей без смазочного материала.

Таблица 2. Фрикционные параметры поверхности образцов сплава Ni-Cr-B-Si

№ образца	Состояние поверхности	F_0 , мН	f_c	Коэффициент корреляции
1	Исходная (наплавка)	$0,156 \pm 0,017$	$0,053 \pm 0,007$	0,95
2	После обработки по режиму 1	$0,143 \pm 0,011$	$0,073 \pm 0,004$	0,97
3	После обработки по режиму 2	$0,123 \pm 0,019$	$0,081 \pm 0,007$	0,98

Значения коэффициента трения f_A , определенные в соответствии с ГОСТ 27674-88 «Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения» как

отношение силы трения $F_{\text{тр}}$ к нормальной силе N , приложенной к контакту, приведены на рис. 4 в зависимости от величины этой силы. Такое определение коэффициента трения соответствует другому известному в трибологии закону внешнего трения – закону Г. Амонтона:

$$F_{\text{тр}} = f_A N.$$

Непостоянство коэффициента трения по Амонтону сильно снижает его информативность и затрудняет его применение в расчетах узлов трения. Зависимость коэффициента трения по Амонтону от нормальной силы N , приложенной к контакту, объясняется наличием силы адгезионного притяжения контактирующих тел, особенно ощутимом при малых величинах нормальной силы. С ростом последней вклад силы адгезионного притяжения в общую величину контактной нагрузки уменьшается и значения коэффициента трения f_A приближаются к соответствующим значениям f_C .

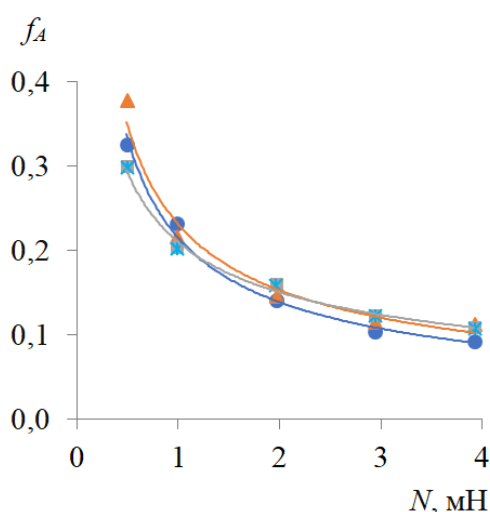


Рис. 4. Зависимости коэффициента статического трения по Амонтону от нормальной нагрузки: ● – исходная; ▲ – по режиму № 1; ■ – по режиму № 2

Используя корреляционную зависимость (1), перейдем к удельным характеристикам фрикционного взаимодействия – удельной силе трения и фактическому контактному давлению. Последнее характеризует среднее нормальное давление в контакте, тогда как удельная сила трения, по сути, представляет собой сдвиговую прочность (критическое напряжение сдвига) фрикционного контакта.

Радиус площадки контакта шарового индентора радиусом r с плоской поверхностью исследуемого образца на основании известного решения Г. Герца можно представить в виде

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

где N – нормальная нагрузка; E^* – эквивалентный модуль упругости, $E^* = \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$; E_1 и E_2 – модули упругости материалов индентора и образца;

μ_1 и μ_2 – соответствующие коэффициенты Пуассона. Тогда фактическое контактное давление определяется формулой

$$p_r = \frac{N}{\pi a^2} = \frac{1}{c} N^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

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

Удельная сила трения с учетом уравнения (1) определяется формулой

$$\tau = \frac{F_{тр}}{\pi a^2} = \frac{F_0}{c N^{\frac{2}{3}}} + \frac{f_c}{c} N^{\frac{1}{3}}. \quad (3)$$

Объединив уравнения (2) и (3), получим окончательную зависимость $\tau(p_r)$:

$$\tau = \frac{F_0}{c^3 p_r^2} + f_c p_r. \quad (4)$$

Зависимость (4) имеет минимум при $p_r = \frac{1}{c} \sqrt[3]{\frac{2F_0}{f_c}}$.

Примеры зависимости $\tau(p_r)$ при различных комбинациях параметров F_0 и f_c представлены на рис. 5. С ростом фактического давления зависимость $\tau(p_r)$ стремится к линейной $\tau = f_c \cdot p_r$.

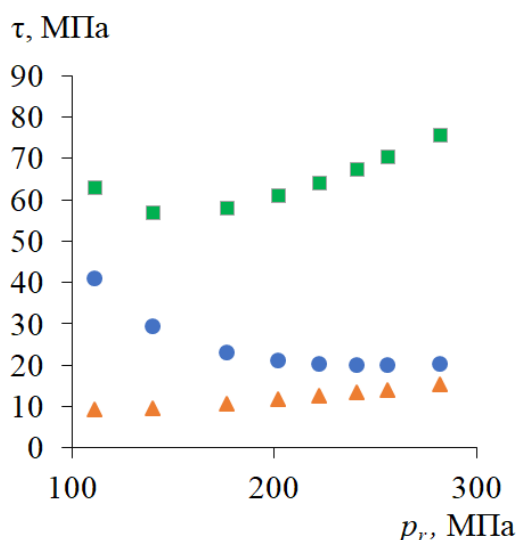


Рис. 5. Примеры зависимости удельной силы трения от фактического контактного давления: ● – $F_0 = 0,156$ мН, $f_c = 0,053$; ▲ – $F_0 = 0,0156$ мН, $f_c = 0,053$; ■ – $F_0 = 0,156$ мН, $f_c = 0,25$

На рис. 6 представлены экспериментальные результаты определения удельной силы трения в зависимости от фактического контактного давления для исследованных образцов (см. табл. 1). Расположение экспериментальных точек соответствует характеру теоретической зависимости (4). Значения удельной силы трения заключены в

диапазоне 20...40 МПа, что согласуется с типичными значениями для контакта металлических поверхностей без смазочного материала [14].

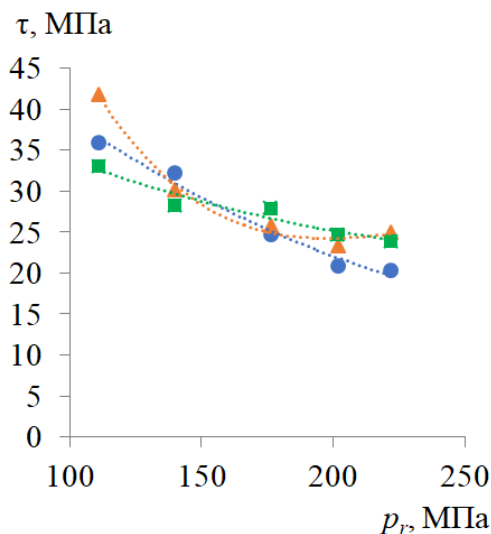


Рис. 6. Экспериментальные зависимости удельной силы трения от фактического контактного давления: ● – исходная; ▲ – по режиму № 1; ■ – по режиму № 2

Минимальные значения удельной силы трения в соответствии с уравнением (4) равны соответственно 20, 24 и 25 МПа для наплавки, после режимов № 1 и № 2.

В целом полученные результаты свидетельствуют о том, что исследуемое покрытие Ni-Cr-B-Si после наплавки и последующего плавления при различных режимах имеет близкие значения фрикционных характеристик (силы трения, коэффициента трения и удельной силы трения) в исследованном диапазоне контактных нагрузок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статическая сила трения в контакте стального шарового индентора с поверхностью исследованных образцов из порошкового сплава Ni-Cr-B-Si, нанесенных лазерной наплавкой на подложку из углеродистой стали, хорошо описывается двучленным законом трения Ш. Кулона, который выражает линейную зависимость силы трения от нормальной нагрузки на контакт. Сравнительно большая величина силы трения покоя, действующей между контактирующими телами при отсутствии приложенной к контакту внешней нормальной силы, свидетельствует о значительном адгезионном взаимодействии контактирующих поверхностей. При этом коэффициент трения покоя по Кулону имеет сравнительно небольшую величину (менее 0,1) и не зависит от нормальной нагрузки. В то же время переменный коэффициент трения по Амонтону (зависящий от нормальной нагрузки), равный отношению силы трения к нормальной силе, прижимающей тела друг к другу, ожидаемо превосходит коэффициент трения по Кулону (до 6 раз), стремясь к последнему с ростом нормальной нагрузки.

Существенного влияния режимов лазерной наплавки (см. табл. 1) на фрикционные характеристики контакта стального индентора с поверхностью образцов сплава Ni-Cr-B-Si не выявлено.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной поверхностной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. 376 с.
2. Balaguru S., Gupta M. Hardfacing studies of Ni alloys: A Critical Review // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. V. 10. P. 1210–1242.
3. Макаров А.В., Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю. Роль упрочняющих фаз в сопротивлении абразивному изнашиванию NiCrBSi покрытий, сформированных лазерной наплавкой // *Трение и износ*. 2017. Т. 38. № 4. С. 311–318.
4. Климов В.Г. Применение лазерной импульсной наплавки при разработке технологии восстановления рабочих лопаток турбины газотурбинного двигателя // *Вестник Московского авиационного института*. 2017. Т. 24. № 1. С. 170–179.
5. Афанасьева Л.Е., Сахаров К.А. Порошковая лазерная наплавка износостойкого композиционного покрытия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (21). С. 21–26.
6. Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е. Абразивная износостойкость хромоникелевого наплавленного покрытия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 3 (27). С. 34–41.
7. Serres N., Hlawka F., Costil S., Langlade C., Machi F. Microstructures of Metallic NiCrBSi Coatings Manufactured via Hybrid Plasma Spray and in Situ Laser Remelting Process // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2011. V. 20. № 1. P. 336–343.
8. Habib K.A., Cano D.L., Alvaro J.A.H., Serrano-Mira J., Llopis R., Moreno D.L., Mohammed S.S. Effects of Thermal Spraying Technique on the Remelting Behavior of NiCrBSi Coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2022. V. 444. P. 128669.
9. de Sousa J.M.S., Ratusznei F., Pereira M., de Medeiros Castro R., Curi E.I.M. Abrasion resistance of Ni-Cr-B-Si Coating Deposited by Laser Cladding Process // *Tribology International*. 2020. V. 143. P. 106002.
10. Afanasieva L.E., Pavlov I.S. Microstructure of the Deposited NiCrBSiC Coating after Laser Polishing // *Letters on Materials*. 2022. V. 12. № 4. P. 287–291.
11. Hemmati I., Ocelík V., Csach K., De Hosson J.T.M. Microstructure and Phase Formation in a Rapidly Solidified Laser-deposited Ni-Cr-B-Si-C Hardfacing Alloy // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2014. V. 45. № 2. P. 878–892.
12. Раткевич Г.В. Повышение износостойкости поверхностей трения модифицированием структуры сплавов лазерным излучением: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2021. 137 с.
13. 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.
14. 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.

Для цитирования: 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.

ON THE FRICTIONAL CHARACTERISTICS OF THE LASER-DEPOSITED NICKEL ALLOY SURFACE

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., AFANASIEVA L.E., Cand. Sc.,
M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

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

The frictional characteristics of powder laser cladding of a nickel alloy were studied, including friction force, friction coefficient, and specific friction force. Powder laser cladding was performed by sequentially depositing three layers using a multichannel laser. After cladding, the coating surface was further remelted using different laser radiation modes, varying the alloy crystallization conditions. As a result, a uniform microstructure formed in the surface layer of all samples, differing only in the size of the structural components. It was shown that varying the coating surface melting modes within the selected range does not significantly affect the frictional characteristics of the contact between the steel indenter and the coating surface.

Keywords: friction coefficient, specific friction force, powder laser cladding, multichannel laser, nickel alloys.

Поступила в редакцию/received: 04.12.2025; после рецензирования/revised: 10.12.2025;
принята/accepted: 15.12.2025

УДК 621.941.229.3

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-1-61-66

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТАНОВКИ ВАЛА С КОНИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ НА ЦЕНТРАХ СТАНКА

А.П. АРХАРОВ, канд. техн. наук

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

© Архаров А.П., 2026

В работе приведен анализ известных способов и средств технологического оснащения для установки заготовок в виде валов на металлорежущих станках. Выявлены их достоинства и недостатки. Раскрыта сущность усовершенствованных способа и патрона для установки валов, содержащих коническую поверхность, на центрах станка. Проведено их сравнение по существенным признакам с аналогичными известными решениями. Отражен достигаемый при использовании предложенного усовершенствования технический результат.

Ключевые слова: вал, установка, способ, патрон, зажимные элементы, коническая поверхность, технологические возможности, упорные центры.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих изделиях машиностроения используются валы с различными конструктивными элементами в виде цилиндрических, конических и резьбовых поверхностей, канавок, шлиц и т. п. [1]. При обработке заготовок таких деталей на металлорежущих станках применяют различные способы их установки. Наиболее распространенным способом является установка заготовки на центрах станка с обеспечением передачи ей крутящего момента от шпинделя [2], что достигается при помощи хомутика, закрепляемого на одной из поверхностей заготовки, и поводкового патрона, устанавливаемого на шпинделе станка [3, 4]. Достоинством таких технологических средств является их простота. Однако установка и снятие хомутика, выполняемые вручную, увеличивают трудоемкость операции и делают невозможными автоматические загрузку, разгрузку и переустановку заготовки на технологическом оборудовании.

Передавать заготовке крутящий момент можно также с помощью рифленых центров, поводкового патрона со штырями на его колпачке [5] либо поводкового патрона с зубьями на его поводковой шайбе [6]. Эти способы характеризуются общим признаком, а именно способностью рифлений, зубьев или штырей вдавливаться в прилегаемую поверхность при давлении на них заготовкой во время ее установки на центрах, а в процессе обработки – передавать крутящий момент. Применение патронов с зубьями или штырями ухудшает качество детали, а использование рифленых центров приводит к деформации центровых отверстий заготовки и исключает возможность задействовать их в последующих операциях.

Для уменьшения деформаций заготовки из-за неодновременного начала ее закрепления кулачками применяют способ [7] и патрон с переменным характером движения его кулачков в радиальном направлении [8]. Однако они позволяют закреплять заготовку только за цилиндрическую поверхность.

В случае установки заготовки на центрах станка и необходимости закрепления ее за коническую поверхность используется способ [9] с применением кулачкового механизированного патрона с осевым переменным движением кулачков [10]. Однако данный способ и патрон не подходят для закрепления валов с разными углами конуса конической поверхности. С целью устранения указанного недостатка требуется разработка нового способа и патрона. Этой задаче и посвящена данная работа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При исследовании применялся структурный анализ выявленных в научной литературе и патентной документации, а также используемых на практике методов и средств для установки валов на технологическое оборудование. При разработке усовершенствованных способа и патрона применялся синтез таких признаков технологических методов и средств, которые в совокупности позволят создать единое целое, отвечающее поставленной задаче и критерию оригинальности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

За базовый вариант для разрабатываемого способа был принят способ установки вала с конической поверхностью на центрах станка, в котором используется кулачковый патрон с передним упорным центром, а заготовку

закрепляют за коническую поверхность путем переменного движения кулачков в осевом направлении [9].

В разработанном способе выполняют следующие переходы. Механизированный патрон с поворотными зажимными элементами и передним упорным центром устанавливают на шпиндель передней бабки станка, а задний упорный центр – в пиноль задней бабки станка. Размещают вал, содержащий наружную коническую поверхность, на упорные центры, располагая его вершиной упомянутой поверхности в направлении к переднему упорному центру. Затем сообщают зажимным элементам переменные перемещения вдоль оси центров в направлении к конической поверхности вала вдоль линии центров. При этом зажимные элементы прижимают одними их рабочими поверхностями к торцу вала, а другими – к конической поверхности за счет продолжающегося перемещения и поворота этих элементов. Приостанавливают перемещение того зажимного элемента, который первым выполнит прижатие к валу, и возобновляют его после прижатия к валу обеих рабочих поверхностей другого элемента. Завершают способ одновременным закреплением вала обоими элементами за две его поверхности: коническую и торцовую.

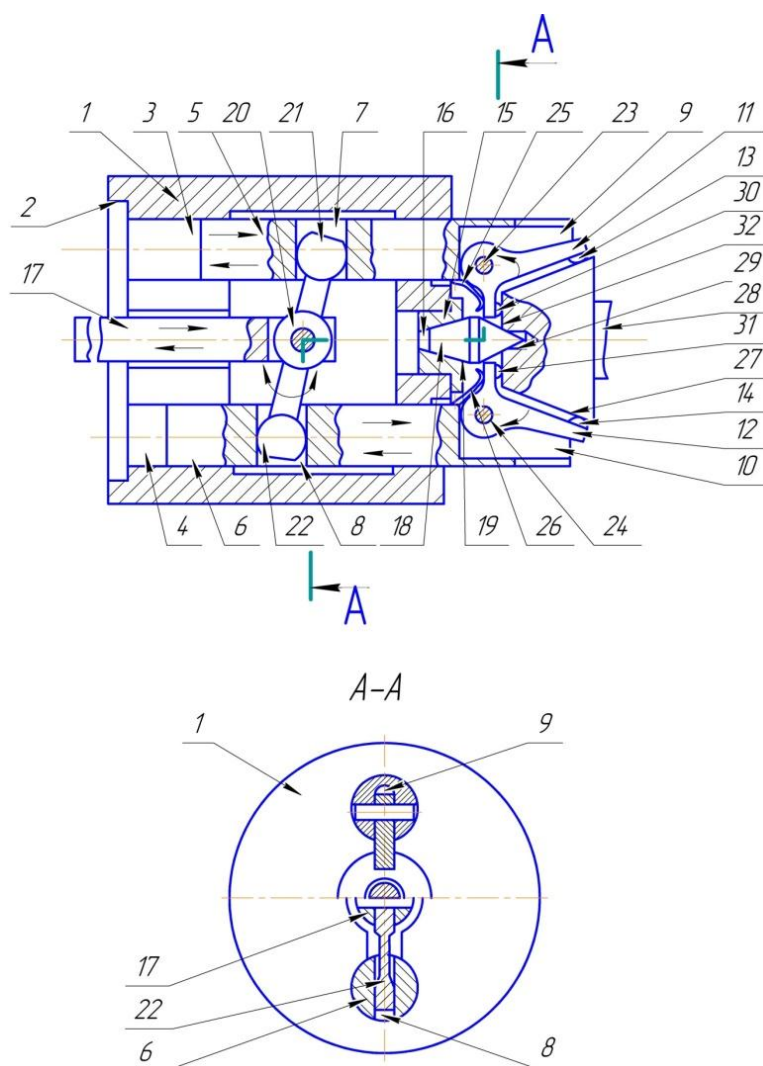
Использование механизированного патрона с поворотными зажимными элементами и с возможностью взаимодействия их с торцом вала позволяет упомянутым элементам после прижатия их к торцу поворачиваться и тем самым прилегать к конической поверхности независимо от ее диаметра и угла конуса. Это расширяет технологические возможности способа.

Кроме того, прижатие зажимных элементов к торцу вала обеспечивает его дополнительное закрепление за упомянутый торец, что повышает надежность установки вала с конической поверхностью. Способ позволяет также закреплять вал за наклонные поверхности с разными углами их наклона.

Для осуществления разработанного способа необходим механизированный патрон с переменным характером движения зажимных элементов в осевом направлении и с их поворотами вокруг осей, перпендикулярных оси центров станка. При разработке такого патрона за основу был взят патрон, в котором используется механизм преобразования осевых перемещений штока привода в переменные перемещения зажимных элементов в направлении, параллельном оси центров [10].

Спроектированный патрон (рисунок) содержит корпус 1 с центрирующим поясом 2, выполненным на первом его торце, и с отверстиями 3 и 4, цилиндрические стержни 5 и 6 с продольными окнами 7 и 8 и продолговатыми пазы 9 и 10 соответственно, зажимные элементы в виде качалок 11 и 12 с рабочими поверхностями 13 и 14, фланец 15 с коническим отверстием 16, шток 17, упорный центр 18 с присоединительным конусом 19, двуплечий рычаг 20 с плечами 21 и 22, оси 23 и 24 и пружины 25 и 26. Отверстия 3 и 4 расположены симметрично относительно оси центрирующего пояса 2. Цилиндрические стержни 5 и 6 сопряжены с отверстиями 3 и 4 соответственно, с возможностью осевых перемещений. Двуплечий рычаг 20 установлен на штоке 17 с возможностью поворотов вокруг оси, перпендикулярной продольной оси упомянутого штока, а его плечи 21 и 22 сопряжены с продольными окнами 7 и 8 соответственно. Фланец 15 закреплен на втором торце корпуса 1 соосно своим коническим отверстием 16 относительно центрирующего пояса 2. Упорный центр 18 сопряжен присоединительным конусом 19 с коническим отверстием 16. Качалки 11 и 12 размещены на стержнях 5 и 6 с возможностью прилегания их рабочих поверхностей 13 и 14 к конической

поверхности 27 вала 28, установленного центровым отверстием 29 на упорном центре 18. Качалки 11 и 12 содержат дополнительные рабочие поверхности 30 и 31 соответственно и установлены на осях 23 и 24 с возможностью поворота вокруг упомянутых осей и взаимодействия поверхностей 30 и 31 с торцом 32 вала 28. Пружины 25 и 26 закреплены на цилиндрических стержнях 5 и 6 с возможностью взаимодействия с качалками 11 и 12.



Патрон механизированный для установки вала с конической поверхностью на центрах станка

Патрон работает следующим образом. Устанавливают патрон центрирующим пояском 2 на шпиндель станка. Вал 28 размещают одним из центровых отверстий 29 на передний упорный центр 18, закрепленный в корпусе 1 патрона, а другим – на задний упорный центр, закрепленный в пиноли задней бабки станка (на рисунке не показаны). От привода сообщают движение штоку 17. Это осевое перемещение с помощью плеч 21 и 22 двуплечего рычага 20 через окна 7 и 8 преобразуется в осевые переменные перемещения цилиндрических стержней 5 и 6. После прижатия дополнительных рабочих поверхностей 30 и 31 к торцу 32 начинается поворот

качалок 11 и 12 соответственно на осях 23 и 24. При этом пружины 25 и 26 деформируются, а рабочие поверхности 13 и 14 качалок сначала приближаются к конической поверхности 27, а затем прилегают к ней. При прилегании одной из рабочих поверхностей, например поверхности 13, к конической поверхности 27 осевое перемещение цилиндрического стержня 5 с качалкой 11 приостанавливается и возобновляется после прилегания рабочей поверхности 14 качалки 12 к конической поверхности 27. Дальнейшими совместными осевыми перемещениями цилиндрических стержней 5 и 6 с качалками 11 и 12 закрепляют вал 28 за коническую поверхность 27 и торец 32.

Установка зажимных элементов на осях с возможностью поворота вокруг этих осей обеспечивает прилегание рабочих поверхностей данных элементов к конической поверхности закрепляемого вала при различных углах ее конуса.

Выполнение зажимных элементов в виде качалок и возможность их дополнительных рабочих поверхностей взаимодействовать с торцом вала обеспечивают качалкам поворот, за счет чего достигается их прилегание также к торцевой поверхности. В результате закрепление вала каждой качалкой выполняется в двух местах в отличие от способа [10], в котором кулачки не поворачиваются и каждый из них закрепляет вал только в одном месте и лишь за одну поверхность. Этим обусловлены расширенные технологические возможности разработанного патрона и повышенная надежность его закрепления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа существенных признаков, характеризующих известные технологические решения по установке валов на центры станков, и последующего их синтеза созданы усовершенствованные способ и патрон. Разработанные средства имеют расширенные технологические возможности за счет закрепления валов за конические поверхности с разными углами конуса и диаметрами данных поверхностей, а также за наклонные плоскости с разными углами наклона и расстояниями до оси вала. Их применение позволит повысить надежность установки за счет одновременного закрепления вала за коническую и торцевую поверхности. Предложенные усовершенствования могут быть использованы в машиностроении при установке на технологическое оборудование валов, содержащих либо конические поверхности, либо наклонные плоскости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник технолога – машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. Изд. 5-е, испр. М.: Машиностроение-1, 2003. Т. 1. 912 с.
2. Технология машиностроения: в 2 кн.: учебное пособие для вузов. Кн. 1: Основы технологии машиностроения / Э.Л. Жуков [и др.] / под ред. С.Л. Мурашкина. Изд. 3-е, стер. М.: Высшая школа, 2008. 278 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. Изд. 5-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение-1, 2001. Т. 2. 944 с.
4. ГОСТ 2571-71. Патроны токарные поводковые. М.: Издательство стандартов, 1981. 7 с.

5. Справочник технолога – машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. Изд. 7-е, испр. М.: Инновационное машиностроение, 2023. Т. 2. 818 с.
6. Беспалов Б.Л., Глейзер Л.А., Колесов И.М. Технология машиностроения: учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1973. 448 с.
7. Архаров А.П., Митюшин С.С. Способ установки заготовки на центрах токарного станка // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4 (4). С. 36–39.
8. Архаров А.П. Патрон клиновой механизированный для установки заготовки на центрах токарного станка // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 1 (5). С. 21–26.
9. Архаров А.П. Установка вала с конической поверхностью на центрах станка // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 1 (25). С. 12–17.
10. Патент РФ 2841354. Патрон кулачковый механизированный для установки вала на центрах станка / Архаров А.П. Заявл. 18.11.2024. Опубл. 06.06.2025, Бюл. № 16.

Для цитирования: Архаров А.П. Усовершенствование установки вала с конической поверхностью на центрах станка // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 1 (29). С. 61–66.

IMPROVEMENT OF THE INSTALLATION OF A SHAFT WITH A CONICAL SURFACE ON THE CENTERS OF THE MACHINE

A.P. ARKHAROV, Cand. Sc.

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

The relevance of the topic under study is noted. The analysis of known methods and means of technological equipment for the installation of workpieces in the form of shafts on metal-cutting machines is presented. The essence of the improved method and chuck for installing shafts containing a conical surface on the centers of the machine is disclosed. Their essential features are compared with similar well-known solutions. The technical result achieved by using the proposed improvement is reflected.

Keywords: shaft, installation, method, chuck, clamping elements, tapered surface, technological capabilities, thrust centers.

Поступила в редакцию/received: 04.11.2025; после рецензирования/revised: 10.11.2025;
принята/accepted: 12.11.2025

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНКУБАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ, УСТАНОВЛИВАЕМОЙ НА ОТРАБОТАННЫХ ТОРФЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

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

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

© Андрианова А.А., Яблонев А.Л., 2026

Рекультивация отработанных торфяных месторождений является важной хозяйственной задачей. Современные методы рекультивации в большинстве случаев предполагают затопление и обводнение. Обводненные площади можно использовать для воспроизводства ценных пород рыб при помощи инкубационных систем, рассчитанных на применение в проточной воде. В качестве подводящих труб в наибольшей степени подходят гофрированные ПВХ трубы. Экспериментальное определение критических скоростей и критических чисел Рейнольдса, выполненное в данной работе, позволит производить дальнейший гидравлический расчет инкубационных систем.

Ключевые слова: отработанное торфяное месторождение, затопление, зарыбление, инкубационная система, гофрированная ПВХ труба, критическая скорость, критическое число Рейнольдса.

ВВЕДЕНИЕ

Введение в хозяйственный оборот отработанных торфяных месторождений относится к числу важных экологических и экономических задач. Как обосновывалось ранее, наиболее эффективным методом является обводнение и зарыбление [1]. Это природоохранный подход, который помогает восстановить природные экосистемы и улучшить экологическое состояние территорий.

На сегодняшний день рекультивация торфяных карьеров включает в себя затопление без дальнейшего рационального использования. Львиная доля затопленных площадей относится к периоду до 1991 года, когда добыча торфа в России доходила до 175 млн т/год [2]. При добыче торфа образуются карьеры и траншеи, которые могут быть использованы для создания глубоких водоемов. Это позволяет решить сразу несколько задач [2]:

1) восстановления водного баланса: искусственно созданные озера и пруды улучшают гидрологический режим территории, стабилизируя влажность почвы и предупреждая процессы высыхания;

2) формирования новых экосистем: вода привлекает диких животных и птицу, что повышает биоразнообразие территории;

3) развития рекреации: обустроенные водоемы становятся популярными у населения местами отдыха, открывают перспективы развития туризма и рыболовства;

4) экологическая польза: накопленные запасы воды играют роль буферных резервуаров, смягчая последствия экстремальных погодных явлений, таких как наводнения и засуха.

Зарыбление представляет собой процесс заселения водоемов промысловыми видами рыб, такими как карп, толстолобик, амур, сиг, щука и др. Рыболовство позволяет эффективно и комплексно использовать территорию и получать дополнительный доход. Здесь можно выделить следующие аспекты:

1) экономический: выращивание рыбы создает рабочие места, стимулирует развитие инфраструктуры и приносит прибыль;

2) социальный: благодаря доступности свежих продуктов питания улучшается питание местного населения, особенно в удаленных районах;

3) научно-исследовательский: на водоемах организуют экспериментальные площадки для изучения поведения рыб с целью разработки технологий выращивания и управления популяциями.

Зарыбление торфяников связано с геотехнологией, оно позволяет решить проблему экологически безопасной утилизации пустующих площадей и сформировать новые производственные мощности (рис. 1).



Рис. 1. Фотография обводненного отработанного торфяного карьера [3]

Создаваемые на бывших торфоразработках водоемы служат источником пресной воды, необходимой для питьевого снабжения, полива сельхозугодий и промышленного использования. Одновременно обеспечивается воспроизводство ценных пород рыб, благодаря чему можно снизить нагрузку на природные акватории и поддерживать баланс водных экосистем.

Водоемообразование снижает вероятность пожаров и предотвращает загрязнение воздуха дымом и пылью, образующимися при эксплуатации открытых разработок торфа. (Пожары и пыление от ветра могут быть и на отработанных месторождениях, поскольку отработка осуществляется с оставлением защитного слоя.)

Постоянный контроль уровня воды также уменьшает риск просадки грунтов и образования опасных провалов.

Использование зарыбленных торфяников повышает рентабельность предприятий, занимающихся разведением рыбы и производством рыбной продукции. Появляются дополнительные возможности для организации малого и среднего бизнеса.

Зарыбление водоемов укрепляет естественные защитные механизмы, повышая способность природы противостоять негативному воздействию изменений климата, лесных пожаров, техногенных аварий и прочих кризисных ситуаций [4].

Таким образом, внедрение практики зарыбления торфяников выступает важным инструментом решения широкого спектра проблем, возникающих в результате активной промышленной деятельности человека. Применение современных геотехнологий позволяет минимизировать негативные последствия и превратить бывшие торфодобывающие предприятия в центры экономического роста.

Прудовое рыбоводство на торфяных карьерах – весьма перспективное направление. Высокую ценность представляют карьеры болот низинного типа. Почвы низинных торфяников значительно богаче фосфором и мало отличаются от других видов почв по содержанию калия [5].

Естественно, что для комплексного использования отработанных торфяных месторождений при высоком уровне рентабельности, первоочередной интерес представляет разведение в торфяных прудах ценных пород рыб, хотя это сложная задача из-за специфики таких водоемов. Торфяные пруды характеризуются высокой кислотностью воды (низким уровнем pH), наличием большого количества органических веществ и, как правило, недостаточным содержанием кислорода. Эти условия подходят далеко не для всех видов рыб, особенно тех, которые считаются ценными с точки зрения аквакультуры.

Высокое содержание в воде органики в большей степени отражается на колебаниях кислородного режима и высокой окисляемости.

Рассматривая гидрохимический режим торфяников, важно отметить, что показатели, не соответствующие рыбоводным нормативам, можно регулировать при рациональном подходе к рыбохозяйственному освоению этих водоемов [6].

Опыт использования торфяных карьеров в целях культурного рыбоводства на территории РФ достаточно большой.

Так, еще в 1931 году при исследовании Мытищинских торфяных карьеров в целях развития культурного рыбоводства были сделаны следующие выводы [7]:

1. Торфяные водоемы, предназначенные под культурную рыбу, должны позволять спуск воды до дна.

2. Поперечные бровки, скрытые под водой, мешают при отлове, так как рыба прижимается к стенкам.

3. Желательно, чтобы ширина продольных бровок между карьерами была более 0,75 м.

4. Заросли растительности на бровках и перешейках необходимо удалять.

5. Мальки чешуйчатого карпа вполне приживаются к торфяным водоемам и др.

Зона прудового рыбоводства в России весьма значительна. В зависимости от поставленных производственных задач рыбные хозяйства могут иметь свой специализированный набор технологических и вспомогательных прудов: водоснабжающих, производственных, санитарно-профилактических, вспомогательных.

В первую очередь рассматривается зарыбление водоемов ценными видами рыб, так как это представляет собой важный инструмент природоохранной и экономической политики, направленный на защиту редких видов, повышение продовольственной безопасности и содействие региональному развитию.

В России и за рубежом разрабатываются и внедряются различные технологии зарыбления водоемов, одной из которых является инкубация искусственно оплодотворенной икры в естественных условиях [8].

Все инкубационные аппараты можно разделить на следующие группы по их целевому назначению:

1) аппараты для инкубации крупной икры лососевых, которая находится в неподвижном состоянии (семга, кумжа, горбуша);

2) аппараты для мелкой икры, которая при инкубации находится в непрерывном движении (белорыбица, пелядь, омуль);

3) аппараты для обесклеенной икры осетровых и карповых, которая периодически находится то в состоянии покоя, то в движении (рыбец, осетр, белуга);

4) аппараты для необесклеенной икры осетровых и карповых, которая при инкубации находится в неподвижном состоянии (белуга, осетр, сазан) [9].

Существует два основных типа гнезд-инкубаторов, которые можно применять в естественной среде. Первый – инкубатор типа «штопор» (рис. 2). К его достоинствам можно отнести чистоту внутри конструкции, отсутствие заиливания. Недостатком является низкая производительность, так как конструкция совсем небольшая.

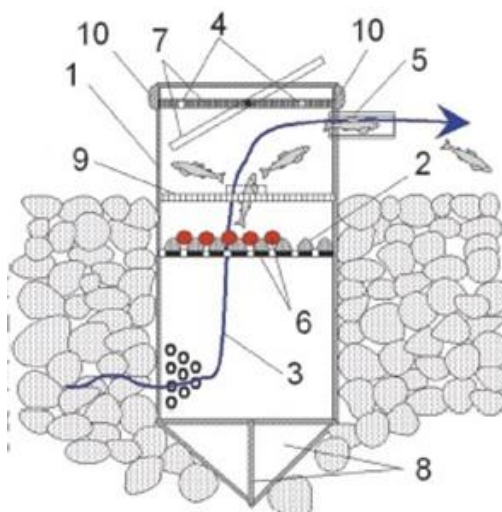


Рис. 2. Схема гнезда-инкубатора типа «штопор»: 1 – корпус гнезда;

2 – субстрат с силиконовыми лунками; 3 – поступление воды подруслового потока; 4 – дренажные отверстия; 5 – патрубок для оттока воды и выхода личинок; 6 – икра; 7 – поворачиваемая крышка для загрузки икры; 8 – разрыхлитель грунта; 9 – концентрирующее кольцо; 10 – приливы [10]

Еще один тип инкубатора – «шайба» (рис. 3). Устройство рассчитано на инкубацию 400...500 икринок. Эффективность данного устройства составляет около 97 %.

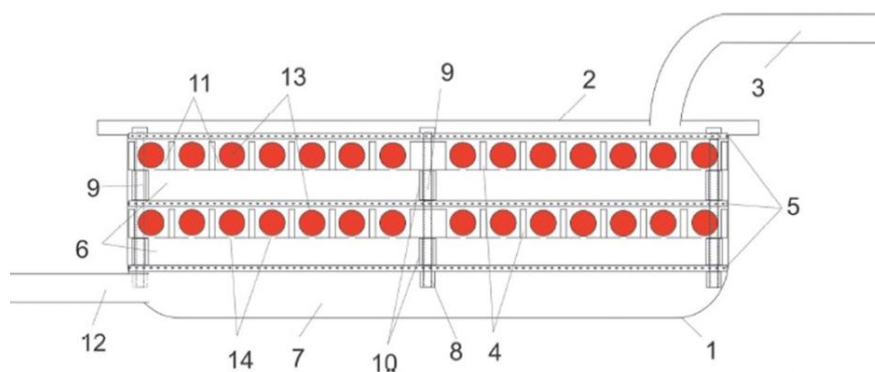


Рис. 3. Схема гнезда-инкубатора типа «шайба»: 1 – корпус; 2 – крышка;
3 – выпускной патрубок; 4 – пластина с канавками для икры;
5 – удерживающая решетка с сеткой; 6 – накопительная камера; 7 – отстойная камера;
8 – гайка; 9 – болт; 10 – втулка; 11 – инкубационные канавки; 12 – впускной патрубок;
13 – инкубируемая икра; 14 – щели для выхода личинок
в нижележащую накопительную камеру [3, 11]

«Штопор» и «шайбу» устанавливают в осенний период до ледостава или в зимнее (весеннее) время при наличии ледяного покрова в проточный водоем. Оба устройства прошли испытания и рекомендованы к дальнейшему использованию. Примечательно, что их максимальная эффективность достигается при наличии определенных гидравлических условий, к которым относятся скорость потока, уклон, скорость обтекания икринок, потери напора. Как показали исследования, для того чтобы обеспечить работоспособность и эффективность проектируемого устройства, необходимо иметь сведения о распределении скоростей течения внутри устройства и в обтекающем потоке.

Требуемые ихтиологические данные для проектирования гнезда-инкубатора и данные для определения его эффективности были получены по результатам ихтиологических исследований в лабораторных и натурных условиях.

Для оптимизации конструкций гнезд-инкубаторов в качестве подводящих трубопроводов, крепящихся к впускному патрубку гнезда-инкубатора типа «шайба», нами была предложена к применению гофрированная ПВХ труба. Такие трубы не заламываются на изгибах, в отличие от гладких мягких труб, и характеризуются продолжительным сроком эксплуатации, при этом прочностные и проводные свойства они сохраняют на протяжении всего срока. Они имеют высокий коэффициент ударной вязкости и не пропускают прямые струи воды. Диапазон эксплуатационных температур для таких труб составляет от -25 до $+60$ °С. Гибкость данной трубы позволяет ей повторять макрорельеф дна. С гофрированными ПВХ трубами можно работать даже зимой, когда водоем покрывается льдом.

Необходимы определенные значения скоростей течения в лунках при обтекании икринок. В предлагаемых нами конструкциях скорость течения воды должна быть меньше величины скорости течения, при которой икринки будут выноситься из лунок. (Данную скорость принято называть скоростью витания.) В то же время этот показатель должен находиться в пределах, в которых происходит доставка достаточного количества кислорода к икринкам. Расчет и анализ скорости обтекания икринок будет представлен в следующих работах. Однако для обеспечения эффективной работы инкубационной

системы необходимы прежде всего гидравлические характеристики гофрированных ПВХ труб, которые отсутствуют в источниках широкого доступа. Поэтому цель данной работы заключается в определении режима движения жидкости и коэффициента гидравлического трения в гофрированной ПВХ трубе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Схема экспериментальной лабораторной установки представлена на рис. 4.

Для исследований были использованы гофрированные ПВХ трубы трех внутренних диаметров: 16, 20 и 25 мм. Благодаря наличию постоянного перелива, опыты проводились при стационарном напоре. Крепление пьезометров к горизонтально расположенной гофрированной ПВХ трубе осуществлялось через специальные полипропиленовые муфты (рис. 5).

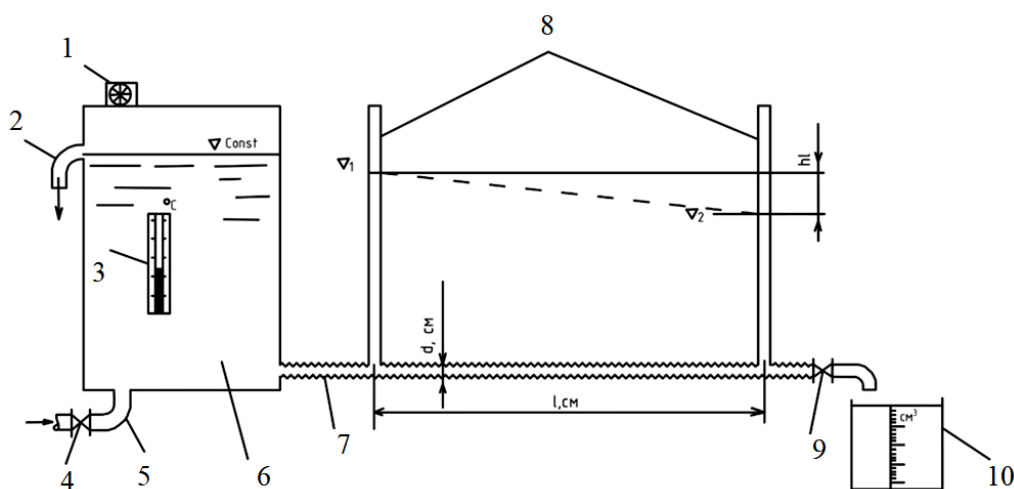


Рис. 4. Схема лабораторной установки по определению гидравлических характеристик гофрированной ПВХ трубы: 1 – секундомер; 2 – переливная трубка; 3 – термометр; 4 – вентиль; 5 – питающий трубопровод; 6 – напорный бак; 7 – гофрированная ПВХ труба; 8 – пьезометры; 9 – сливной кран; 10 – мерная емкость



Рис. 5. Крепление пьезометров к горизонтально расположенной ПВХ трубе

Методика проведения лабораторного исследования состояла в следующем:

1. Заполнялся водой напорный бак.
2. Открывался сливной кран, с помощью мерной емкости и секундомера определялся расход воды Q , м³/с.
3. Снимались показания пьезометров.
4. Все результаты записывались в расчетную таблицу.
5. По полученным результатам рассчитывались потери напора Δh , м, средние скорости потока V , м/с, опытные коэффициенты гидравлического трения λ и числа Рейнольдса Re по следующим формулам:

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2}, \quad (1)$$

где d – внутренний диаметр ПВХ трубы, м;

$$\lambda = \frac{2\Delta h dg}{lV^2}, \quad (2)$$

где Δh – потеря напора по длине, м; l – расстояние между точками подключения пьезометров, м; $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения;

$$Re = \frac{Vd}{\nu}, \quad (3)$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости воды, м²/с.

Все опыты проводились с пятикратной повторяемостью.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам вычисления коэффициента гидравлического трения (табл. 1) построены графики зависимости коэффициента гидравлического трения от скорости течения воды (рис. 6).

Таблица 1. Результаты определения коэффициента гидравлического трения для гофрированных ПВХ труб

Внутренний диаметр d , мм	Минимальное значение λ	Максимальное значение λ
16	0,046 9	0,753 5
20	0,013 3	0,239 3
25	0,009 7	0,067 5

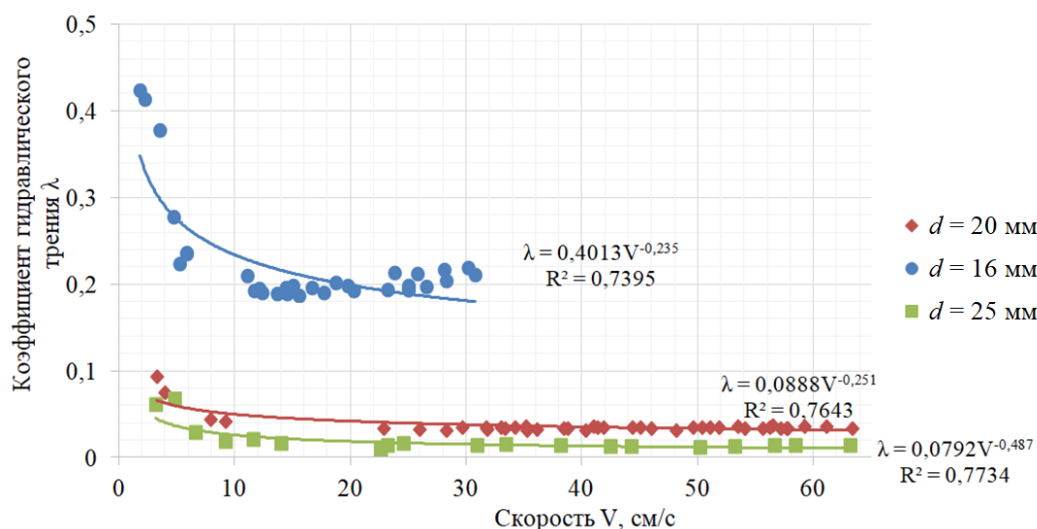
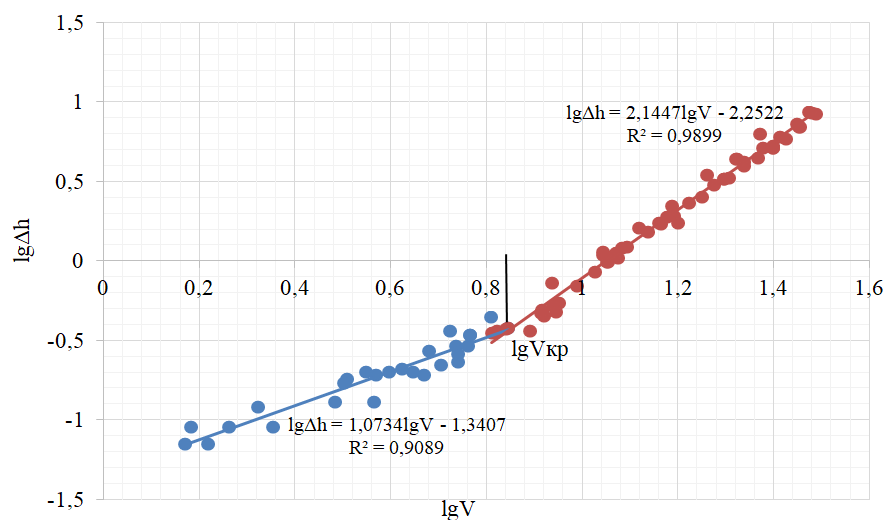


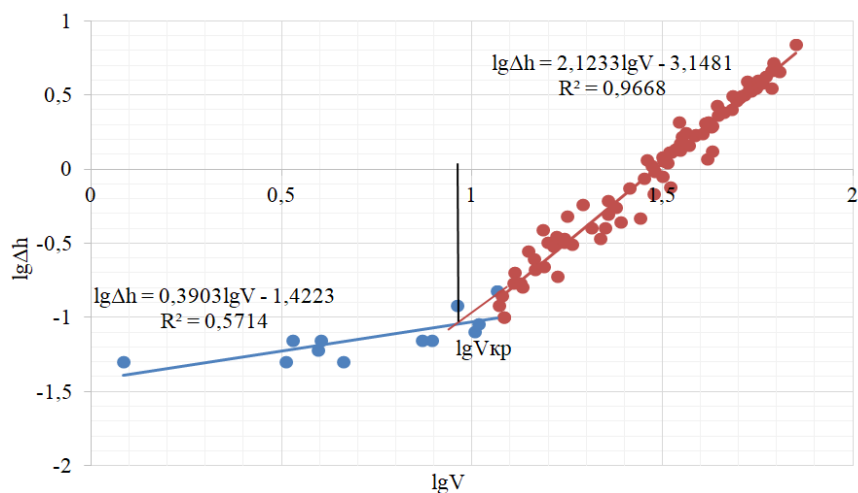
Рис. 6. Зависимость коэффициента гидравлического трения от скорости течения воды

Построенные графики зависимости скорости течения от потерь напора по длине в логарифмических координатах представлены на рис. 7. Опытные данные аппроксимированы прямыми линиями. Точки их пересечения есть критические скорости, соответствующие моментам смены режима движения воды. По критическим скоростям были определены соответствующие критические числа Рейнольдса.

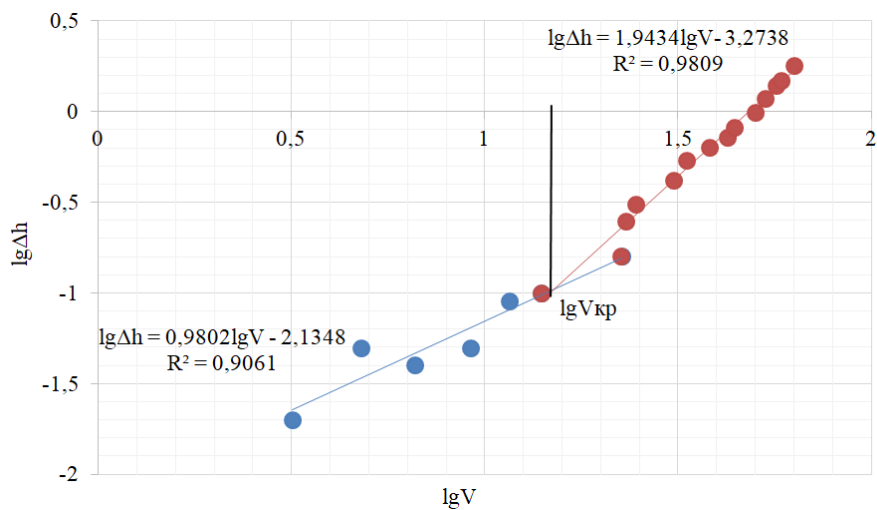


(a)

Рис. 7. Зависимость логарифма потерь напора по длине от логарифма скорости:
d = 16 мм (а); 20 мм (б); 25 мм (в)



(б)



(в)

Рис. 7. Продолжение

Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Критические скорости воды и критические числа Рейнольдса для гофрированных ПВХ труб

d , мм	$\lg V_{кр}$	$V_{кр}$, см/с	$Re_{кр}$
16	0,85	7,079	888,403
20	0,99	9,772	1 491,97
25	1,19	15,488	2 955,75

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Прудовое рыбоводство на торфяных карьерах – весьма перспективное направление.
2. Для разведения ценных пород рыб необходимо применять гнезда-инкубаторы в естественной среде.
3. Для эффективного функционирования инкубатора можно использовать гибкие гофрированные ПВХ трубы.
4. Определенные в ходе экспериментального исследования критические скорости и критические числа Рейнольдса для гофрированных ПВХ труб позволяют производить дальнейшие гидравлические расчеты инкубационной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрианова А.А., Яблонев А.Л. Комплексное использование карьеров отработанных торфяных месторождений. *Современные технологии и инновации: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции*. Тверь: ТвГТУ, 2025. С. 61–65.
2. 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.
3. Бутырина Е. Кладовые природы: зачем России нужно вторичное обводнение ранее осушенных торфяников? URL: <https://fedpress.ru/article/3296529> (дата обращения: 18.10.2025).
4. Мякотных А.А., Иванова П.В., Иванов С.Л. Традиционные и перспективные способы добычи торфяного сырья // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2021. № 13. С. 37–41.
5. Мартышев Ф.Г. Прудовое рыбоводство: учебник. М.: Высшая школа, 1973. 425 с.
6. Гидротехническое бюро. URL: <https://www.gidroburo.ru/index.php/a-proektirovanie/a-6-prudy-rybnye/63-a-6-04-vidy-prudov-v-karpovom-khozyajstve> (дата обращения: 11.03.2025).
7. Сидоров С.А. Опыт использования Мытищинских торфяных карьеров в целях культурного рыбоводства // *Труды Всесоюзного института торфа*. 1933. № 3. С. 166–188.
8. 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.
9. Козлова Г.В. Искусственное воспроизводство рыб. Керчь: КГМТУ, 2018. 104 с.
10. Патент РФ на полезную модель № 197234. *Устройство для создания искусственного гнезда для лососевых рыб в естественных условиях* / Скоробогатов М.А., Павлов Д.С., Веселов А.Е., Ефремов Д.А., Ручьев М.А., Андрианова А.А. Заявл. 31.12.2019. Оpubл. 14.04.2020, Бюл. № 11.
11. 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.

Для цитирования: 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. 67–77.

HYDRAULIC JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE INCUBATION SYSTEM INSTALLED AT ABANDONED PEAT DEPOSITS

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

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

Reclamation of depleted peat deposits is an important economic task. Modern reclamation methods generally involve flooding and irrigating the areas. Irrigated areas can be used for the reproduction of valuable fish species using incubation systems designed for use in flowing water. Corrugated PVC pipes are the most suitable for supply pipes. The experimental determination of critical velocities and critical Reynolds numbers, conducted in this study, will enable future hydraulic calculations for incubation systems.

Keywords: depleted peat deposit, flooding, stocking, incubation system, corrugated PVC pipe, critical velocity, critical Reynolds number.

Поступила в редакцию/received: 25.11.2025; после рецензирования/revised: 11.12.2025;
принята/accepted: 12.12.2025

УДК 622.73

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-1-77-85

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗГОНА КУСКА ГОРНОЙ ПОРОДЫ В РОТОРЕ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ДРОБИЛКИ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

А.И. АФАНАСЬЕВ, д-р техн. наук, В.В. ЗУБОВ, канд. техн. наук,
Д.И. СИМИСИНОВ, д-р техн. наук, В.С. ШЕСТАКОВ, канд. техн. наук

Уральский государственный горный университет,
620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, e-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru

© Афанасьев А.И., Zubov B.B., Симисинов Д.И., Шестаков В.С., 2026

В работе рассмотрены взаимосвязи между кинематическими параметрами рабочего процесса и энергетическими затратами на разрушение горной породы в роторе центробежной дробилки. Предложена модель движения куска горной породы в горизонтально расположенном роторе, позволяющая рассчитать параметры процесса разгона куска горной породы с учетом ее физико-механических свойств, степени дробления и конструктивных параметров ротора. Установлено, что существенный

вклад в нормальную реакцию лопасти на кусок горной породы оказывает сила Кориолиса. Показано, что увеличение скорости удара куска о броню нецелесообразно осуществлять за счет увеличения угла наклона лопасти к радиусу, так как при этом возрастает нормальная реакция и, соответственно, интенсивность износа.

Ключевые слова: горная порода, кинематика частиц, динамика разгона, силы трения и инерции, эффект Кориолиса, удельные энергозатраты.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования обусловлена значимостью операций дробления и измельчения в процессах переработки минерального сырья. Эти этапы характеризуются высокими энергетическими затратами, что накладывает ограничения на выбор технологии разрушения горных пород. При снижении содержания полезных компонентов в руде объемы перерабатываемой горной массы и, следовательно, энергозатраты на ее разрушение увеличиваются.

Проблемами затрат энергии на дробление горных пород занимались такие выдающиеся ученые, как С.Е. Андреев, Л.И. Барон, Ф.С. Бонд, В.П. Горячкин, Ф. Кик, В.Л. Кирпичев, В.Р. Кубачек, Л.Б. Левенсон, А.И. Матвеев, В.И. Ревнивцев, П.Р. Риттенгер, В.В. Ржевский, П.М. Сиденко, В.А. Чантурия [1–4] и др. Исследования показали, что при измельчении материалов энергия расходуется на образование новой поверхности, теплоту деформации материала без его разрушения, а также на трение материала о рабочие органы машины. Существующие теории дробления не всегда точно учитывают эти энергозатраты, что затрудняет разработку универсальных формул для расчета энергопотребления.

В 60-х годах XX века в ИГД им. А.А. Скочинского под руководством Л.И. Барона было проведено масштабное изучение процесса разрушения методом свободного удара горных пород, используемых для производства гравия [1]. Этот метод более эффективен, чем раздавливание, благодаря существенно меньшей энергоемкости. Барон и его коллеги предложили формулы для расчета энергии разрушения, учитывающие показатели механических свойств горных пород – прочность на сжатие и растяжение, которые определяют величину дробимости.

Исследования П.М. Сиденко [2] показали, что сложность задачи не позволяет разработать универсальную формулу для расчета энергозатрат на измельчение. Каждая частица разрушается на фрагменты различного размера, и количество таких фрагментов варьируется при многостадийном дроблении на каждой стадии процесса. Это нарушает принцип «ничего лишнего не измельчать» и требует учета фактических значений предела прочности и модуля упругости горной породы конкретного месторождения.

Процесс разрушения свободным ударом реализуется в центробежных дробилках и дезинтеграторах, широко применяемых в горнодобывающей промышленности [5–8]. Общим для всех этих устройств является структура рабочего процесса, который начинается с разгона кусков горной породы в роторе. Затраты энергии включают сообщение массиву кинетической энергии, а также трение, обусловленное силой тяжести и эффектом Кориолиса. Эти факторы существенно влияют на степень дробления и эффективность работы машины. Кроме того, трение кусков приводит к повышенному износу лопастей ротора. Сила Кориолиса, абразивная стойкость материала, конструктивное исполнение лопастей, а также расположение их на роторе

определяют интенсивность износа. В результате наших исследований установлено, что периферийные части лопастей изнашиваются значительно быстрее, чем центральные. Оценку количественных параметров процесса износа можно производить по величине силы прижатия куска горной породы к лопасти.

Таким образом, выявление взаимосвязи между кинематическими параметрами рабочего процесса и энергетическими затратами можно считать актуальной задачей, требующей глубокого анализа и систематизации данных.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

В работе [10] рассмотрен процесс разгона куска горной породы по лопасти центробежной дробилки, расположенной по радиусу, и определены затраты энергии. В рамках данной работы мы рассмотрим общие затраты энергии и потери на трение, а также определим коэффициент полезного действия (КПД) разгона горной массы в центробежной дробилке, лопасти которой расположены под углом к радиусу. Эта тема также была предметом исследований А.А. Гарабажиу [10–12]. Однако при составлении уравнений движения куска в его работе получено неадекватное решение.

На с. 127 [11] приведены уравнения (3) и (4) для определения радиальной и тангенциальной скорости соответственно. На с. 128 [11] представлен рис. 3, иллюстрирующий зависимость тангенциальной, радиальной и абсолютной скоростей движения материала в межлопастном пространстве смесителя от текущего радиуса лопасти. Значение радиальной скорости материала, равное 45 м/с в начале лопаток, не обосновано автором. Материал попадает на ротор с нулевой радиальной скоростью и затем движется по горизонтальной поверхности ротора до лопаток по спиральной траектории под действием центробежной силы и силы трения.

Для определения радиальной скорости материала в начале лопаток необходимо решить уравнение (3) работы [11], что автор делает приближенным способом с использованием ЭВМ. Мы предлагаем альтернативное решение этой задачи.

Разгон куска горной породы в роторе с вертикальной осью вращения

Рассмотрим движение **куска горной породы** в горизонтально расположенном роторе с вертикальной осью вращения. На рис. 1 представлена схема сил, действующих на кусок горной породы, который опирается на лопасть и диск. Как показали наши исследования [10], радиальной скоростью кусков горной породы находящихся в начале лопастей можно пренебречь.

При выводе формул принимаются следующие допущения:

- 1) контактная плоскость лопасти расположена под углом α к радиусу;
- 2) сопротивление радиальному перемещению куска включает силу трения о стойку, зависящую от величины ускорения Кориолиса, и силу трения о диск, зависящую от силы тяжести;
- 3) вхождение лопасти в контакт с куском не приводит к его разрушению;
- 4) начальная радиальная скорость куска равна нулю.

Одновременно с окружной скоростью кусок горной породы под действием центробежной силы приобретает радиальную скорость. Будем считать, что он имеет шаровидную форму с эквивалентным диаметром d .

После подстановки уравнений (1)–(4) в (5) и преобразований получим:

$$x'' = 2r' \omega \cdot \sin\varphi + r \cdot \omega^2 \cdot \cos\varphi - (2r' \omega \cdot \cos\varphi + r \cdot \omega^2 \cdot \sin\varphi)f - gf. \quad (6)$$

Точного решения уравнение (6) не имеет, так как в него входит коэффициент трения, имеющий случайный характер, а также нелинейная зависимость перемещения куска по лопасти от радиуса.

Текущий радиус определяется величиной угла φ и перемещения x

$$r = (x^2 + r_0^2 - 2xr_0 \cos(\angle BAO))^{0,5}, \quad (7)$$

где r_0 – минимальный радиус вращения лопасти.

Угол между направлением центробежной силы и текущим радиусом (φ) находится согласно рис. 1 из формулы

$$\varphi = \arccos((x^2 - r_1^2 + r^2)/(2 \cdot x \cdot r)). \quad (8)$$

Сила давления куска горной породы на лопасть зависит от его размеров и плотности, которые являются случайными величинами, и согласно рис. 1 находится из формулы

$$N = 2m \cdot r' \omega \cdot \cos\varphi + m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin\varphi. \quad (9)$$

Решение уравнений (6) и (9) было произведено приближенным способом методом Эйлера.

Исходные данные для расчета центробежной дробилки

Определяются физико-механические и геометрические параметры разрушаемых кусков горной породы [14, 15].

1. Плотность. Плотность ρ является случайной величиной и для испытанных нами горных пород распределена по нормальному закону

$$\rho = 0,5(\rho_{\max} + \rho_{\min}) + (\sum_1^6 \text{Rnd} - 3)\sqrt{2} \cdot (\rho_{\max} - \rho_{\min}) / 6, \quad (10)$$

где $\rho_{\max}$, $\rho_{\min}$ – соответственно максимальная и минимальная плотность куска горной породы; Rnd – случайное число, равномерно распределенное в интервале 0...1.

2. Коэффициент трения. Коэффициент трения куска (f) о разгонную лопасть является случайной величиной, которая, как установлено нами для испытанных горных пород, распределена по равномерному закону

$$f = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \text{Rnd}, \quad (11)$$

где $f_{\max}$, $f_{\min}$ – соответственно максимальный и минимальный коэффициент трения куска горной породы о разгонную плоскость.

3. Коэффициент крепости ($f_n \approx \sigma_{сж} / 100$). Коэффициент крепости по Протодяконову связан с дробимостью [4].

4. Размеры (эквивалентный диаметр) кусков. Эквивалентный диаметр кусков d является случайной величиной и, в частности, для медно-цинковой руды, а также других горных пород распределен по закону Вейбулла

$$d = d_{\min} + \{d_{\max} - d_{\min}[-a \cdot \ln(1 - \text{Rnd})]^{1/b}\} / 3, \quad (12)$$

где a и b – параметры распределения Вейбулла; $d_{\max}$, $d_{\min}$ – соответственно максимальный и минимальный эквивалентный диаметр куска горной породы.

Производительность и степень дробления центробежной дробилки являются параметрами, определяющими остальные характеристики машины. Исследования, проведенные в Белорусском национальном техническом университете [15], позволили выявить взаимосвязь окружной скорости, мощности двигателя и производительности центробежной дробилки, используя закон сохранения энергии. Однако в предлагаемой формуле не вполне корректно, без учета физико-механических свойств горной породы, степени дробления и конструктивных параметров ротора, применяется коэффициент, учитывающий увеличение скорости вылета куска по сравнению с окружной скоростью ротора. Кроме того, в данной формуле скорость куска может возводиться в степень более двух, тогда она теряет физический смысл.

В табл. 1–3 приведен пример расчета параметров процесса разгона куска горной породы по лопасти, наклоненной к радиусу ротора под углом $10,4^\circ$ по методике, предложенной А.И. Афанасьевым и соавторами.

Таблица 1. Исходные данные к расчету параметров рабочего процесса центробежной дробилки

Параметр	Обозначение	Величина
Максимальный коэффициент трения	$F_{\text{тр. max}}$	0,32
Минимальный коэффициент трения	$F_{\text{тр. min}}$	0,3
Угловая скорость вращения ротора, рад/с	ω	300
Минимальный радиус лопасти, мм	$R_{\text{л. min}}$	100
Максимальный радиус лопасти, мм	$R_{\text{л. max}}$	250
Минимальный диаметр куска, мм	$d_{\text{к. min}}$	50
Максимальный диаметр куска, мм	$d_{\text{к. max}}$	52
Длина лопасти, мм	L	151
Плотность куска горной породы, кг/м ³	ρ	1 800

Таблица 2. Управление режимами работы программы

Параметр	Обозначение	Величина
Шаг расчета при численном интегрировании по углу вала, град	df	1
Шаг по углу вала вывода результатов в таблицу, град	df_печ	50

Таблица 3. Результаты расчетов

Параметр	Обозначение	Величина
Коэффициент трения	$F_{тр}$	0,30
Диаметр куска, мм	d_k	52,0
Масса куска, кг	m_k	0,13
Угол CAO, град (см. рис. 1)	$\angle CAO$	169,5
Угол между лопастью и вертикалью, град	β	10,452
Угол между лопастью и горизонталью, град	δ	79,5
Нормальная реакция плоскости на кусок горной породы, Н	N	5 351
КПД	η	0,84
Работа силы трения куска о лопасть, Дж	$A_{тр}$	133,5

На рис. 2 приведены зависимости центробежной силы и силы Кориолиса от времени при движении куска горной породы по лопасти.

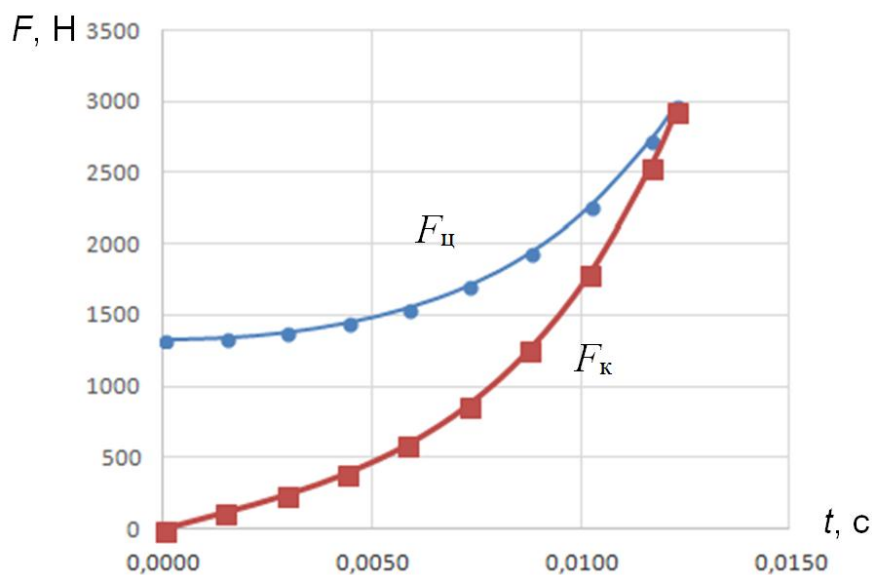


Рис. 2. Зависимость центробежной силы $F_{ц}$ и силы Кориолиса $F_{к}$ от времени при движении куска горной породы по лопасти

Графики показывают, что существенный вклад в нормальную реакцию лопасти на кусок горной породы вносит сила Кориолиса.

В табл. 4 приведены результаты расчета параметров процесса разгона куска по лопасти, наклоненной к радиусу ротора, при скорости вращения ротора $\omega = 300$ рад/с. В шестой строке табл. 4 приведены результаты расчета параметров при $\omega = 350$ рад/с, а в седьмой – при $\omega = 370$ рад/с.

Таблица 4. Параметры процесса разгона куска по лопасти, наклоненной к радиусу ротора

Угол наклона лопасти к радиусу, град	Скорость удара, м/с	Нормальная составляющая реакции, Н	Работа трения куска о лопасть, Дж	КПД, %
10,4	83	3 100	76,4	86
23,3	86	3 840	110	82
32,8	89	4 350	112	82
40,0	92	4 850	154	78
46	93	5 100	160	80
51,3	96	5 520	176	78
10,4*	98	4 310	105	86
10,4**	120	4 750	103	86

Примечания: 1. * Угловая скорость вращения ротора $\omega = 350$ рад/с.

2. ** Угловая скорость вращения ротора $\omega = 370$ рад/с.

ВЫВОДЫ

Графики, представленные на рис. 2, а также параметры процесса разгона куска в роторе, приведенные в табл. 4, показывают, что с увеличением угла наклона лопасти к радиусу от 10 до 52°:

- 1) скорость удара возрастает на 15,6 %;
- 2) нормальная реакция повышается на 78 %;
- 3) работа трения увеличивается в 1,3 раза;
- 4) КПД снижается на 8 %.

На основании приведенных данных можно утверждать, что увеличение скорости удара куска о броню нецелесообразно осуществлять за счет увеличения угла наклона лопасти к радиусу, так как при этом возрастает нормальная реакция и, соответственно, интенсивность износа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горячкин В.П. Собрание сочинений: в 3 т. М.: Колос, 1968. Т. 1. 720 с.
2. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. М.: Химия, 1977. 368 с.
3. Барон Л.И., Хмельковский И.Е. Разрушаемость горных пород свободным ударом. М.: Наука, 1971. 203 с.
4. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1980. 415 с.
5. Патент РФ 2154532. *Дезинтегратор* // Калашников Ю.Д., Макаров В.В., Макаров Е.В. Заявл. 26.04.1999. Оpubл. 20.08.2000, Бюл. № 23.
6. Патент РФ 2150323. *Центробежный измельчитель встречного удара* // Матвеев А.И., Григорьев А.Н., Филиппов В.Е. Заявл. 28.10.1997. Оpubл. 10.06.2000.
7. Патент РФ 2628798. *Дезинтегратор* // Семикопенко И.А., Юрченко А.С., Пугин А.И. Беляев Д.А. Заявл. 22.12.2016. Оpubл. 22.08.2017, Бюл. 24.
8. Ahmadi R., Shahsavari S. Procedure for Determination of Ball Bond Work Index in the Commercial Operations // *Minerals Engineering*. 2009. V. 22. № 1. P. 104–106.
9. Афанасьев А.И., Зубов В.В., Симисинов Д.И., Чиркова А.А. Математическая модель движения кусков горной породы в роторе центробежной дробилки // *Горный журнал*. 2025. № 4. С. 59–64.

10. Гарабажиу А.А. Математическое моделирование процессов измельчения и классификации сыпучих материалов в роторно-центробежной мельнице // *Химическая промышленность*. 2003. № 6. С. 15–30.
11. Гарабажиу А.А. Математическое моделирование процесса перемешивания сухих сыпучих материалов в энергосберегающем роторно-центробежном смесителе // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*. 2013. № 3. С. 126–134.
12. Гарабажиу А.А. Разработка новой энергосберегающей конструкции роторно-центробежного смесителя для перемешивания сухих сыпучих материалов // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*. 2010. № 8. С. 60–70.
13. Кубачек В.Р., Сантов В.И., Паладеева Н.И. Критерии ударного разрушения горных пород // *Известия вузов. Горный журнал*. 1985. № 8. С. 75–78.
14. Кубачек В.Р., Сантов В.И., Паладеева Н.И. Параметры разрушения горных пород свободным ударом // *Строительные и дорожные машины*. 1985. № 6. С. 17–18.
15. Богданов В.С., Семикопенко И.А., Беляев Д.А., Вавилов Д.В. Определение мощности, потребляемой центробежным дисковым измельчителем // *Цемент и его применение*. 2023. № 4. С. 54–55.

Для цитирования: Афанасьев А.И., Зубов В.В., Симисинов Д.И., Шестаков В.С. Математическая модель разгона куска горной породы в роторе центробежной дробилки с вертикальной осью вращения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 1 (29). С. 77–85.

MATHEMATICAL MODEL OF ACCELERATION OF A PIECE OF ROCK IN THE ROTOR OF A CENTRIFUGAL CRUSHER WITH A VERTICAL AXIS OF ROTATION

AFANASYEV A.I., Dr Sc., ZUBOV V.V., Cand. Sc.,
SIMISINOV D.I., Dr Sc., SHESTAKOV V.S., Cand. Sc.

Ural State Mining University,
30, Kuibysheva St., 620144, Ekaterinburg, e-mail: gmf.tm@m.ursmu.ru

The paper considers the relationship between the kinematic parameters of the working process and the energy costs of rock destruction in the rotor of a centrifugal crusher. A model of the movement of a piece of rock in a horizontally positioned rotor is proposed. The model allows us to calculate the parameters of the acceleration process of a piece of rock, taking into account the physical and mechanical properties of the rock, the degree of crushing and the design parameters of the rotor. It has been established that the Coriolis force makes a significant contribution to the normal reaction of the blade to a piece of rock. It is shown that it is not advisable to increase the impact velocity of a piece of armor by increasing the angle of inclination of the blade to the radius, since this increases the normal reaction and, consequently, the wear rate.

Keywords: rock, particle kinematics, acceleration dynamics, friction and inertia forces, Coriolis Effect, specific energy consumption.

Поступила в редакцию/received: 08.12.2025; после рецензирования/revised: 11.12.2025;
принята/accepted: 12.12.2025

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 517.938

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-1-86-93

ОБ ОДНОМ НОВОМ СВОЙСТВЕ РЕКУРРЕНТНЫХ ДВИЖЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА КОМПАКТНЫХ МНОГООБРАЗИЯХ

С.М. Дзюба, д-р физ.-мат. наук, И.И. Емельянова, магистр

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

© Дзюба С.М., Емельянова И.И., 2025

На основании определений минимального множества и рекуррентного движения, введенных Дж. Биркгофом в начале прошлого века, получено новое достаточное условие рекуррентности движений динамических систем на топологическом компактном многообразии V . Это условие дает достаточно полное представление о структуре рекуррентного движения как функции времени на V и, таким образом, органично дополняет классическое определение Биркгофа. Одно из основных значений данного результата состоит в том, что он приводит к новому методу приближенного построения рекуррентных движений. Предложенный метод без принципиальных изменений может быть применен к построению асимптотических рекуррентных решений неавтономных систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Ключевые слова: топологическое компактное многообразие, динамические системы, рекуррентные движения.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, даже классические задачи анализа замкнутых систем автоматического регулирования тесно связаны с задачами теории динамических систем (см., например, [1]), что особенно прослеживается в монографиях [2, 3]. Представлено мощное современное развитие этих результатов [4], и установлена их связь с проблемой моделирования турбулентного движения идеальной жидкости [5].

Заметим, что важная гипотеза, связанная с моделированием турбулентности [3], оказалась некорректной вследствие неверной трактовки расположения рекуррентных движений, что было показано в [6]. Коротко обсудим это.

Пусть Σ – компактное метрическое пространство с метрикой d и R – поле действительных чисел. Рассмотрим отображение $f: R \times \Sigma \rightarrow \Sigma$ и положим

$$f(t, p) = g^t p.$$

При этом будем считать:

(a1) отображение f непрерывно по совокупности переменных t, p на множестве $R \times \Sigma$;

(a2) для всех $p \in \Sigma$

$$g^0 p = p;$$

(a3) для всех $t, \tau \in R$

$$g^{t+\tau} = g^t g^\tau.$$

Тогда будем говорить, что группа преобразований g^t – *динамическая система*, а для любого $p \in \Sigma$ функция $t \rightarrow f(t, p)$ – *движение* (см. [7, с. 347]).

Из всех движений особое значение имеет рекуррентное [8, с. 204]. Напомним, что движение $f(t, p)$ называется *рекуррентным*, если для каждого $\varepsilon > 0$ найдется такое $T_\varepsilon > 0$, что для всех $\tau \in R$ дуга

$$K_{\tau, T_\varepsilon} = \{f(t, p) : t \in [\tau, \tau + T_\varepsilon]\}$$

траектории

$$K = \{f(t, p) : t \in R\}$$

этого движения аппроксимирует всю траекторию K с точностью ε [7, с. 402]. При этом само понятие рекуррентного движения прямо связано с понятием минимального множества.

В самом деле, в компактном пространстве Σ замыкание траектории рекуррентного движения представляет собой компактное минимальное множество [7, с. 404]. Напомним, что множество $M \subset \Sigma$ называется *минимальным*, если оно непусто, замкнуто, инвариантно и не содержит ни одного собственного подмножества, обладающего тремя указанными выше свойствами [7, с. 400]. Напомним также, что любое движение $f(t, p)$, расположенное в компактном минимальном множестве M , рекуррентно [7, с. 402].

Как известно, каждое компактное пространство движений Σ содержит компактное минимальное множество M . Найдется такая вполне упорядоченная система компактных инвариантных множеств

$$\Sigma \supset M_1 \supset M_2 \supset \dots \supset M_\omega \supset M_{\omega+1} \supset \dots, \quad (1)$$

занумерованных всеми порядковыми числами первого и второго классов, что

$$M = M_1 \cap M_2 \cap \dots \cap M_\omega \cap M_{\omega+1} \cap \dots [7, с. 401].$$

Как ни покажется это странным, изначально и вплоть до самого последнего времени структура последовательности (1) изучалась в самом общем виде (см., например, [9, с. 1–4]), что, говоря в целом, и послужило причиной ошибки в [3]. Детальное изучение данной структуры выявило ряд новых свойств движений системы g^t [10]. Это позволило в статье [11] существенным образом упростить устоявшееся представление о взаимоотношении движений на топологическом компактном многообразии V , фактически изложенное в [8, гл. VII] и с тех пор не менявшееся.

Основной целью настоящей работы является дальнейшее развитие результатов статей [6, 11], позволяющее выявить некоторое новое свойство рекуррентных движений на V .

ДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА МНОГООБРАЗИЯХ

Пусть V – топологическое компактное многообразие размерности n и пусть на V задана полная однопараметрическая группа преобразований g^t . По определению g^t представляет собой динамическую систему, для которой установлены все базовые понятия и свойства общей теории динамических систем [8, гл. VII].

Зафиксируем произвольный атлас $(\Phi_s, \varphi_s)_{s \in S}$ многообразия V , где Φ_s – некоторая открытая часть пространства R^n и φ_s – гомеоморфизм Φ_s на $V_s \subset V$. При этом, поскольку V компактно, будем считать, что число S конечно.

Следуя Биркгофу, будем называть любое движение $f(t, p)$ системы g^t , расположенное в компактном минимальном множестве M , рекуррентным. Кроме того, заметим, что Биркгоф фактически доказал следующее [8, с. 203]: *для рекуррентности движения $f(t, p)$ на V необходимо и достаточно, чтобы для каждого сколь угодно малого положительного числа ε нашлось такое $T_\varepsilon > 0$, что при всех $\tau \in R$ и $\sigma \in R$ существует такое $t \in [\sigma, \sigma + T_\varepsilon]$, что $\|\varphi_s^{-1}(f(\tau, p)) - \varphi_s^{-1}(f(t, p))\| < \varepsilon$ на одном из множеств Φ_s* . Последнее, очевидно, полностью соответствует приведенному ранее современному определению рекуррентного движения.

В дальнейшем при исследовании рекуррентных движений системы g^t мы будем интерпретировать многообразие V как полуметрическое пространство с отделимой структурой.

Напомним, что топологическое пространство Γ называется *полуметрическим*, если топология в нем индуцирована направленным семейством полуметрик $(d_i)_{i \in I}$, где множество индексов I может иметь произвольную мощность (см., например, [12, с. 456]).

Напомним также, что функция $d_\gamma: \Gamma \times \Gamma \rightarrow$ называется *полуметрикой*, если она удовлетворяет следующим условиям:

(s1) для всех $(p, q) \in \Gamma \times \Gamma$

$$d_\gamma(p, q) = d_\gamma(q, p);$$

(s2) для всех $p \in \Gamma$

$$d_\gamma(p, p) = 0,$$

а случай

$$d_\gamma(p, q) = 0$$

не исключается при $q \neq p$;

(s3) для всех $p \in \Gamma, q \in \Gamma$ и $r \in \Gamma$ выполнено неравенство треугольника

$$d_\gamma(p, q) \leq d_\gamma(p, r) + d_\gamma(r, q).$$

И, наконец, напомним, что семейство полуметрик $(d_i)_{i \in I}$ называется *направленным*, если для любой конечной части $J \subset I$ найдется такое $k \in I$, что $d_k \geq d_j$ для всех $j \in J$. Если же для каждой пары $p \neq q$ найдется такая полуметрика d_γ , что

$$d_\gamma(p, q) > 0,$$

то будем говорить, что пространство Γ снабжено *отделимой структурой* [12, с. 456].

Заметим теперь, что многообразие V полуметризуемо как топологическое компактное пространство [12, с. 458]. Полуметрики на V мы определим следующим образом.

Зафиксируем некоторую точку $x \in V$, некоторую ее связную окрестность E и зададим непрерывную функцию $\gamma: V \rightarrow \mathbb{R}$, такую, что $\gamma(p) > 0$, если $p \in E$, и $\gamma(p) = 0$ в противном случае. Тогда равенство

$$d_\gamma(p, q) = |\gamma(p) - \gamma(q)|$$

дает полуметрику d_γ на V [12, с. 457].

Изменяя функцию γ , мы можем получать различные полуметрики d_γ . Значит, всегда можно построить семейство полуметрик $(d_i)_{i \in I_E}$, которое будет направленным. При этом всегда можно добиться того, что для двух любых точек $p \neq q$ найдется полуметрика d_γ , для которой $d_\gamma(p, q) > 0$. Прделав эту процедуру на всех связных окрестностях E всех точек $x \in V$, мы превратим V в полуметрическое пространство с отделимой структурой, в котором топология индуцирована семейством полуметрик $(d_i)_{i \in I}$. Очевидно, что эта топология совпадает с исходной, введенной на V атласом $(\Phi_s, \varphi_s)_{s \in S}$.

Заметим теперь, что использование полуметрик позволяет переписать упомянутое выше утверждение Биркгофа в следующем более простом виде, формально не связанном с атласом $(\Phi_s, \varphi_s)_{s \in S}$: для *рекуррентности движения* $f(t, p)$ на V необходимо и достаточно, чтобы для каждого сколь угодно малого положительного числа ε нашлось такое $T_\varepsilon > 0$, что при всех $\tau \in \mathbb{R}$ и $\sigma \in \mathbb{R}$ существует такое $t \in [\sigma, \sigma + T_\varepsilon]$, что

$$d_i(f(\tau, p), f(t, p)) < \varepsilon, i \in I.$$

НОВОЕ СВОЙСТВО РЕКУРРЕНТНЫХ ДВИЖЕНИЙ

Вообще говоря, приведенные выше свойства рекуррентного движения не дают достаточно полного представления о его структуре как функции времени. Этот недостаток компенсируется новым свойством рекуррентных движений на V , которое устанавливает следующая

Теорема 1. Пусть $f(t, p)$ – некоторое движение системы g^t , определенной на V , и пусть T – некоторое положительное число. Предположим, что для каждого $\varepsilon > 0$ существует такое натуральное число N_ε , зависящее также от T , что для всех $t \in \mathbb{R}$

$$d_i(f(t, p), f(t + N_\varepsilon T, p)) < \varepsilon, i \in I. \quad (2)$$

Тогда $f(t, p)$ – рекуррентное движение.

Доказательство. Прежде всего заметим, что в силу неравенства (2) найдется такая последовательность натуральных чисел $(N_k)_{k \in \mathbb{N}} \uparrow +\infty$, что

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \sup_{t \in \square} d_i(f(t, p), f(t + N_k T, p)) = 0, i \in I. \quad (3)$$

Для всех $N = 0, 1, \dots$ обозначим через P_N множество функций

$$t \rightarrow f(t + (N + m)T, p), m = 0, 1, \dots,$$

определенных на отрезке $[0, T]$. Далее обозначим через $\dot{P}_N$ замыкание множества P_N и, принимая во внимание тот факт, что пространство V метризуемо, заметим, что любое множество P_N равномерно непрерывно на $[0, T]$, т. е. для каждого $\eta > 0$ существует такое $\delta > 0$, что при всех $m = 0, 1, \dots$

$$d_i(f(t_1 + (N + m)T, p), f(t_2 + (N + m)T, p)) < \eta, i \in I, \quad (4)$$

всякий раз, когда $|t_1 - t_2| < \delta$ [12, с. 460, 462, 477].

В самом деле, для простоты обозначений положим

$$p_m = f(mT, p), m = 0, 1, \dots,$$

и заметим, что в силу аксиомы (а3)

$$f(t + mT, p) = f(t, f(mT, p)) = f(t, p_m).$$

Поскольку пространство V компактно, то функция $(t, x) \rightarrow g^t x$ равномерно непрерывна на множестве $[0, T] \times V$, т. е. для всех $\eta > 0$ и $i \in I$ существуют такие $\delta > 0$ и $j \in I$, что на $[0, T] \times V$

$$d_i(f(t_1, q), f(t_2, r)) < \eta$$

всякий раз, когда $d_j(q, r) < \delta$ и $|t_1 - t_2| < \delta$ [12, с. 458]. Поэтому без какой-либо потери общности можем считать, что для всех $m = 0, 1, \dots$

$$d_i(f(t_1, p_m), f(t_1, r)) < \frac{\eta}{3},$$

$$d_i(f(t_2, p_m), f(t_2, r)) < \frac{\eta}{3}$$

и

$$d_i(f(t_1, r), f(t_2, r)) < \frac{\eta}{3}$$

при всех $d_j(p_m, r) < \delta$ и $|t_1 - t_2| < \delta$.

Таким образом, согласно неравенству треугольника для всех $m = 0, 1, \dots$

$$d_i(f(t_1, p_m), f(t_2, p_m)) \leq d_i(f(t_1, p_m), f(t_1, r)) + \\ + d_i(f(t_2, p_m), f(t_2, r)) + d_i(f(t_1, r), f(t_2, r)) < \eta$$

всякий раз, когда $d_j(p_m, r) < \delta$ и $|t_1 - t_2| < \delta$, т. е. множество P_0 равномерно непрерывно.

Заметим теперь, что неравенство (4) выполняется равномерно относительно N , т. е. все множества P_N равномерно непрерывны. Значит, согласно третьей теореме Асколи все множества $\dot{P}_N$ компактны в топологии равномерной сходимости [12, с. 489]. Кроме того, по построению

$$P_0 \supset P_1 \supset \dots \supset P_N \supset \dots,$$

а в силу равенства (3) каждое множество $\dot{P}_N$ инвариантно. Следовательно,

$$\dot{P}_0 = \dot{P}_1 = \dots = \dot{P}_N = \dots \quad (5)$$

Заметим теперь, что в силу равенства (3)

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \sup_{t \in \square} d_i(f(t, p), f(t - N_k T, p)) = 0, i \in I.$$

Для всех $N = 0, 1, \dots$ обозначим через P'_N множество функций

$$t \rightarrow f(t - (N - m)T, p), m = 0, 1, \dots,$$

определенных на отрезке $[0, T]$. Пусть $\dot{P}'_N$ – замыкание множества P'_N . Тогда, действуя так же, как и выше, несложно показать, что все множества $\dot{P}'_N$ компактны в топологии равномерной сходимости, инвариантны и удовлетворяют условию

$$\dot{P}'_0 = \dot{P}'_1 = \dots = \dot{P}'_N = \dots = \dot{P}'_0. \quad (6)$$

Очевидно, что при любом $p \in V$, для которого выполнены условия теоремы 1, каждая точка последовательности функций $(f(t + mT, p))_{m \in \mathbb{N}}$ является ее точкой сгущения, а множество $\dot{P}'_0$ – наименьшим замкнутым множеством, содержащим все эти точки. Поэтому согласно компактности и инвариантности множеств $\dot{P}_N, \dot{P}'_N$ и равенствам (5), (6) несложно заметить, что замыкание $\dot{K}$ траектории K движения $f(t, p)$ – компактное минимальное множество. Значит, в силу определения Биркгофа $f(t, p)$ – рекуррентное движение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное практическое значение теоремы 1 состоит в том, что она фактически намечает простой путь построения рекуррентных движений на V , ранее неизвестный.

В самом деле, пусть T – некоторое положительное число и пусть $f(t, p)$ – произвольное движение. Предположим, что для каждого $\varepsilon > 0$ существует такое $N_\varepsilon \in \mathbb{N}$, что

$$\|\varphi_s^{-1}(f(p) - \varphi_s^{-1}(f(N_\varepsilon T, p))\| < \varepsilon$$

на соответствующей карте (Φ_s, φ_s) атласа $(\Phi_s, \varphi_s)_{s \in S}$. Тогда, как видно из доказательства теоремы 1, $f(t, p)$ – рекуррентное движение, т. е. для построения $f(t, p)$ нужно подобрать некоторый численный метод и соответствующее ему число T .

Остается добавить, что согласно результатам статьи [13] данный подход может быть применен к построению асимптотических рекуррентных решений неавтономных систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. СПб.: Профессия, 2007. 747 с.
2. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Наука, 1981. 568 с.
3. Баутин Н.Н., Леонтович Е.А. Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости. М.: Наука, 1990. 488 с.
4. Аносов Д.В. Геодезические потоки на замкнутых римановых многообразиях отрицательной кривизны // *Тр. МИАН СССР*. 1967. Вып. 90. С. 3–210.
5. Арнольд В.И. Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1978. 304 с.
6. Дзюба С.М. О некоторых свойствах движений динамических систем на компактных многообразиях // *Вестник российских университетов. Математика*. 2025. Т. 30. № 149. С. 28–40.
7. Немыцкий В.В., Степанов В.В. Качественная теория дифференциальных уравнений. М.: Эдиториал УРСС, 2004. 550 с.
8. Биркгоф Д. Динамические системы. Ижевск: Удмуртский университет, 1999. 408 с.
9. Cheban D.N. Asymptotically Almost Periodic Solutions of Differential Equations. New York: Hindawi Publishing Corporation, 2009. 204 p.
10. Афанасьев А.П., Дзюба С.М. О новых свойствах рекуррентных движений и минимальных множеств динамических систем // *Вестник российских университетов. Математика*. 2021. Т. 26. № 133. С. 5–14.
11. Dzyuba S.M. On the Interrelation of Motions of Dynamical Systems on Compact Manifolds // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2023. V. 44. № 7. P. 2630–2637.
12. Шварц Л. Анализ / пер. с фр. Б.П. Пугачева: в 2 т. / под ред. С.Г. Крейна. М.: Мир, 1972. Т. 2. 528 с.
13. Дзюба С.М., Емельянова И.И. О рекуррентных и обобщенно-рекуррентных решениях неавтономных дифференциальных уравнений // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 69–76.

Для цитирования: Дзюба С.М., Емельянова И.И. Об одном новом свойстве рекуррентных движений динамических систем на компактных многообразиях // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 1 (29). С. 86–93.

ON A NEW PROPERTY OF RECURRENT MOTIONS OF DYNAMIC SYSTEMS ON COMPACT MANIFOLDS

S.M. DZYUBA, Dr. Sc., I.I. EMEL'YANOVA, Postgraduate

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

Based on the definitions of minimal set and recurrent motion introduced by J. Birkhoff at the beginning of the last century, a new sufficient condition for the recurrence of motions of dynamical systems on a topological compact manifold V is obtained. This condition gives a fairly complete picture of the structure of recurrent motion as a function of time on V and, thus, organically complements Birkhoff's classical definition.

One of the main results of this paper is that it leads to a new method of approximate recurrent movements. This method can be applied without fundamental changes to the construction of asymptotic recurrent solutions of nonautonomous systems of ordinary differential equations.

Keywords: topological compact manifold, dynamical systems, recurrent motions.

Поступила в редакцию/received: 30.10.2025; после рецензирования/revised: 10.11.2025;
принята/accepted: 12.11.2025

УДК 681.5

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-1-93-108

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ РИСК-МЕНЕДЖМЕНТОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ TELEGRAM-БОТА

Н.Г. МАРИЛОВ, асп., Л.В. КОЗЫРЕВА, д-р техн. наук, Е.И. МАРИЛОВА, студ.

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

© Марилов Н.Г., Козырева Л.В., Марилова Е.И., 2026

В статье приведено определение интеграционного подхода к оценке профессиональных рисков, реализованного в виде Telegram-бота. Подход синтезирует три взаимодополняющих метода: детерминированную оценку на основе специальной оценки условий труда (СОУТ), вероятностное моделирование по методу Монте-Карло и оценку неопределенности по руководству GUM. Проведенная апробация решения установила его эффективность, выражающуюся в повышении оперативности оценки и росте вовлеченности персонала. Сравнительный анализ выявил, что в 40 % случаев точечные оценки СОУТ соответствовали интервальным данным модели, а в 15 % – оказались заниженными. Данный подход является прямым развитием традиционных методов, преодолевающим их ограничения за счет комплексного учета вероятностной природы и неопределенности исходных данных, что позволяет перейти от реактивного к превентивному управлению рисками.

Ключевые слова: профессиональные риски, оценка рисков, Telegram-бот, метод Монте-Карло, GUM, СОУТ, цифровизация охраны труда, риск-менеджмент.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективное управление профессиональными рисками является краеугольным камнем современной системы охраны труда. Несмотря на законодательное закрепление риск-ориентированного подхода, его практическая реализация на многих предприятиях сталкивается с системными испытаниями. К ним относятся:

преобладание качественных и полуколичественных методов оценки, носящих зачастую субъективный и дискретный характер;

низкая оперативность актуализации реестров рисков;

слабая вовлеченность персонала в процессы идентификации опасностей из-за громоздких и неудобных механизмов обратной связи.

Это приводит к тому, что система управления охраной труда (СУОТ) функционирует в реактивном режиме, фокусируясь на ликвидации последствий, а не на превентивных мероприятиях [1].

Обзор научной литературы и практик позволяет выделить несколько ключевых подходов к оценке профессиональных рисков.

Традиционные методы

Наиболее распространены методы, основанные на построении матриц риска (риск = вероятность × тяжесть последствий), экспертных оценках и данных СОУТ [2]. Их главным недостатком является детерминированность – опора на точечные, усредненные значения параметров, что не учитывает стохастическую природу производственных процессов и не позволяет оценить погрешность итогового результата.

Статистические методы

Применяются вероятностно-статистические методы, такие как имитационное моделирование по методу Монте-Карло и анализ неопределенностей по руководству GUM [3]. Однако их интеграция в практику управления профессиональными рисками остается фрагментарной и несистематизированной.

Цифровизация СУОТ

Тренд на цифровизацию находит свое отражение в разработке различных программных комплексов и мобильных приложений для управления охраной труда [4, 5]. Часто они представляют собой цифровые аналоги бумажных журналов и анкет, не предлагая принципиально новых математических моделей для анализа данных.

Таким образом, выявлено противоречие между наличием мощного аппарата статистического анализа неопределенностей, применяемого в других областях знаний, и его ограниченным использованием в практике управления профессиональными рисками. Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью преодоления этого разрыва путем разработки интегрального подхода, сочетающего строгость статистических методов с практико-ориентированностью и доступностью цифровых инструментов. Это позволит перейти от точечных оценок к интервальным, тем самым повысив обоснованность и точность управленческих решений в СУОТ.

Целью работы является разработка и апробация алгоритма оценки профессиональных рисков, повышающего достоверность расчетов за счет синтеза метода Монте-Карло, руководства GUM и данных СОУТ, с его последующей реализацией в виде программного решения (Telegram-бота) для оперативного сбора данных и мониторинга.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Реализовать алгоритм в виде кросс-платформенного программного интерфейса (Telegram-бота) на языке Python, обеспечивающего интерактивный ввод данных и автоматизированный расчет [6, 7].

2. Провести апробацию разработанного решения на реальном производственном объекте, оценив его эффективность по критериям оперативности выявления опасностей и вовлеченности персонала.

Внедрение алгоритма оценки профессиональных рисков, основанного на синтезе метода Монте-Карло, руководства GUM и данных СОУТ и реализованного в виде Telegram-бота, позволит достичь статистически значимого повышения:

1) оперативности выявления опасностей по сравнению с традиционными плановыми процедурами;

2) уровня вовлеченности персонала в процессы управления охраной труда.

МЕТОДЫ

МЕТОД 1. Суть оценки профессиональных рисков на основе материалов СОУТ основывается на составлении перечня риск-образующих факторов по материалам СОУТ (табл. 1), определении вероятности наступления риск-образующего фактора для каждого идентификатора, проведении расчета значения профессионального риска и определении итогового значения уровня профессионального риска.

Шаг 1: составление перечня риск-образующих факторов по материалам СОУТ.

Таблица 1. Риск-образующие факторы

Наименование риск-образующего фактора	Идентификатор риск-образующего фактора
Химический	Х
Биологический	Б
Аэрозоли преимущественно фиброгенного действия	АПДФ
Шум	Ш
Инфразвук	И
Ультразвук воздушный	УЗ
Вибрация общая	ВО
Вибрация локальная	ВЛ
Неионизирующие излучения	НИ
Ионизирующие излучения	ИИ
Параметры микроклимата	Мик
Параметры световой среды	Св
Тяжесть трудового процесса	ТТП
Напряженность трудового процесса	НТП

Шаг 2: описание процесса оценки профессионального риска с использованием формул Фишберна, позволяющих определить весовые коэффициенты, которые образуют убывающую арифметическую прогрессию.

Весовые коэффициенты вероятности наступления риск-образующего фактора определялись по первой формуле Фишберна для каждого уровня. Для пяти уровней ($n = 5$):

$$B_{nm} = \frac{2(n - i + 1)}{n(n + 1)}, i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Итоги расчета весовых коэффициентов вероятности наступления риск-образующих факторов занесем в табл. 2.

Таблица 2. Итоги расчетов весовых коэффициентов вероятности наступления риск-образующих факторов

Вероятность наступления риск-образующего фактора		Весовой коэффициент (B_{nm})	Описание вероятности наступления риск-образующего фактора
A	Крайне высокая	0,33	Условия труда, при которых появляются и развиваются тяжелые формы профессиональных заболеваний в период трудовой деятельности
B	Высокая	0,27	Условия труда, при которых происходят стойкие функциональные изменения в организме работника, приводящие к появлению и развитию профессиональных заболеваний легкой и средней степени тяжести в период трудовой деятельности
C	Значительная	0,2	Условия труда, при которых происходят стойкие функциональные изменения в организме работника, возникающие после продолжительной экспозиции (15 и более лет)
D	Возможная	0,13	Условия труда, при которых измененное функциональное состояние организма работника восстанавливается, как правило, при более длительном, чем до начала следующего рабочего дня (смены), прекращении воздействия данных факторов, и увеличивается риск повреждения здоровья
E	Минимальная	0,07	Условия труда, при которых измененное функциональное состояние организма работника восстанавливается во время регламентированного отдыха или к началу следующего рабочего дня (смены)

Шаг 3: определение весовых коэффициентов ущерба от риск-образующего фактора по второй формуле Фишберна. Для пяти уровней ($i = 5$):

$$C_{im} = \frac{2^{m-k}}{2^k - 1}, k = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Итоги расчетов весовых коэффициентов ущерба от риск-образующих факторов занесем в табл. 3.

Таблица 3. Итоги расчетов весовых коэффициентов
ущерба от риск-образующих факторов

Вероятность наступления риск-образующего фактора		Весовой коэффициент (C_{im})	Описание вероятности наступления риск-образующего фактора
A	Вредный, подкласс 3.4	0,52	Уровни воздействия вредных и опасных производственных факторов (ВОПФ) способны привести к появлению и развитию тяжелых форм профессиональных заболеваний
B	Вредный, подкласс 3.3	0,26	Уровни воздействия ВОПФ способны вызвать стойкие функциональные изменения в организме работника, появление и развитие профессиональных заболеваний легкой и средней степени тяжести
C	Вредный, подкласс 3.2	0,13	Уровни воздействия превышают гигиенические нормативы, происходит развитие начальных форм профессиональных заболеваний
D	Вредный, подкласс 3.1	0,06	Уровни воздействия превышают уровни гигиенических нормативов, организму человека требуется более длительное восстановление, увеличивается риск повреждения здоровья
E	Оптимальный и допустимый (1-й и 2-й класс соответственно)	0,03	Уровни воздействия не превышают гигиенических нормативов, поддерживается высокий уровень работоспособности, организм восстанавливается во время отдыха или к началу следующего рабочего дня

Шаг 4: определение вероятности наступления n -го риск-образующего фактора (P_{nm}) по полученным весовым коэффициентам вероятности и ущерба по каждому из идентифицированных факторов:

$$P_{nm} = \frac{B_{nm}}{\sum_{n=1}^n B_{nm}}. \quad (3)$$

Шаг 5: расчет значений профессионального риска по каждому из идентифицированных риск-образующих факторов R_{nm} :

$$R_{nm} = P_{nm} \cdot C_{im}. \quad (4)$$

Шаг 6: определение итогового значения уровня профессионального риска на основе материалов СОУТ по формуле

$$R_{COYT} = \sum_{k=1}^{k=n} R_{nm}. \quad (5)$$

Описание ущерба от риск-образующего фактора соответствует определению классов условий труда согласно Федеральному закону от 28.12.2013 № 426-ФЗ.

МЕТОД 2. Метод Монте-Карло преодолевает ограничения традиционной формулы риска ($R = P \cdot S$), заменяя точечные оценки на распределения вероятностей. Результатом является не одно число, а полная картина возможных исходов.

Шаг 1: определение распределений.

Вероятность (P): задается бета-распределением на интервале $[0, 1]$, что идеально для моделирования вероятностей. Его параметры настраиваются на основе исторических данных или экспертных оценок.

Серьезность (S): используется логнормальное распределение для учета редких, но катастрофических событий (или нормальное, если данные группируются вокруг среднего).

Шаг 2: проведение симуляции.

С помощью ПО (Python) выполняется множество итераций (например, 10 000). На каждой итерации:

случайно выбираются значения P и S из их распределений;

вычисляется $R = P \cdot S$.

Все значения R сохраняются для анализа.

Шаг 3: анализ результатов.

Анализ массива результатов позволяет определить:

ключевые метрики – среднее значение, медиана (50-й перцентиль);

95-й перцентиль, т. е. уровень риска, ниже которого находятся 95 % всех исходов – консервативная оценка для планирования;

вероятность превышения порога, т. е. долю исходов, где риск превысил допустимый уровень.

МЕТОД 3. Анализ неопределенности по руководству GUM. Для оценки погрешности в модели риска $R = P \cdot S$ применяется закон распространения неопределенностей. Суммарная относительная стандартная неопределенность для некоррелированных величин рассчитывается как

$$\left(\frac{uc(R)}{R}\right)^2 = \left(\frac{u(P)}{P}\right)^2 + \left(\frac{u(S)}{S}\right)^2, \quad (6)$$

где $uc(R)$ – суммарная стандартная неопределенность итоговой оценки риска R ; $u(P)$, $u(S)$ – стандартные неопределенности оценок вероятности и тяжести последствий, полученные на основе анализа вариативности исходных данных и экспертных мнений.

Данный подход позволяет количественно оценить доверительный интервал, обусловленный неполнотой знаний и неточностью входных данных.

Вероятность (P) события носит скорее эпистемический (обусловленный неполнотой знания) характер, нежели частотный. Поэтому для оценки $u(P)$ применялись следующие методы:

источник А (исторические данные): при наличии статистики (k событий за n периодов) $P = k/n$. В этом случае стандартную неопределенность $u(P)$ можно оценить с помощью доверительного интервала для биномиального распределения. Для достаточно больших n используется аппроксимация нормальным распределением:

$$u(P) = \sqrt{\frac{P(1-P)}{n}}; \quad (7)$$

источник Б (экспертные оценки): при опросе экспертов, дающих интервальные оценки, $u(P)$ вычисляется как

$$u(P) = \sqrt{\sigma^2 + \bar{u}^2}, \quad (8)$$

где σ – стандартное отклонение точечных оценок P_i , данных экспертами (это мера межэкспертного разброса); $\bar{u}$ – среднее арифметическое индивидуальных стандартных неопределенностей u_i каждого эксперта (это мера средней внутренней уверенности экспертов).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}, \quad (9)$$

где N – число экспертов; P_i – точечная оценка i -го эксперта; $\bar{P}$ – среднее арифметическое всех P_i .

Каждый эксперт дает интервальную оценку (например, «от a_i до b_i »). Стандартная неопределенность u_i для каждого эксперта вычисляется в зависимости от предположения о распределении:

для нормального распределения (если эксперт указал 95%-й доверительный интервал):

$$u_i = \frac{b_i - a_i}{4} \quad (10)$$

(так как для нормального распределения 95%-й интервал примерно равен ± 2 стандартных отклонения от среднего);

для равномерного распределения (если предположение о нормальности неоправданно):

$$u_i = \frac{b_i - a_i}{2\sqrt{3}}. \quad (11)$$

Затем вычисляется среднее:

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i. \quad (12)$$

Суммарная неопределенность $u(P)$ объединяет обе компоненты через квадратичное сложение, что корректно для независимых источников неопределенности.

Оценка стандартной неопределенности тяжести последствий, $u(S)$:
источник В (метод аналогичен источнику Б):

$$u_i = \frac{a_i}{2} \quad (13)$$

(в предположении нормального распределения). Далее $u(S)$ вычисляется как комбинация разброса между руководителями и средней неточности каждого;

источник Г: в этом случае $u(S)$ выбирается как стандартное отклонение по выборке этих данных.

Полученные значения $u(P)$ и $u(S)$ были занесены в базу данных Telegram-бота в качестве метаданных для каждой идентифицированной опасности.

Теоретическая основа, представленная в предыдущих разделах, была реализована в виде интерактивного Telegram-бота, обеспечивающего доступ к сложным математическим методам через простой и интуитивно понятный интерфейс (рис. 1).

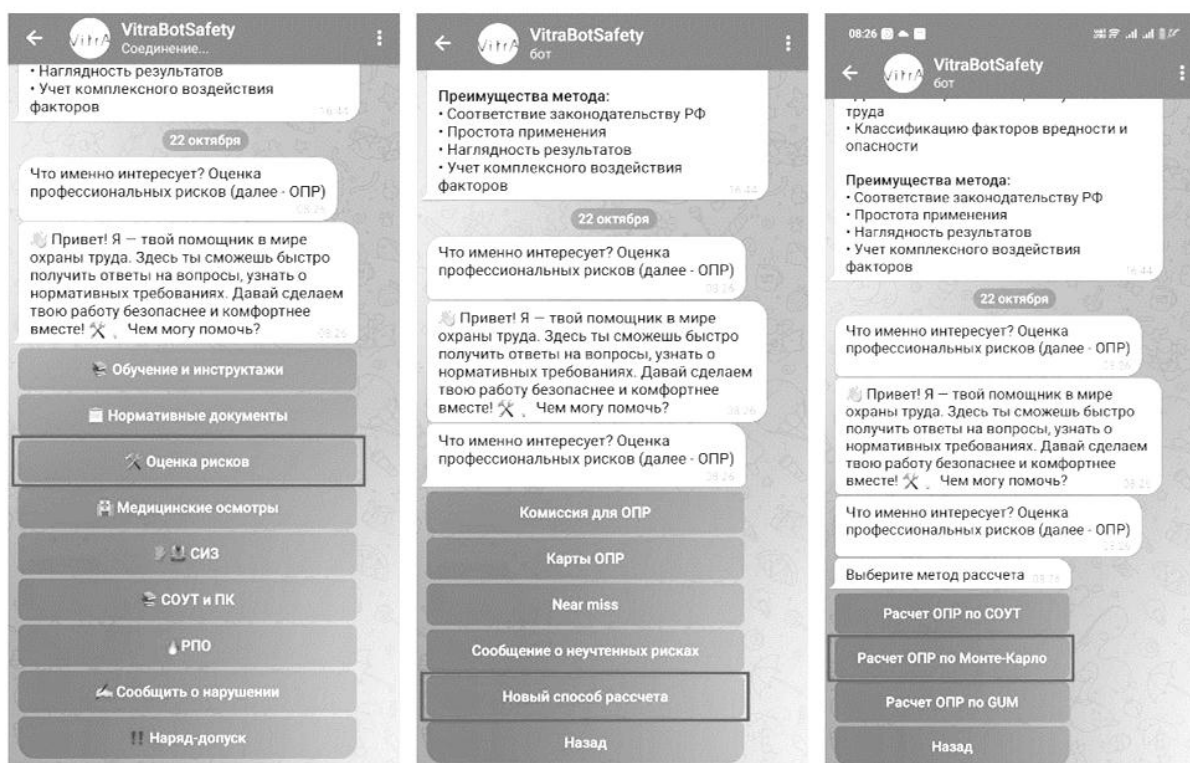


Рис. 1. Общая схема взаимодействия пользователя с ботом

На рис. 2 представлен пошаговый процесс оценки риска по методу СОУТ. Пользователь последовательно выбирает риск-образующие факторы из стандартизированного перечня (см. табл. 1), после чего для каждого фактора назначает соответствующий уровень риска (А–Е). Система автоматически применяет весовые коэффициенты, рассчитанные по формулам Фишберна (1) и (2), и вычисляет интегральный показатель риска по формуле (5).

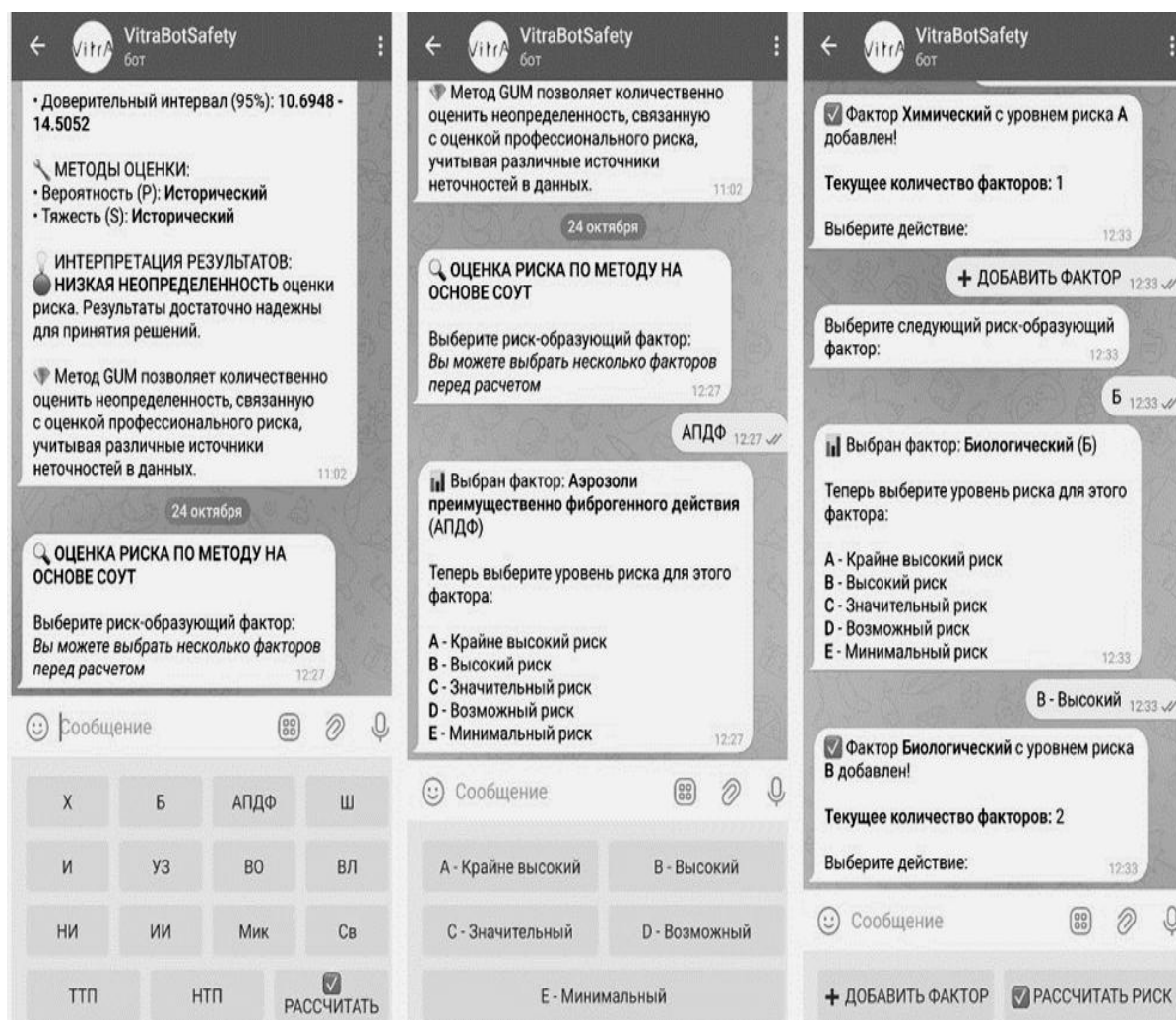


Рис. 2. Пример диалога оценки риска по методу СОУТ

Особенностью реализации является возможность кумулятивной оценки нескольких факторов с формированием сводного отчета (рис. 3), вклада каждого фактора и определения интегрального показателя риска с рекомендациями по мерам контроля.

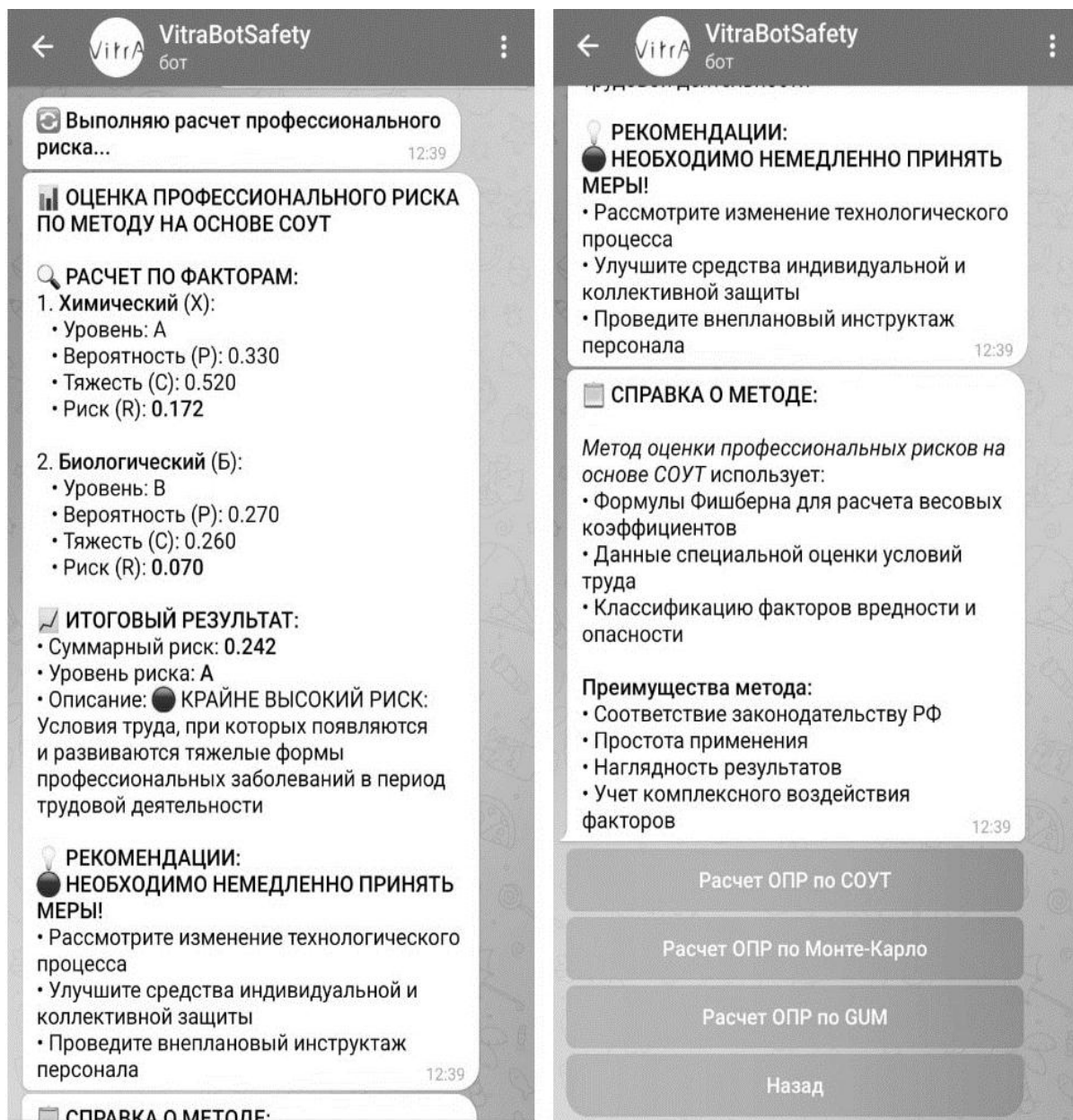


Рис. 3. Пример отчета по методу СОУТ

Интерфейс для метода Монте-Карло (рис. 4) проводит вероятностный анализ через диалог: пользователь выбирает тип распределений для вероятности (P) и тяжести (S), вводит их параметры и количество итераций. Система выполняет моделирование (тысячи расчетов) и выводит гистограмму распределения риска с ключевыми статистиками: среднее значение, медиана и 95-й перцентиль (рис. 5).



Рис. 4. Пример взаимодействия с ботом по методу Монте-Карло



Рис. 5. Пример визуализации результатов метода Монте-Карло

Реализация метода GUM (рис. 6) предусматривает два альтернативных подхода к оценке неопределенности: экспертный и исторический. При выборе экспертного метода бот запрашивает интервальные оценки от нескольких специалистов и автоматически вычисляет стандартные неопределенности по формулам (8)–(12). При выборе исторического метода используются формулы (7) и (13) для расчета на основе статистических данных.

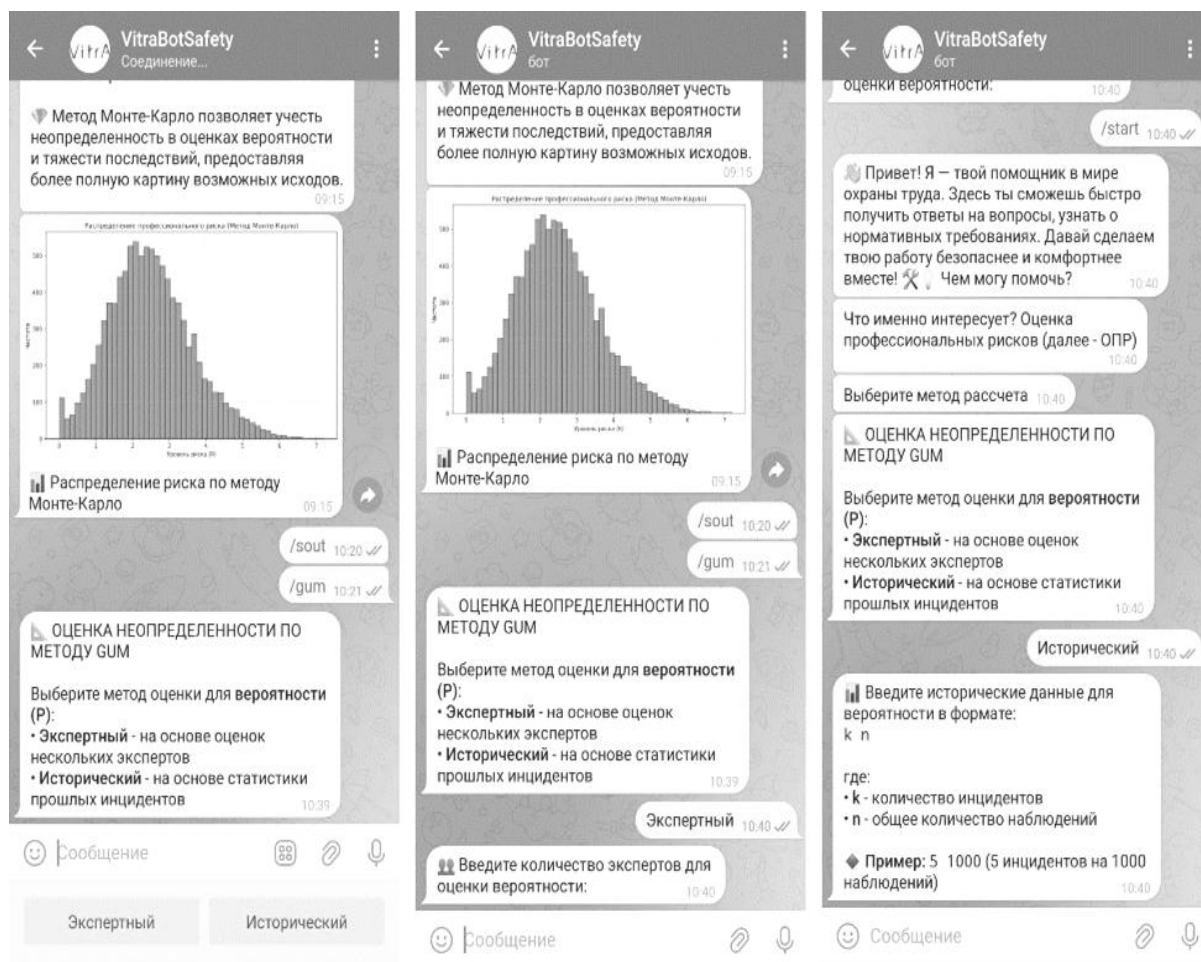


Рис. 6. Пример диалога метода GUM

Результатом оценки (рис. 7) является количественная характеристика неопределенности оценки риска, выраженная через суммарную стандартную неопределенность $uc(R)$ по формуле (6) и доверительный интервал, что обеспечивает более обоснованный подход к принятию решений в условиях неполноты информации.

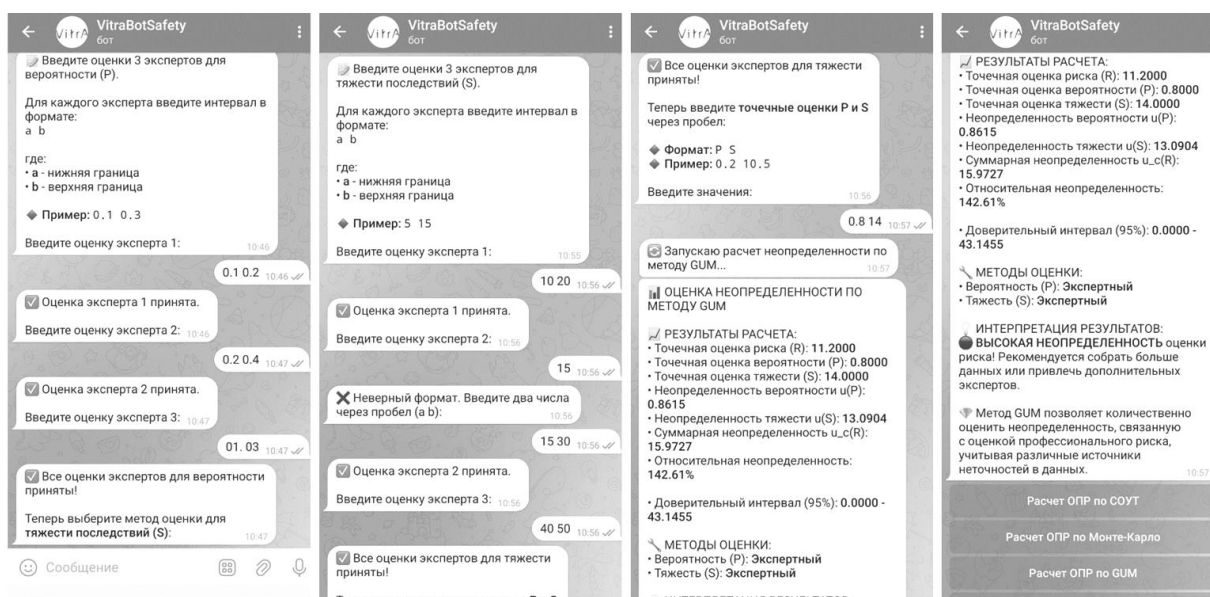


Рис. 7. Пример отчета по методу GUM

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для оценки эффективности предложенного решения проведен пилотный проект на предприятии по производству керамических изделий с численностью персонала 150 чел. Период внедрения составил 12 мес. Данные сравнительного анализа до и после внедрения Telegram-бота занесены в табл. 4.

Таблица 4. Сравнительный анализ показателей системы управления профессиональными рисками до и после внедрения Telegram-бота

Показатель	До внедрения	После внедрения	Абсолютное изменение	Относительное изменение
Количество активных пользователей, чел., %	1...2 (1...2 %)	134 (89 %)	+132...133 чел. (+87...88 п.п.)	Увеличение в 67...89 раз
Количество сообщений об опасностях (в месяц), ед.	9...11	49...56	+40...45 сообщений	Увеличение в 4,5...5,5 раза
Время оценки риска	2...3 дня	5...10 мин	Сокращение на 2...3 дня	Сокращение в 200...300 раз
Количество выявленных новых опасностей (за 13 мес.), ед.	5...8	47	+39...42 опасности	Увеличение в 6...9 раз

Данные свидетельствуют о качественном преобразовании системы управления профессиональными рисками после внедрения Telegram-бота, включающем в себя:

1. Повышение вовлеченности – переход от эксклюзивной деятельности специалистов по охране труда к участию всего персонала.
2. Кардинальное ускорение процессов – время оценки рисков сокращено с дней до минут.
3. Значительное расширение базы данных – выявлено в 6...9 раз больше опасностей.
4. Методологическое обогащение – внедрены современные вероятностные методы оценки.
5. Повышение экономической эффективности – сокращение трудозатрат на 97...98 %.

Полученные результаты демонстрируют, что цифровизация процессов оценки рисков через доступные мобильные платформы позволяет преодолеть ключевые ограничения традиционных систем управления охраной труда.

ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный интеграционный подход показал свою эффективность: удобный Telegram-бот повысил вовлеченность персонала. Согласно результатам сравнительного анализа, в 40 % случаев точечная оценка риска по СОУТ совпала с интервалом Монте-Карло, но в 15 % оказалась заниженной относительно 95-го перцентиля, что подтверждает важность учета неопределенности.

Анализ существующих решений демонстрирует, что чат-боты в охране труда применяются узко – для автоматизации рутинных задач (тестирование, наряд-допуски) по линейным сценариям, без аналитики и риск-менеджмента. Это подтверждается обзором исследований: даже новейшие работы, например [9], сосредоточены на автоматизации документооборота, а не на вероятностной оценке рисков, что сохраняет методологический разрыв.

Исследование [10] подтверждает эффективность Telegram-ботов для корпоративных коммуникаций, что коррелирует с нашими выводами о вовлеченности. Однако наше решение качественно отличается, поскольку расширяет функционал бота до сложных аналитических расчетов для риск-менеджмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный Telegram-бот представляет собой современное решение в области оценки профессиональных рисков, сочетающее преимущества детерминированного и вероятностных подходов. Практическая значимость работы подтверждается результатами внедрения, показавшими:

- повышение оперативности оценки рисков в 20...30 раз;
- увеличение вовлеченности персонала в 4...5 раз;
- выявление значительного количества не учтенных ранее опасностей.

Ключевой вывод: Telegram-бот, как некое ноу-хау, вызывает повышенный интерес у сотрудников, что значительно увеличивает их вовлеченность в процесс формирования оценки рисков (risk score). Использование привычного мессенджера снижает психологический барьер для сообщения об опасностях и способствует формированию культуры безопасности.

Перспективы дальнейших исследований:

1. Проведение масштабной апробации на предприятиях различных отраслей. Исследование долгосрочного влияния на показатели травматизма.
2. Разработка модуля интеграции с корпоративными ERP-системами.
3. Адаптация подхода для оценки других видов рисков (экологических, промышленных).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурдо Г.Б., Болотов А.Н. Повышение эффективности инструментов бережливого производства и управления качеством // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 75–89.
2. Об утверждении рекомендаций по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков: Приказ Минтруда и социальной защиты Российской Федерации от 28.12.2021 № 926н. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=411523> (дата обращения: 06.10.2025).
3. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Методы оценки риска для обеспечения безопасности выполнения работ. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=356792> (дата обращения: 06.10.2025).
4. Марилов Н.Г., Козырева Л.В., Лебедев В.В. Цифровая трансформация в области охраны труда в Российской Федерации. *Цифровая экономика и общество: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции* / отв. ред. А.Н. Бородулин. Тверь: ТвГТУ, 2024. С. 28–34.
5. Марилов Н.Г., Козырева Л.В., Калиакберова З.Б. Цифровизация процессов учета, хранения и выдачи средств индивидуальной защиты // *Цифровая экономика и общество: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции* / отв. ред. А.Н. Бородулин. Тверь: ТвГТУ, 2025. С. 125–133.
6. Демиденко А. Telegram Bot. Руководство по созданию бота в мессенджере Телеграм. М.: ЛитРес, 2023. 29 с.
7. Валинурова А.А., Балабанова Н.В., Маценков И.А. Алгоритм разработки Telegram-бота – продуктивного помощника современного бизнеса // *Инженерно-технические науки – машиностроение и технологии*. 2023. № 2. С. 60–67.
8. Телеграм-боты по охране труда. URL: <https://help-ot.ru/ohrana-truda/telegram-boty-po-ohrane-truda/> (дата обращения: 06.10.2025).
9. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Инженерно-строительный институт. Электронная библиотека. URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/3/2024/vr/vr24-1233.pdf/info> (дата обращения: 06.10.2025).
10. Фролов Ю.В., Шепелева Е.В. Использование ботов для повышения эффективности коммуникаций в бизнес-процессах ИТ-компаний // *Вестник Московского городского педагогического университета. Серия: Экономика*. 2024. № 2 (40). С. 99–109.

Для цитирования: Марилов Н.Г., Козырева Л.В., Марилова Е.И. Автоматизация процессов управления риск-менеджментом с применением Telegram-бота // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 1 (29). С. 93–108.

AUTOMATION OF RISK MANAGEMENT PROCESSES USING A TELEGRAM-BOT

N.G. MARILOV, Postgraduate, L.V. KOZYREVA, Dr. Sc.,
E.I. MARILOVA, Student

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

This article defines an integrated approach to assessing professional risks, implemented as a Telegram bot. The approach synthesizes three complementary methods: a deterministic assessment based on the Special Assessment of Working Conditions (SAWC), probabilistic Monte Carlo modeling, and an uncertainty assessment based on the GUM guidelines. A pilot test of the solution demonstrated its effectiveness, resulting in increased assessment timeliness and increased employee engagement. A comparative analysis revealed that in 40 % of cases, the point estimates of the SAWC corresponded to the model's interval data, while in 15 %, they were underestimated. This approach is a direct extension of traditional methods, overcoming their limitations by comprehensively considering the probabilistic nature and uncertainty of the initial data, enabling a transition from reactive to preventive risk management.

Keywords: professional risks, risk assessment, Telegram bot, Monte Carlo method, GUM, SAWC, digitalization of occupational safety, risk management.

Поступила в редакцию/received: 09.10.2025; после рецензирования/revised: 27.10.2025;
принята/accepted: 10.11.2025

УДК 004.942

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-1-108-117

СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ПРИВОДА СТАБИЛИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В.А. СМЕРНОВ¹, инж., В.П. ОРЛОВ², канд. техн. наук

¹АО «ГосМКБ «Вымпел» им. И.И. Торопова»,
125424, Москва, Волоколамское шоссе, 90, e-mail: smirnov007@inbox.ru

²ФГБОУВО «МИРЭА – Российский технологический университет»,
107076, Москва, ул. Стромьнка, 20, e-mail: ovr403@yandex.ru

© Смирнов В.А., Орлов В.П., 2026

Статья посвящена вопросам построения модели привода стабилизации беспилотного летательного аппарата. Обоснована необходимость использования адекватных математических моделей беспилотного летательного аппарата, учитывающих его аэродинамические особенности. В качестве примера исследуется задача стабилизации угловой скорости крена при скачкообразном возмущающем моменте. Проведена серия экспериментов по оценке влияния постоянной времени привода,

рассогласования его скоростных характеристик и вариаций параметров датчиков. Результаты моделирования, представленные в виде переходных процессов, демонстрируют, что для обеспечения достоверности результатов динамическая модель привода в контуре стабилизации должна иметь большее запаздывание, чем реальный привод. Показано, что даже при случайном разбросе постоянных времени элементов системы возможно создание ее работоспособной модели.

Ключевые слова: привод стабилизации, моделирование привода, летательный аппарат, угловая скорость крена, возмущающий момент, переходные процессы, скорость перекладки, постоянная времени, корректирующие устройства, устойчивость системы.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность разработки систем стабилизации для беспилотных летательных аппаратов обусловлена ростом требований к их автономности и надежности. Ключевым аспектом является создание адекватной математической модели привода, что подтверждается активными исследованиями в данной области.

Основой для построения модели привода стабилизации является адекватная математическая модель беспилотного летательного аппарата, учитывающая различные аэродинамические конфигурации [1] и специфику различных типов беспилотных летательных аппаратов, таких как мультикоптеры [2].

Эффективность моделирования определяется комплексным подходом, включающим интеграцию привода в адаптивную систему стабилизации [3] и анализ влияния цифрового обмена данными на его динамические характеристики [4]. Актуальность задачи подтверждается разработкой усовершенствованных методов создания управляющих сил [5] и синтезом адаптивных робастных регуляторов [6]. Данные подходы, наряду с разработкой комплексных систем стабилизации [7, 8], требуют совместного моделирования динамики привода и аппарата.

Международный опыт демонстрирует ключевую роль моделирования как при проектировании конкретных систем [9], так и при создании обобщенных моделей для концептуального проектирования и сравнительного анализа архитектур управления [10].

Новизна работы заключается в комплексном исследовании влияния неидеальностей реального привода в процессе построения его модели.

Цель работы – оценка возможности и условий построения адекватной модели привода стабилизации, обеспечивающей требуемое качество переходных процессов при наличии значительного разброса параметров системы и возмущающих воздействий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки возможности моделирования привода стабилизации рассматривалась задача стабилизации угловой скорости крена при возникновении скачкообразного возмущающего момента достаточно большой величины, чтобы элероны не выходили бы на максимальные значения, равные 20...30 градусов, но выходили на ограничения по скоростной характеристике.

Структурная схема модели системы стабилизации угла крена приведена на рис. 1. Необходимый астатизм достигается за счет обратных связей, охватывающих исполнительные устройства (привода) рулей. При этом образуется астатический контур стабилизации угловой скорости крена, который на рис. 1 выделен пунктиром.

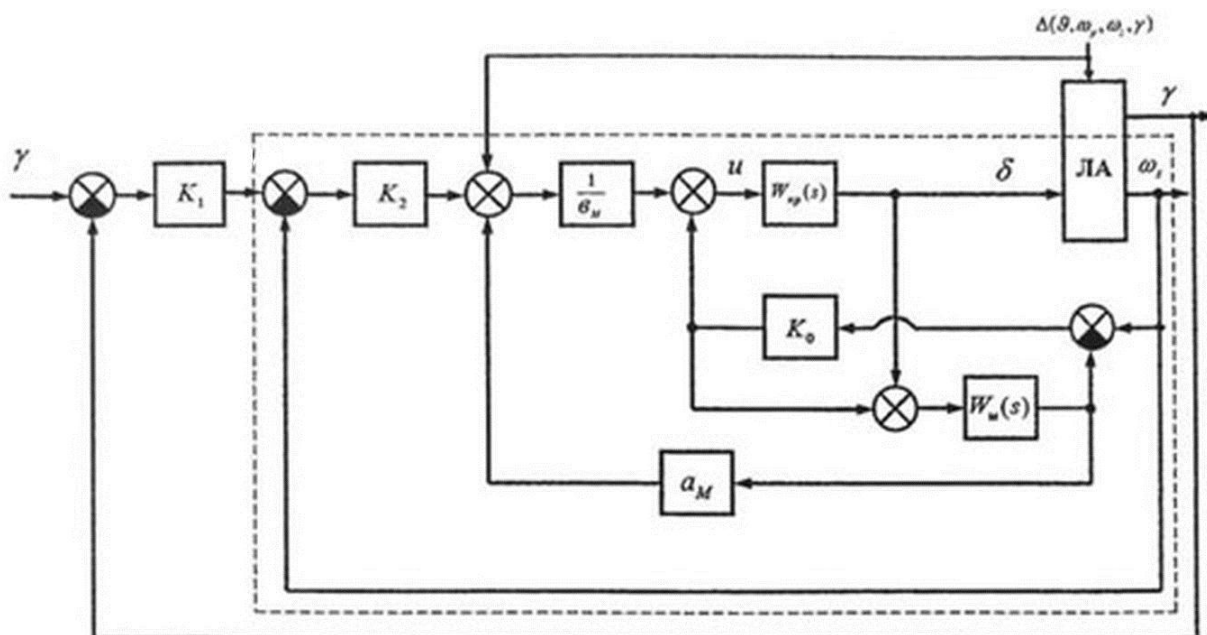


Рис. 1. Структурная схема системы стабилизации угла крена

Передаточная функция эталонной модели имеет вид апериодического звена:

$$W_M(s) = \frac{b_M}{s + a_M} = \frac{b_M}{a_M} \frac{1}{T_M s + 1},$$

где $T_M = a_M^{-1}$ – постоянная времени.

Упрощенная модель движения беспилотного летательного аппарата на основе модели углового движения:

$$\dot{\omega}_z + a_M \omega_z + b_M \delta_p = 0,$$

где ω_z – угловая скорость крена; a_M – коэффициент усиления системы; b_M – коэффициент инерционности системы; δ_p – угловая скорость отклонения рулей. При этом сам угол крена обозначим как γ .

Были выбраны следующие значения передаточных чисел системы: $a_M = 1,1$; $b_M = 131$; $K_0 = 10$; $K_1 = 7,5$; $K_2 = 17$, где K_0 – отношение рассчитанной угловой скорости к потребной угловой скорости; K_1 – отношение угла крена к угловой скорости крена; K_2 – отношение угла крена к углу отклонения руля.

На рис. 2 приведены переходные процессы по угловой скорости крена (возникновение и обнуление угловой скорости) при отработке ступенчатого момента, эквивалентного отклонения элеронов на 15 град при номинальных параметрах беспилотного летательного аппарата и при совпадении постоянной времени для реального привода и его модели.

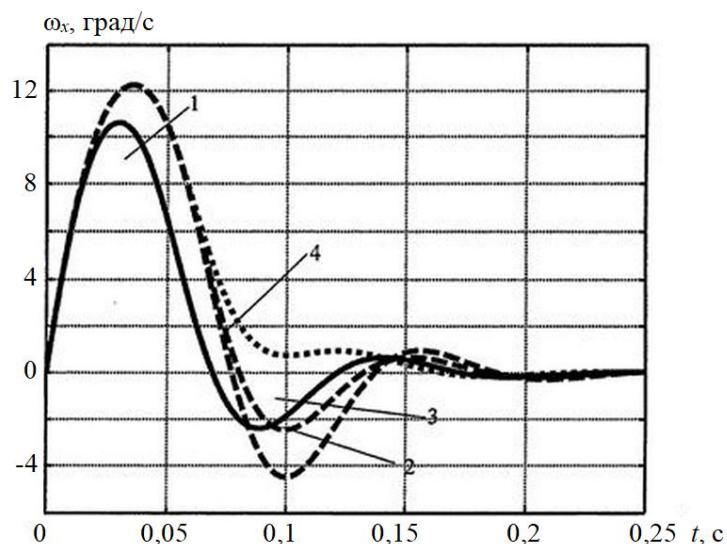


Рис. 2. Результаты моделирования № 1

Для рис. 2 приняты следующие обозначения систем управления:

1 – с использованием сигнала с датчика перемещения штока привода без учета действия нагрузки;

2–4 – с учетом действия нагрузки: 2 – при совпадении скоростных характеристик реального привода и его модели с использованием сигнала с модели привода; 3 – при отличии скоростных характеристик модели (± 500 град/с) от реального привода (500/400 град/с) с использованием сигнала с модели; 4 – при отличии скоростных характеристик модели (± 400 град/с) от реального привода (500/400 град/с) с использованием сигнала с модели.

Анализ полученных результатов моделирования № 1 показывает:

учет в модели реального привода действия шарнирных моментов предсказуемо приводит к ухудшению процессов (максимальное отклонение увеличивается на 17 %);

наблюдается колебательность процессов, для устранения которой необходимо учитывать инерционность датчиков угловых скоростей и фильтра. С этой целью в исходную систему были введены корректирующие устройства, учитывающие динамику линейной модели привода и запаздывание, вносимое датчиками угловых скоростей и фильтром.

На рис. 3 приведены переходные процессы по угловой скорости крена (возникновение и обнуление угловой скорости) при отработке ступенчатого момента, эквивалентного отклонения элеронов на 15 град, при номинальных параметрах беспилотного летательного аппарата и для трех значений постоянной реального привода системы. Моделирование проводилось при совпадении скоростных характеристик реального привода и его модели без учета действия шарнирных моментов (± 500 град/с).

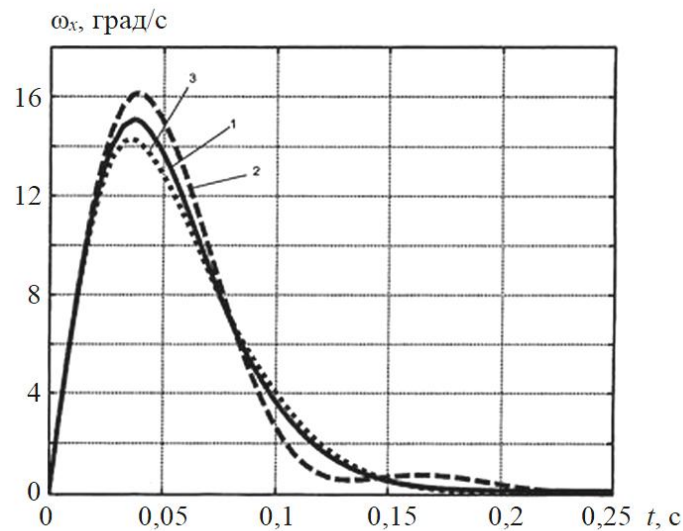


Рис. 3. Результаты моделирования № 2

Для рис. 3 приняты следующие обозначения:

- 1 – при совпадении динамических характеристик реального привода и его модели;
- 2 – при увеличении постоянной времени реального привода на 30 %;
- 3 – при уменьшении постоянной времени реального привода на 30 %.

На рис. 4 приведены переходные процессы по угловой скорости крена при номинальных параметрах беспилотного летательного аппарата и для трех значений постоянной реального привода системы. Моделирование проводилось при отличии скоростных характеристик модели (± 500 град/с) от реального привода (500/400 град/с).

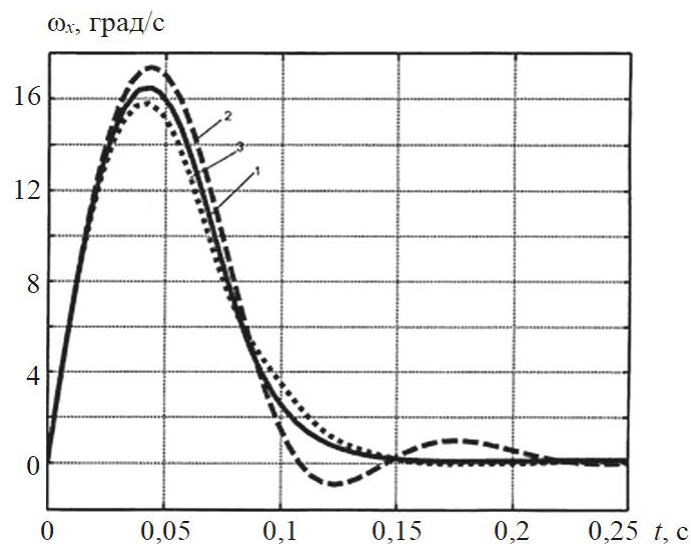


Рис. 4. Результаты моделирования № 3

Для рис. 4 приняты следующие обозначения:

- 1 – при совпадении динамических характеристик реального привода и его модели;

- 2 – при увеличении постоянной времени реального привода на 30 %;
- 3 – при уменьшении постоянной времени реального привода на 30 %.

Анализ полученных результатов моделирования № 2 и 3 показывает, что динамическая модель привода системы должна иметь большее запаздывание, чем реальный привод.

На рис. 5 приведены переходные процессы по угловой скорости крена при номинальных параметрах беспилотного летательного аппарата для трех значений постоянной реального привода системы. Моделирование проводилось при отличии скоростных характеристик модели (± 500 и ± 400 град/с) от реального привода (500/400 град/с).

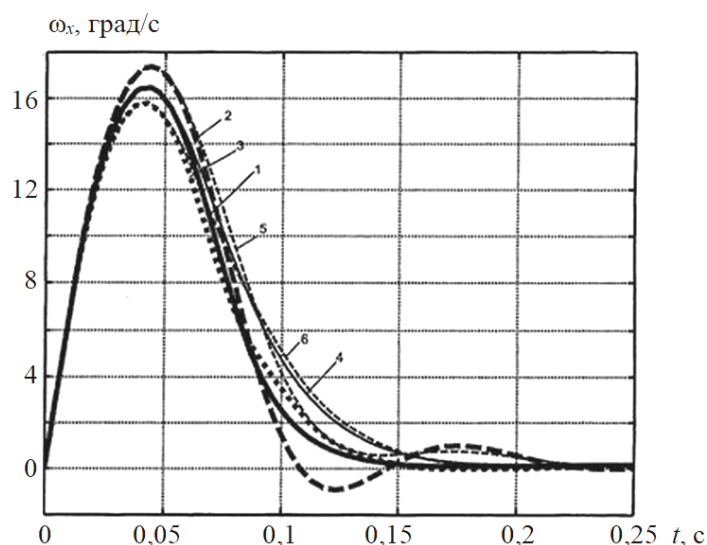


Рис. 5. Результаты моделирования № 4

Для рис. 5 приняты следующие обозначения:

1–3 – скорость перекладки привода модели (± 500 град/с) от реального привода (500/400 град/с): 1 – при совпадении динамических характеристик реального привода и его модели; 2 – при увеличении постоянной времени реального привода на 30 %; 3 – при уменьшении постоянной времени реального привода на 30 %;

4–6 – скорость перекладки привода модели (± 400 град/с) от реального привода (500/400 град/с): 4 – при совпадении динамических характеристик реального привода и его модели; 5 – при увеличении постоянной времени реального привода на 30 %; 6 – при уменьшении постоянной времени реального привода на 30 %.

Результаты моделирования № 4 показывают: при вариации постоянной времени реального привода очевидно, что чем более быстродействующий привод, тем лучше качество переходных процессов.

На рис. 6 приведены переходные процессы по угловой скорости крена при номинальных параметрах беспилотного летательного аппарата для двух значений постоянной времени реального привода и его модели.

Моделирование проводилось при отличии скоростных характеристик модели (± 500 и ± 400 град/с) от реального привода (500/400 град/с).

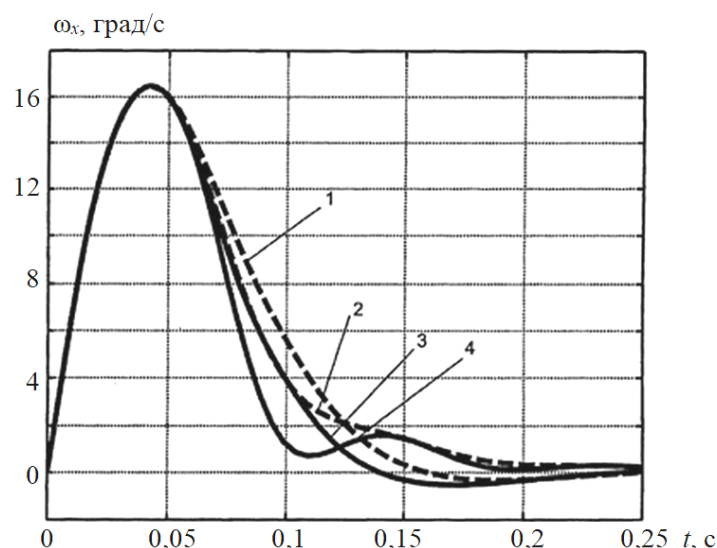


Рис. 6. Результаты моделирования № 5

Для рис. 6 приняты следующие обозначения:

1, 2 – скорость перекладки привода модели (± 400 град/с): 1 – при увеличении постоянной времени модели привода на 30 %; 2 – при уменьшении постоянной времени модели привода на 30 %;

3, 4 – скорость перекладки привода модели (± 500 град/с): 3 – при увеличении постоянной времени модели привода на 30 %; 4 – при уменьшении постоянной времени модели привода на 30 %. Анализ полученных результатов моделирования № 5 показывает: модель должна иметь большее запаздывание, чем реальный привод, что выражается в большем значении постоянной времени модели привода и в меньшей скорости перекладки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для окончательного определения возможности моделирования привода стабилизации примем, что точные параметры беспилотного летательного аппарата, постоянные времени привода элеронов и характеристики датчиков угловых скоростей неизвестны. Важно, чтобы система была груба к их разбросу, причем разброс возможен в разных комбинациях параметров из некоторого интервала значений.

Для учета случайности в разбросе параметров беспилотного летательного аппарата, постоянных времени привода элеронов и характеристик датчиков угловых скоростей проводилось моделирование из заданного интервала для 40 случайных комбинаций значений параметров системы из интервала, определяемого нижней и верхней границами диапазона изменения параметров. Границы диапазона изменения параметров определялись как $\pm 50\%$ от их номинальных значений.

На рис. 7 приведены переходные процессы по углу крена (возникновение и обнуление угла крена) при отработке ступенчатого момента, эквивалентного отклонения элеронов на 15 град при случайном разбросе параметров беспилотного летательного аппарата, постоянных времени привода элеронов и характеристик датчиков угловых скоростей, датчика угла крена в диапазоне $\pm 50\%$. При моделировании использовалось 40 реализаций со случайными соотношениями

комбинаций значений параметров из заданного диапазона, скорость перекладки модели привода бралась равной ± 400 град/с.

Для сравнения на рис. 8 приведены переходные процессы по углу крена системы управления, использующей сигнал с реального привода.

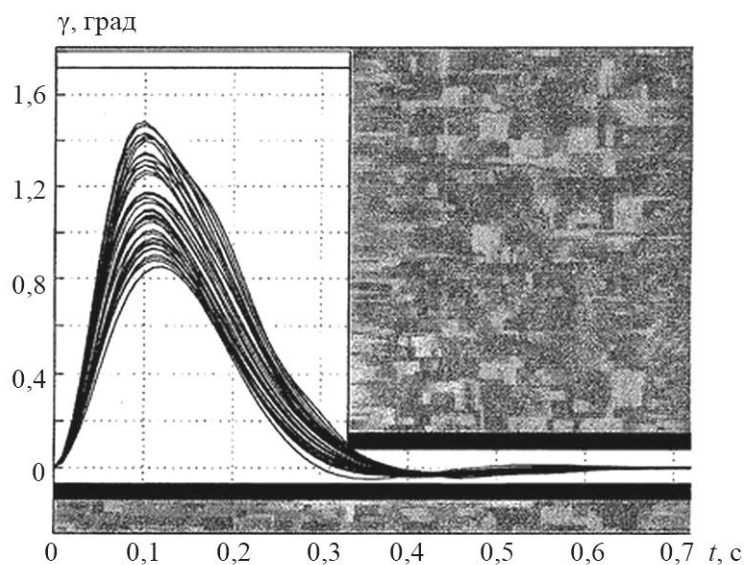


Рис. 7. Результаты моделирования № 6

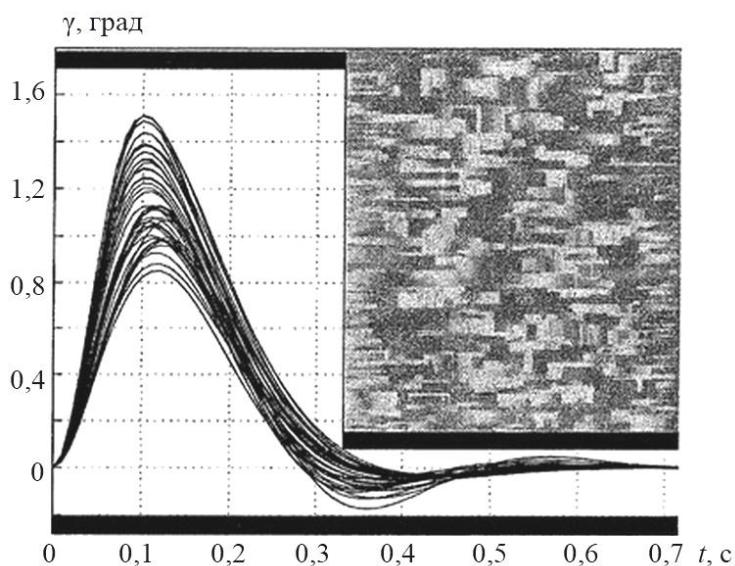


Рис. 8. Результаты моделирования № 7

Из анализа результатов моделирования № 6 и 7 следует, что при случайном разбросе параметров беспилотного летательного аппарата, постоянных времени привода элеронов и характеристик датчиков угловых скоростей, датчика угла крена в диапазоне $\pm 50\%$ возможность построения модели привода стабилизации вполне реализуема.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования подтверждена принципиальная возможность построения модели привода стабилизации для беспилотного летательного аппарата. Комплексный анализ переходных процессов позволил выявить ключевые требования к такой модели. Установлено, что для обеспечения устойчивости и требуемого качества управления модель привода должна учитывать действие шарнирных моментов и инерционность измерительной аппаратуры, а также обладать искусственно завышенным запаздыванием. Это выражается в необходимости использования в модели большей постоянной времени и меньшей скорости переключения.

Наиболее значимым результатом является доказательство робастности предложенного подхода. Моделирование при случайном разбросе параметров беспилотного летательного аппарата и элементов системы управления в диапазоне $\pm 50\%$ показало, что переходные процессы системы с моделью остаются качественно схожими с процессами в системе, использующей сигнал с реального привода. Таким образом, разработанная методика позволяет создать модель привода, обеспечивающую стабильную работу системы стабилизации в условиях значительной параметрической неопределенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахрамович С.А., Малышев В.В., Старков А.В. Математическая модель движения беспилотного летательного аппарата в бикватернионной форме // *Полет. Общероссийский научно-технический журнал*. 2018. № 4. С. 9–20.
2. Костюков В.А., Гисцов В.Г., Евдокимов И.Д. Методика корректировки траектории беспилотного летательного аппарата мультикоптерного типа // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 12 (96). С. 760–775.
3. Норинская И.В., Спирин А.А., Шабашов А.А. Имитационное моделирование рулевого привода в составе адаптивной системы стабилизации беспилотного летательного аппарата // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. № 10. С. 80–89.
4. Грызин С.В. Исследование влияния цифрового обмена в системе стабилизации беспилотного летательного аппарата на динамические характеристики рулевого привода // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. 2019. Т. 22. № 5. С. 54–66.
5. Лопухов А.В. Усовершенствованный комбинированный способ создания управляющих сил и моментов для беспилотного летательного аппарата // *Системный анализ и прикладная информатика*. 2022. № 1. С. 27–33.
6. Шабашов А.А. Синтез адаптивного робастного регулятора беспилотного летательного аппарата на основе квазилинеаризации и политопного представления модели: дис. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2025. 87 с.
7. Первушина Н.А., Фролова А.Д. Разработка адаптивной системы стабилизации для беспилотного летательного аппарата самолетного типа // *Проблемы управления*. 2022. № 5. С. 3–15.
8. Нгуен В.В., Усина Е.Е. Динамические модели управления и стабилизации движения манипулятора беспилотного летательного аппарата // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2020. Т. 24. № 4. С. 200–216.

9. Sivamani G.K.S., Gudipalli A. Design and Implementation of DATA Logging and Stabilization System for a UAV // *Heliyon*. 2024. V.10. № 4. P. 26394.

10. Kramar V., Kabanov A., Dudnikov S. A Mathematical Model for a Conceptual Design and Analyses of UAV Stabilization Systems // *Fluids*. 2021. V. 6. № 5. P. 172.

Для цитирования: Смирнов В.А., Орлов В.П. Создание модели привода стабилизации беспилотного летательного аппарата // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 1 (29). С. 108–117.

DEVELOPMENT OF A STABILIZATION ACTUATOR MODEL FOR AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

V.A. SMIRNOV¹, Engineer, V.P. ORLOV², Cand. Sc.

¹State Machine-Building Design Bureau "Vympel" named after I.I. Toropov,
90, Volokolamskoye Shosse, Moscow, 125424, e-mail: smirnov007@inbox.ru

²MIREA – Russian Technological University,
20, Stromynka St., Moscow, 107076, e-mail: ovp403@yandex.ru

The article focuses on the development of a stabilization actuator model for an unmanned aerial vehicle. The necessity of using adequate mathematical models of the unmanned aerial vehicle, which account for its aerodynamic specificities, is substantiated. The problem of roll angular rate stabilization under a step disturbance torque is investigated as an example. A series of experiments was conducted to assess the influence of the actuator time constant, the mismatch of its rate characteristics, and variations in sensor parameters. The simulation results, presented as transient processes, demonstrate that to ensure the reliability of the results, the dynamic actuator model within the stabilization loop must have a greater time delay than the real actuator. It is shown that even with a random variation in the time constants of the system components, it is possible to create a functional model of it.

Keywords: stabilization actuator, actuator modeling, unmanned aerial vehicle, roll angular rate, disturbance torque, transient processes, actuation rate, time constant, corrective devices, system stability.

Поступила в редакцию/received: 24.11.2025; после рецензирования/revised: 10.12.2025;
принята/accepted: 15.12.2025

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 1 (29), 2026**

**Print ISSN 2658-5030
Online ISSN 2687-0029**

Редактор М.Б. Юдина
Корректор С.В. Зорикова

Подписано в печать 10.02.2026

Дата выхода в свет 20.08.2026

Формат 60 x 84/8

Физ. печ. л. 14,75

Тираж 500 экз.

Усл. печ. л. 13,72

Цена свободная

Заказ № 32031

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 12,83

С – 118

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
Адрес издателя: 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22
Отпечатано в ООО «Издательство «Триада»
170034, Тверь, пр. Чайковского, д. 9, офис 514