УДК 621.892 *Обзор*

Магнитные наножидкости в трибологии: достижения, вызовы и направления будущих исследований

А.Н. Болотов, О.О. Новикова
ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»
170026, Россия, Тверь, наб. А. Никитина, 22
alnikbltov@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.575

Аннотация. В статье представлен систематический обзор современных исследований магнитных смазочных наножидкостей (феррожидкостей) как класса интеллектуальных трибологических сред, свойства которых управляются внешним магнитным полем. Цель работы – обобщение и критический анализ научных представлений о коллоидной структуре, методах синтеза, трибологических характеристиках и инженерных приложениях таких жидкостей. Рассмотрены классификация магнитных смазок, историческая эволюция подходов (включая работы 1988–1991 гг., установившие магнитотрибологический эффект и роль структурных компонентов), а также современные тенденции. Детально проанализированы механизмы коллоидной стабилизации, влияние размера и концентрации наночастиц Fe_3O_4, магнитовязкий эффект и структурообразование в поле. Показано, что оптимальная концентрация частиц (около 5 мас.%) позволяет снизить износ до 90%, тогда как её превышение ведёт к абразивному износу. Выявлены четыре основных механизма снижения трения и износа: подшипник качения, формирование трибохимической пленки, самовосстановление микротрещин и магнитный отвод продуктов износа. Установлено, что эффективность магнитного поля существенно зависит от его ориентации и градиента, а также от материала пары трения. Обсуждены основные области применения (магнитные уплотнения, подшипники, управляемые трибосистемы, теплообмен), ограничения (агрегативная нестабильность, абразивное действие частиц, масштабирование) и перспективы развития, включая активные системы с обратной связью и гибридные составы. Сделан вывод, что главная ценность магнитных смазочных наножидкостей заключается в возможности не просто смазывать, а управлять смазкой, что открывает новые принципы работы узлов трения в прецизионной, вакуумной и микротехнике.

Ключевые слова: магнитные смазочные наножидкости, феррожидкости, трибология, наночастицы Fe_3O_4, магнитовязкий эффект, граничная смазка, износ, магнитное поле, умные смазки.

Болотов Александр Николаевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»
Новикова Ольга Олеговна – к.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

Review

Magnetic nanofluids in tribology: achievements, challenges, and future research directions

A.N. Bolotov, O.O. Novikova
Tver State Technical University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.575

Abstract: This article presents a systematic review of current research on magnetic lubricating nanofluids (ferrofluids) as a class of intelligent tribological media whose properties are controlled by an external magnetic field. The aim of the work is to summarize and critically analyze scientific concepts regarding the colloidal structure, synthesis methods, tribological characteristics, and

© А.Н. Болотов, О.О. Новикова, 2026

engineering applications of such fluids. The classification of magnetic lubricants, the historical evolution of approaches (including studies from 1988–1991 that established the magnetotribological effect and the role of structural components), and current trends are discussed. The mechanisms of colloidal stabilization, the influence of Fe_3O_4 nanoparticle size and concentration, the magnetoviscous effect, and field-induced structure formation are analyzed in detail. It is shown that an optimal particle concentration (approximately 5 wt.%) reduces wear by up to 90%, while exceeding this concentration leads to abrasive wear. Four main mechanisms for reducing friction and wear are identified: rolling bearing, tribochemical film formation, self-healing of microcracks, and magnetic removal of wear debris. It was established that the effectiveness of a magnetic field depends significantly on its orientation and gradient, as well as the material of the friction pair. The main areas of application (magnetic seals, bearings, controlled tribosystems, heat transfer), limitations (aggregate instability, particle abrasion, scaling), and development prospects, including active feedback systems and hybrid compositions, are discussed. It is concluded that the main value of magnetic lubricating nanofluids lies in their ability not only to simply lubricate but also to control lubrication, opening up new operating principles for friction units in precision, vacuum, and microengineering.
Keywords: magnetic lubricating nanofluids, ferrofluids, tribology, Fe_3O_4 nanoparticles, magnetically viscous effect, boundary lubrication, wear, magnetic field, smart lubricants.

Alexander N. Bolotov – Dr. Sc., Professor, Head of the Applied Physics Department, Tver State Technical University , ORCID: 0000-0003-4054-5550
Olga O. Novikova – Ph. D., Full Docent, Applied Physics Department, Tver State Technical University, ORCID: 0000-0003-4133-3541

Поступила в редакцию/received: 15.07.2026; после рецензирования/revised: 30.07.2026; принята/accepted: 10.08.2026.

1. Введение

В зарубежной научной литературе магнитные смазочные наножидкости (МНЖ), или феррожидкости, рассматриваются как особый класс интеллектуальных трибологических сред, свойства которых можно изменять с помощью магнитного поля. В отличие от обычных масел, поведение которых определяется главным образом вязкостью, температурой и скоростью сдвига, МНЖ вводят в систему дополнительный управляющий фактор – магнитное взаимодействие. Именно поэтому интерес к ним устойчиво растет не только в трибологии, но и в смежных областях, связанных с уплотнениями, микроустройствами, точным машиностроением и тепловыми системами [1-5].

Практический интерес к таким наножидкостям объясняется тем, что в ряде узлов трения традиционная смазка работает на пределе своих возможностей. Это относится к режимам, где смазочный материал должен удерживаться в ограниченном объеме, не вытекать, не загрязнять окружающую среду и одновременно обеспечивать низкое трение. В этих условиях МНЖ дает принципиально новое решение: она может быть локально удержана магнитным полем и при этом сохраняет текучесть. Именно эта комбинация свойств сделала ее объектом интенсивных исследований еще с 1960-х годов, а затем и предметом многих обзорных работ [1, 4, 6].

Однако научная ценность темы не сводится к перечислению

преимуществ. Более глубокий анализ показывает, что магнитные смазочные наножидкости не являются универсальной заменой минеральным и синтетическим маслам. Напротив, они создают новый тип противоречия: в одних режимах трение и износ снижаются, в других – частицы начинают работать как абразив и ухудшают долговечность поверхностей. Поэтому основная задача исследований состоит не просто в том, чтобы доказать наличие полезного эффекта, а в том, чтобы понять, при каких условиях этот эффект проявляется, почему он возникает и как им управлять [7-10].

Целью настоящей работы является систематизация и критический анализ современных научных представлений о магнитных смазочных жидкостях, включая их коллоидную структуру, методы синтеза, трибологические свойства в управляемом магнитном поле и практические инженерные приложения. Для достижения этой цели в обзоре последовательно рассматриваются: понятия и классификация этих сред; эволюция научных подходов; способы получения и стабилизации составов; экспериментальные данные о трении, износе и магнитовязком эффекте; математические модели, описывающие их поведение; а также ограничения и перспективы дальнейшего развития. Отдельное внимание уделяется применениям в уплотнениях, подшипниках и управляемых трибосистемах.

2. Понятие магнитных смазочных наножидкостей и их место в трибологии

Магнитные смазочные наножидкости представляют собой коллоидные системы, состоящие из магнитных частиц, поверхностно-активных веществ (ПАВ) и немагнитной несущей жидкости. Наиболее распространенными дисперсными фазами являются Fe_3O_4, $\gamma - Fe_2O_3$, а в ряде случаев – другие ферромагнитные или ферримагнитные материалы. Наличие стабилизирующего покрытия необходимо для того, чтобы частицы не слипались под действием магнитных и молекулярных сил. В классическом понимании именно эта конструктивная особенность отличает МНЖ от обычной суспензии: частицы в ней настолько малы (типично 5-20 нм), что броуновское движение преобладает над седиментацией, и система сохраняет свойства жидкости и не осаждается мгновенно [1, 4].

С точки зрения трибологии МНЖ нельзя рассматривать только как смазку в узком смысле слова. Она одновременно выполняет несколько функций. Во-первых, она снижает прямой контакт между поверхностями, что уменьшает трение. Во-вторых, она может удерживаться магнитным полем именно там, где требуется смазывание, и таким образом

предотвращает утечку. В-третьих, под действием поля она меняет эффективную вязкость и может воспринимать часть нагрузки. Наконец, в определенных условиях МНЖ действует как локальный демпфер, сглаживающий колебания и стабилизирующий работу узла, нельзя не отметить значимую роль МНЖ в поддержании температурного режима на фрикционном контакте [1, 7, 3].

Именно поэтому все чаще определяют магнитные смазочные наномасла как smart lubricants, то есть умные смазки. Такой термин подчеркивает не декоративность или модность технологии, а ее функциональную природу: свойства смазки можно изменять в процессе работы внешним воздействием. Это принципиально отличает магнитные наножидкости от обычных масел, у которых параметры считаются заданными заранее и меняются лишь случайно из-за нагрева или старения [3, 4]. Для систематизации материала в Таблице 1 приведена укрупненная классификация магнитных смазочных наножидкостей.

Таблица 1. Укрупненная классификация магнитных смазочных наножидкостей и их практическое значение.

Тип системы	Размер частиц	Типичная несущая среда	Характерный инженерный смысл
Магнитные наножидкости	нано (примерно 5-20 нм)	минеральные и синтетические масла, вода, ионные жидкости	Смазка, уплотнения, теплообмен, точные узлы
Магнитореологические жидкости	микро (обычно 1-10 мкм)	масляные или водные среды с магнитными частицами	Высокая управляемая вязкость, демпфирование, тормоза
Инверсные магнитные жидкости	немагнитные твердые смазки в магнитной среде	масляная магнитная жидкость	Локальное снижение трения в замкнутых зонах

3. Историческое развитие и научные направления

История исследований магнитных смазочных жидкостей начинается с работ 1960-х годов, когда стало ясно, что магнитные коллоиды могут не только демонстрировать необычное поведение в поле, но и решать прикладные инженерные задачи. Ранние работы были сосредоточены на устойчивости коллоидов, способах стабилизации частиц и возможностях использования магнитной жидкости в герметизации вращающихся валов. В 1970 году под руководством Д.В. Орлова в Ивановском энергетическом институте впервые в СССР было предложено использовать магнитные жидкости для герметизации вращающихся валов. Это положило начало системным исследованиям магнитных жидкостей в отечественном машиностроении. Итогом многолетних работ стала монография «Магнитные жидкости в машиностроении» (1993, в соавторстве) [4], обобщившая теоретические и прикладные результаты отечественной школы.

Важным этапом стало установление самого факта влияния магнитного поля на трибологические характеристики. В 1988 году в пионерской работе впервые строго описали магнитотрибологический эффект – явление, при котором внешнее магнитное поле изменяет смазочные и противоизносные свойства магнитного масла [7, 11]. Было показано, что поле может как улучшать, так и ухудшать агрегативную устойчивость коллоидной системы, что накладывает ограничения на режимы применения. Эта работа заложила фундамент для понимания магнитного поля как активного управляющего фактора в трибосистемах.

К началу 1990-х годов исследователи перешли от констатации эффекта к анализу его механизмов. В исторически важной работе [12] было показано, что эффективность смазки в граничных условиях определяется поведением структурных компонентов (магнитных частиц и их защитных оболочек) в зоне фрикционного контакта. Этот вывод стал важным шагом от физики явления к материаловедению, указав на необходимость целенаправленного синтеза составов с заданными свойствами.

Параллельно развивались работы по уплотнениям и подшипникам [11, 13]. В монографии Берковского и др. [14] также обобщены инженерные приложения магнитных жидкостей. Фундаментальные основы феррогидродинамики заложены в классическом труде Розенцвейга [15]. Для уплотнений магнитная жидкость оказалась практически идеальной средой [1, 2, 5]: магнитное поле позволяет формировать герметизирующий барьер, который не требует механического прижима и почти не создает паразитного сопротивления движению. В этом смысле ранние работы показали, что не всякий технологический эффект связан с уменьшением коэффициента трения. Иногда главная ценность состоит в том, что смазка становится управляемой и локализованной. Это особенно важно в чистых помещениях, вакуумной технике и в устройствах, где утечка недопустима [1, 2, 5].

На рубеже XXI века акцент сместился с уплотнений на трибологические процессы как таковые. В работах [13, 16-20] исследованы трибологические свойства магнитных наносуспензий на основе различных дисперсионных сред, включая карбоновые эфиры, а также изучена текучесть в сильных магнитных полях [20]. Современные обзорные работы [3, 9, 6] показывают, что исследователи начали изучать не только возможность удерживать жидкость магнитом, но и то, как именно магнитное поле влияет на фрикционную пару. В этой области сформировались две большие ветви. Первая связана с магнитными жидкостями и магнитовязким эффектом, когда жидкая смазка сама реагирует на магнитное поле. Вторая связана с магнитным воздействием

на фрикционные пары и на распределение износа, включая обработку материалов полем и управление поведением продуктов износа. Особенно активно эта вторая линия обсуждается в обзорах 2023-2025 гг. [2, 3, 9].

Таблица 2. Наиболее показательные исследования и их вклад в развитие трибологии магнитных наносмазок.

Год	Работа	Главный вывод	Почему важна
1988	Болотов А.Н., Лочагин Н.В., Михалев Ю.О. [7]	Установили магнитотрибологический эффект: магнитное поле изменяет смазочные свойства и агрегативную устойчивость магнитного масла	Первое строгое доказательство управляемости трения магнитным полем
1991	Болотов А.Н., Созонов К.К., Орлов Д.В. [12]	Показали роль структурных компонентов (частиц и оболочек) в граничной смазке	Переход от физики явления к материаловедению составов
1993	Säynätjoki, Holmberg [1]	Продемонстрировали потенциал магнитных жидкостей для уплотнений и смазки	Задали основу для прикладных исследований на Западе
2022	Sahoo et al. [21]	Предложили инверсную феррожидкость для локального управления трением	Активное управление трением в замкнутых контактах
2023	Wang et al. [8]	Fe_3O_4 – наночастицы с олеиламином снизили износ на 93,8% при 5 об.%	Химическая модификация частиц критична для эффективности
2025	Zhang et al. [9]	Ориентация магнитного поля может менять знак эффекта трения	Магнитный эффект контекстно зависим
2025	Sun et al. [3]	Систематизировали составы, свойства и приложения магнитных наносмазок	Фиксируют современный уровень понимания

Авторы публикаций последних лет подчеркивают, что магнитные смазочные жидкости обладают контролируемой текучестью и повышенной способностью к теплоотводу, но при этом механизмы их поведения – гидродинамические, электромагнитные и химические – требуют систематического изучения [3, 17-19]. Иными словами, сегодня наука уже не спрашивает, существуют ли полезные эффекты, а спрашивает, как они связаны между собой и в каких условиях становятся устойчивыми. В Таблице 2 в качестве примера приведено сопоставление нескольких работ, которые отражают эволюцию исследований.

4. Состав, стабилизация и методы получения магнитных смазочных наножидкостей

Работоспособность магнитной смазочной наножидкости (МНЖ) в узле трения определяется не величиной намагниченности насыщения, а способностью сохранять коллоидную устойчивость в условиях одновременного действия магнитного поля, сдвиговых напряжений и локального разогрева. Агрегация или седиментация магнитных частиц

необратимо переводят систему из режима управляемой жидкости в режим суспензии с неконтролируемой абразивностью. Поэтому ключевым требованием к МНЖ является не максимальный магнитный момент, а стабильность во времени и в поле. Конструктивно это достигается подбором трёх компонентов: магнитная нанофаза (обычно Fe_3O_4), несущая среда (минеральное или синтетическое масло, вода, сложные эфиры) и стабилизатор – поверхностно-активное вещество (ПАВ), адсорбированное на частицах [1, 3].

Выбор Fe_3O_4 в качестве магнитной фазы не случаен: этот материал обладает достаточно высокой намагниченностью (около 450 кА/м в объёмном состоянии), химически инертен в большинстве органических сред и допускает получение наночастиц с узким распределением по размерам методами соосаждения или термолиза. Однако трибологическая эффективность определяется не только составом ядра, но и его размером. Частицы диаметром менее 5 нм имеют малый магнитный момент и слабо удерживаются полем, а частицы крупнее 20 нм склонны к седиментации и могут работать как микроабразив. Оптимальный диапазон – 7-15 нм, где магнитная энергия сравнима с тепловой, а броуновское движение ещё препятствует осаждению [8].

Поверхность частиц Fe_3O_4 гидрофильна, тогда как большинство несущих масел – гидрофобны. Прямое смешивание приводит к мгновенной агрегации. Поэтому обязательным этапом является модификация поверхности – адсорбция или химическая прививка молекул ПАВ, содержащих полярную «голову» (карбоксильную, аминогруппу) и длинный углеводородный «хвост». В качестве ПАВ чаще всего используют олеиновую кислоту или олеиламин. Полярная группа связывается с поверхностными атомами железа (координационно или через водородные связи), а углеводородная цепь выступает в раствор, создавая стерический барьер. Эффективность стабилизации определяется не только длиной цепи (чем длиннее – тем толще барьер), но и плотностью упаковки молекул на поверхности. При недостаточной плотности частицы сближаются на расстояние действия Ван-дер-Ваальсовых сил и слипаются. При избыточной – возникает перекристаллизация ПАВ и десорбция при сдвиге. Экспериментально найденная оптимальная плотность покрытия – около 2-3 молекул на нм² [8, 9].

Коллоидная структура и механизмы стабилизации: от микроскопических сил к макроскопической устойчивости. Стабильность МНЖ определяется конкуренцией трёх взаимодействий: Ван-дер-Ваальсового притяжения, магнитного диполь-дипольного притяжения (особенно сильного во внешнем поле) и стерического отталкивания. В полярных средах возможно также электростатическое отталкивание, но

для масляных основ его вкладом пренебрегают из-за низкой диэлектрической проницаемости ($\varepsilon \approx 2–5$).

Ван-дер-Ваальсова сила между двумя сферическими частицами радиуса R на расстоянии h (где $h \ll R$) описывается потенциалом $U_V = -AR/12h$, где A – константа Гамакера (для Fe_3O_4 в масле $A \approx 5 \cdot 10^{-20}$ Дж). Эта сила становится доминирующей при сближении частиц на расстояние менее 2-3 нм, то есть, когда стерический барьер пробит.

Магнитное диполь-дипольное взаимодействие в отсутствие поля для изотропно ориентированных моментов даёт усреднённую энергию притяжения $U_d = -\mu_0 m^2 / 6\pi r^3$, где m – магнитный момент частицы, r – межцентровое расстояние. Для Fe_3O_4 с R = 5 нм, $m \approx 2 \cdot 10^{-18}$ А·м², и при r = 12 нм получим $U_d \approx 2kT$, то есть тепловое движение не может предотвратить агрегацию. Внешнее поле ($H \sim 50$ кА/м) выстраивает моменты вдоль линии центров, увеличивая энергию притяжения в 3-5 раз, что провоцирует образование цепочек вдоль поля.

Стерическое отталкивание возникает при перекрытии адсорбционных слоёв. Потенциал отталкивания имеет резкий пороговый характер: при расстоянии между частицами, большем удвоенной толщины слоя δ, взаимодействие близко к нулю; при сближении на расстояние $< 2\delta$ возникает осмотическое давление, быстро растущее при дальнейшем сжатии. Для углеводородных цепей длиной 18 атомов углерода $\delta \approx 2–2{,}5$ нм в хорошем растворителе. Условие устойчивости – $\delta > (R/2) \cdot (A/kT)^{1/2}$, что для частиц 10 нм даёт $\delta > 2$ нм — выполняется.

Безразмерный критерий, объединяющий все факторы, - параметр Ламборна $\lambda = \mu_0 m^2 / 4\pi d^3 kT$, который сравнивает энергию магнитного диполь-дипольного взаимодействия (на характерном расстоянии $r = d$) с тепловой энергией. При $\lambda < 1$ броуновское движение преобладает, при $\lambda > 1$ магнитное притяжение доминирует. Для частиц Fe_3O_4 диаметром 10 нм $\lambda \approx 2{,}5$, то есть система находится в метастабильном состоянии – агрегация возможна, но требует преодоления энергетического барьера, создаваемого стерическим слоем. Именно этот барьер разрушается при высоких градиентах скорости или при локальном перегреве в зоне трения. Поэтому трибологические испытания МНЖ обязательно должны включать контроль коллоидной стабильности post factum.

Методы синтеза и их влияние на трибологические свойства. Выбор метода синтеза определяет не только размер и форму частиц, но и дефектность кристаллической решётки, которая влияет на магнитную восприимчивость и химическую активность поверхности (см. Таблицу 3).

Соосаждение – самый распространённый лабораторный метод:

смешение Fe^{2+} и Fe^{3+} в щелочной среде при 60-80°C. Преимущество – простота и дешевизна. Недостатки: широкое распределение по размерам (полидисперсность до 30-40%), наличие остаточных ионов (Na^+, Cl^-), которые трудно отмыть и которые могут катализировать окисление масла. Полученные частицы имеют дефектную структуру и пониженную намагниченность (≈70% от объёмной). Тем не менее, такие МНЖ показывают хорошие трибологические свойства в режиме граничной смазки, вероятно, благодаря повышенной химической активности дефектов, способствующих формированию трибоплёнки [8, 9].

Таблица 3. Сравнение методов синтеза магнитных наночастиц для смазочных жидкостей.

Метод	Типичный размер частиц	Поли-дисперс-ность	Стабиль-ность во времени	Основные недостатки	Трибологическая особенность
Соосаждение	6-15 нм	30-40%	средняя (до 6 мес.)	Остатки солей, дефекты кристаллической решётки	Образует прочную трибоплёнку (за счёт дефектов поверхности), но крупные фракции могут вызвать абразивный износ
Термическое разложение	4-12 нм	<10%	высокая (>12 мес.)	Дороговизна, инертная атмосфера, масштабирование	Эффективен как подшипник качения, но не склонен к хемосорбции
Гидротермальный синтез	10-50 нм	20-30%	очень высокая (>18 мес.)	Автоклав, контроль формы требует подбора условий	Форма частиц управляет механизмом смазки
Механическое диспергирование	20-100 нм	50-70%	низкая (<3 мес.)	Загрязнение, широкий разброс	Только для неответственных узлов, высокий абразив

Термическое разложение органических прекурсоров (например, ацетилацетоната железа) в высококипящем растворителе в присутствии ПАВ даёт монодисперсные (полидисперсность < 10%) частицы с идеальной формой и высокой намагниченностью (до 95% от объёмной). Однако процесс требует инертной атмосферы, высоких температур (250-300°C) и дорогих реагентов. Трибологический выигрыш от высокой монодисперсности проявляется при малых концентрациях (1-3 об.%), где частицы работают как «подшипники качения». При больших концентрациях монодисперсные частицы склонны к образованию двумерных решёток (коллоидных кристаллов) в поле, что может приводить к внезапному росту вязкости и разрушению пленки [8].

Гидротермальный синтез позволяет получать частицы с контролируемой формой (кубы, октаэдры, пластинки). Форма сильно влияет на трибологию: сферические частицы способствуют качению, а

пластинчатые – легче формируют защитные слои, но могут заклиниваться в зазорах. Гидротермальный метод даёт наиболее стабильные во времени МНЖ (сохраняют свойства более 18 месяцев), но требует автоклавов высокого давления и трудоёмкой очистки [3].

Механическое диспергирование (балльное измельчение) используется для быстрого получения инженерных составов. Однако загрязнение продуктами износа шаров (железо, хром, керамика) неконтролируемо, а широкий разброс размеров (20-100 нм) ведёт к тому, что крупные фракции работают как абразив, а мелкие – теряют магнитные свойства. Такой подход оправдан только для грубых уплотнительных систем, где трибологические требования невысоки. Исследования магнитных свойств таких нанодисперсных смазок представлены в [16].

5. Инверсные магнитные смазочные наножидкости: альтернативная концепция управления трением.

В классических МНЖ смазочное действие оказывает сама коллоидная система, а поле лишь удерживает её в зоне контакта. Принципиально иной подход реализован в инверсных магнитных жидкостях [12, 21, 11]. Здесь магнитная жидкость выполняет роль «магниточувствительного транспортёра»: в ней диспергированы немагнитные твердые смазочные частицы – микронного размера графит, PTFE (политетрафторэтилен), MoS_2, Cu, SiO_2. Магнитное поле действует на феррожидкость, а через гидродинамическое увлечение (или магнитофорез) направляет частицы в зону контакта.

Ключевое преимущество – разделение функций: магнитная нанофаза обеспечивает удержание и перемещение, а твердая смазка – низкое трение и защиту от износа. При этом концентрация магнитных частиц может быть снижена до 1-2 об.%, что уменьшает абразивную опасность. Однако есть два ограничения. Во-первых, для эффективного магнитофореза немагнитных частиц необходим высокий градиент поля ($\sim 10^5$ А/м^2), что требует специальных магнитных систем [21]. Во-вторых, размер смазочных частиц должен быть сопоставим с толщиной смазочной пленки (0,1-1 мкм), иначе они плохо проникают в контакт. Инверсные системы показали свою эффективность в высоконагруженных точечных контактах (типа подшипников качения) и в микроэлектромеханических системах (MEMS), где традиционная подача масла невозможна [21].

6. Экспериментальные исследования трибологических свойств

Экспериментальное изучение магнитных смазочных наножидкостей (МНЖ) направлено на количественную оценку коэффициента трения, интенсивности изнашивания, изменения эффективной вязкости и

устойчивости смазочной плёнки под действием магнитного поля. В зависимости от решаемых задач применяются различные схемы трибологических испытаний: «шар-диск» (ball on disk), «палец-диск» (pin on disk), возвратно-поступательное трение (reciprocating sliding), четырёхшариковая машина трения, а также специализированные стенды для моделирования работы уплотнений и подшипников. Несмотря на разнообразие экспериментальных конфигураций, общим является установление корреляций между параметрами магнитного поля (напряжённостью, градиентом, ориентацией), составом МНЖ и трибологическими характеристиками контакта при заданных нагрузке и скорости [3, 9, 11].

Концентрационная зависимость трибологических характеристик. В исследовании [8] установлено, что введение наночастиц Fe_3O_4 (средний диаметр ~7 нм, модифицированных олеиламином) в минеральное масло приводит к немонотонному изменению коэффициента трения и объёмного износа. При концентрации 5 мас.% наблюдается максимальное снижение объёма износа – на 93% по сравнению с базовым маслом, а коэффициент трения уменьшается с 0,12 до 0,06. При увеличении концентрации до 7 мас.% эффект ослабевает (снижение износа 60%), а при 10 мас.% – составляет лишь 30%, при этом коэффициент трения возвращается к значениям, близким к исходным (0,11). Аналогичная немонотонность зафиксирована для вязкости: при малых концентрациях (1-3 мас.%) наблюдается её понижение, затем – возрастание в интервале 5-10 мас.%.

Анализ этих данных показывает три важнейших обстоятельства. Первое: минимальные значения силы трения и интенсивности износа достигаются при одной и той же концентрации (5 мас.%), что указывает на единый механизм – формирование защитного слоя. Второе: вязкость при этом возрастает лишь на 7% относительно базового масла, то есть повышение трения не связано с загущением. Третье: при превышении 5 мас.% вязкость продолжает расти, но трибологические свойства ухудшаются – это прямое доказательство того, что избыточные частицы не участвуют в образовании защитной плёнки, а напротив, действуют как микроабразив.

Детальный анализ поверхности после испытаний (SEM, EDX, XPS) показал, что при 5 мас.% на дорожке трения формируется сплошной слой толщиной 50-100 нм, содержащий Fe_3O_4, а также продукты трибохимических реакций – аморфные оксиды железа и ферриты. При 10 мас.% на поверхности обнаруживаются царапины и внедрённые агрегаты частиц размером до 1 мкм, что подтверждает абразивный механизм ухудшения [8].

Этот результат имеет фундаментальное значение: он опровергает

распространённое среди практиков заблуждение «чем больше присадки, тем лучше смазка». Для МНЖ, как и для многих нанодобавок, существует узкий оптимум, смещение от которого в любую сторону (особенно в сторону увеличения) ведёт к деградации свойств.

Влияние ориентации магнитного поля. В обзорной работе [9] обобщены результаты более 30 экспериментальных исследований, посвящённых влиянию ориентации поля на трибологические характеристики. Основной вывод: знак и величина эффекта определяются не столько фактом наличия поля, сколько его направлением относительно поверхности и вектора скольжения.

Для ферромагнитной пары трения сталь–сталь (типичная для машиностроения) установлено следующее. Перпендикулярная ориентация (силовые линии перпендикулярны поверхности). В этом случае поле способствует формированию равномерного слоя наночастиц на поверхности за счёт силы притяжения к области максимальной напряжённости (полюса магнитов расположены по обе стороны от контакта). Коэффициент трения снижается на 20-30%, объём износа – на 40-50% по сравнению с отсутствием поля. Причина заключается в том, что частицы Fe_3O_4 выстраиваются в цепочки, перпендикулярные поверхности, что увеличивает несущую способность плёнки и препятствует прямому контакту [9].

Параллельная ориентация (силовые линии параллельны направлению скольжения). В этом случае поле не создаёт удерживающего градиента, а лишь ориентирует диполи частиц вдоль движения. Эксперименты показывают, что коэффициент трения μ может возрастать на 10-15%, а износ – на 20-30% по сравнению с отсутствием поля. Механизм: магнитное поле притягивает ферромагнитные продукты износа (частицы стали размером 0,1-5 мкм) обратно в контакт, где они действуют как абразив. Кроме того, ориентированные цепочки частиц могут создавать дополнительное сопротивление сдвигу [9].

Для пар, содержащих немагнитные материалы (сталь–алюминий, керамика–сталь, сталь–латунь), зависимость от ориентации выражена слабее (разница между перпендикулярной и параллельной ориентацией не превышает 10-15%). Однако в этих системах обнаруживается новый эффект: поле может изменять адсорбцию полярных ПАВ на поверхности. В частности, для олеиновой кислоты на алюминии наложение перпендикулярного поля увеличивает плотность адсорбции на 30-40%, что дополнительно снижает трение.

Таким образом, проектирование трибосистемы с МНЖ должно начинаться не с выбора состава, а с расчёта конфигурации магнитного поля. Одно и то же поле может быть либо полезным, либо вредным в

зависимости от ориентации.

Управление продуктами износа: недооценённый резерв снижения износа. Один из наиболее интересных, но редко обсуждаемых эффектов – влияние магнитного поля на траекторию движения продуктов износа. В процессе трения стальных поверхностей образуются ферромагнитные микрочастицы (размером от 0,1 до 10 мкм, в основном $\alpha - Fe$, Fe_3O_4, а также частицы цементита, если сталь содержит углерод). В отсутствие поля эти частицы либо удаляются из контакта потоком масла (в проточных системах), либо накапливаются в карманах между неровностями, вызывая трёхтельный абразивный износ.

Таблица 4. Обобщение влияния основных факторов на трибологическое поведение магнитных смазочных жидкостей.

Фактор	Наблюдаемый эффект	Физическая интерпретация	Инженерные рекомендации
Концентрация Fe_3O_4	Минимум коэффициента трения и износа при 5 мас.%, ухудшение при больших концентрациях	Баланс между формированием защитной плёнки и абразивным действием агрегатов	Оптимизация концентрации для каждой пары материалов и режима нагрузки
Наложение статического поля	Удержание смазки в контакте, повышение эффективной вязкости, снижение утечек	Поле создаёт градиент давления, компенсирующий гидродинамические потери	Индукция поля должна быть согласована с рабочим зазором и давлением
Ориентация поля	Перпендикулярное поле снижает износ, параллельное может его повышать	Различное влияние на структуру смазочного слоя и траектории частиц износа	Испытания обязательны для конкретной геометрии узла
Химическая модификация частиц	Повышение дисперсности, стабильности, снижение агломерации	Увеличение стерического барьера и совместимости с базовой жидкостью	Обязательное использование эффективных ПАВ; контроль плотности покрытия
Градиент поля	Магнитофоретический транспорт твёрдых смазок (инверсные системы) или отвод продуктов износа	Поле создаёт направленную силу, перемещающую частицы независимо от потока жидкости	Требуется градиент $\geq 10^5$ А/м²; применимо при скоростях скольжения $\leq$0,5 м/с

Эксперименты с замкнутым объёмом масла (без циркуляции) показали [9], что при наложении магнитного поля возможны два противоположных сценария. Градиент поля направлен в контакт (например, магнит расположен непосредственно под зоной трения). В этом случае частицы износа притягиваются к контакту и удерживаются там. Концентрация частиц в зоне трения возрастает в 5-10 раз по сравнению с отсутствием поля, что приводит к резкому (в 2-5 раз) увеличению объёма

износа. Это нежелательный режим, которого следует избегать. Градиент поля направлен из контакта (магнит размещён сбоку или за пределами зоны трения). В этом случае поле создаёт силу, уводящую частицы износа из контакта. Концентрация абразивных частиц в зоне трения снижается на 70-90%, а объём износа уменьшается на 30-50% по сравнению с отсутствием поля. Эффект особенно выражен при низких скоростях скольжения (<0,1 м/с), где гидродинамический вынос частиц мал. Это открытие имеет прямое практическое применение: в замкнутых узлах трения (например, в редукторах космических аппаратов, в вакуумной технике, в герметичных приводах) можно использовать магнитные ловушки для сбора продуктов износа, продлевая ресурс узла в 2-3 раза без замены масла.

Этот эффект приобретает особое значение в замкнутых объёмах (герметичные редукторы, узлы с ограниченным доступом), где естественный вынос продуктов износа затруднён. Правильный выбор конфигурации магнитной системы позволяет использовать поле не только для удержания смазки, но и для очистки контактной зоны.

В Таблице 4 приведены основные экспериментально установленные факторы, их проявления и вытекающие инженерные рекомендации.

7. Сравнение магнитных смазочных наножидкостей и магнитореологических жидкостей

Часто происходит смешение двух классов магнитных жидкостей – феррожидкостей (размер частиц 5-20 нм) и магнитореологических жидкостей (МРЖ, размер частиц 1-10 мкм). С точки зрения трибологии это принципиально разные материалы.

В МРЖ под действием поля микрочастицы выстраиваются в цепочки, и система приобретает предел текучести (до 100 кПа), переходя в квазитвёрдое состояние. Это свойство используется в тормозах, амортизаторах, сцеплениях – там, где требуется регулируемое сопротивление сдвигу. Однако для смазки такой режим неприемлем: квазитвёрдый слой обладает высокой абразивностью и разрушает поверхности трения. Кроме того, микрочастицы МРЖ (>1 мкм) заведомо превышают толщину гидродинамической смазочной плёнки (обычно 0,1-1 мкм), поэтому они не могут работать в режиме граничной смазки [17, 22].

Магнитные наножидкости, напротив, сохраняют текучесть в любых полях (вязкость возрастает в 2-10 раз, но не на порядки). Наночастицы (5-20 нм) легко проникают в зазор и не вызывают абразии, если не агрегируют. Именно поэтому для смазочных применений предпочтительны феррожидкости, а не МРЖ. Исключение составляют

случаи, где требуется одновременно и смазка, и демпфирование – тогда используют гибридные системы с низкой концентрацией микронных частиц (менее 1 мас.%), которые не образуют сплошной квазитвёрдой структуры.

8. Применение магнитных смазочных наножидкостей

Магнитные смазочные наножидкости (МНЖ) эффективны там, где традиционные смазочные материалы не обеспечивают одновременно герметизацию, локализацию и управляемость. Наиболее технически зрелая область – магнитожидкостные уплотнения вращающихся валов. Типичная конструкция содержит постоянный магнит ($NdFeB$ или $SmCo$) и 5-20 последовательных герметизирующих «ступенек» в зазоре 0,05-0,2 мм. Давление одной ступени $\Delta P \approx \mu_0 M_s H$, что при намагниченности насыщения $M_s = 40$ кА/м и напряжённости $H = 200$ кА/м даёт около 0,1 атм; суммарно до 2 атм. Преимущества: утечка менее 10^{-6} см³/с, снижение момента трения на 80-90% по сравнению с сальником, саморегенерация. Ограничения – рабочая температура до 120-150°C (деградация ПАВ). Уплотнения стали стандартом для жёстких дисков, вакуумных установок и химических реакторов.

В подшипниках скольжения и качения МНЖ удерживаются в зазоре полем, создавая дополнительное магнитное давление ~0,5-1 атм, что повышает несущую способность на 10-30% без увеличения вязкости. Практические примеры: шпиндели жёстких дисков (снижение трения в 2-3 раза), подшипники вакуумных насосов и космической аппаратуры (работа при 10^{-5} Па без подпитки 5-10 лет), микроэлектромеханические системы (MEMS). Основной риск – агломерация частиц и седиментация.

Инверсные МНЖ служат «магнитным транспортёром» для доставки твёрдой смазки (MoS_2, графит) в зону контакта по команде внешнего поля. При градиенте поля не менее 10^5 А/м² и скорости скольжения $\leq 0{,}5$ м/с коэффициент трения снижается с 0,12 до 0,04-0,06, ресурс узла увеличивается в 3-5 раз. Востребованы в космических приводах, ядерных реакторах, чистых помещениях.

МНЖ также изучаются как теплоносители с регулируемой теплопроводностью. Частицы Fe_3O_4 повышают теплопроводность базы на 20-40%, а выстроенные полем цепочки создают анизотропию теплоотдачи до 2-3 раз. Потенциальные применения – охлаждение мощных электродвигателей (снижение перегрева на 15-20°C) и аэрокосмические теплообменники без движущихся частей. Ограничения: десорбция ПАВ выше 120°C и рост вязкости при отрицательных температурах.

Экономически МНЖ в 5-20 раз дороже обычных масел, поэтому их применение оправдано при требованиях нулевой утечки, работы в вакууме,

смазки труднодоступных зон или активного управления трением. Успешное внедрение МНЖ требует системного проектирования магнитной системы, теплового режима и трибологического узла.

Важное замечание. Если сопоставить все рассмотренные работы в одном аналитическом поле, становится очевидно, что магнитная смазочная наножидкость полезна не там, где нужно просто снизить коэффициент трения любой ценой, а там, где важно одновременно управлять положением смазки, ее текучестью и локальной нагрузкой. Именно поэтому одни и те же составы по-разному ведут себя в разных установках. В уплотнениях магнитная жидкость почти всегда дает положительный эффект, поскольку ее задача – удерживаться в зоне зазора и не допускать утечки. В контактах с высокой шероховатостью и значительной абразивной нагрузкой результат уже становится более неоднозначным [2, 9].

С инженерной точки зрения это означает, что проектировщик не должен выбирать магнитную смазку только по общим данным из статьи. Необходимо учитывать поле, ориентацию контакта, температурный режим, скорость скольжения, форму частиц и даже способ их химической модификации. Отсюда следует практическое правило: чем сложнее и точнее узел, тем выше вероятность, что магнитная жидкость даст выигрыш. Чем грубее и тяжелее режим, тем больше шанс, что абразивные свойства дисперсной фазы начнут доминировать над ее смазывающим эффектом.

В этом смысле литература показывает не просто набор частных экспериментов, а постепенное формирование новой методологии: смазка рассматривается как управляемая среда, а магнитное поле – как элемент управления. Это и есть главный результат развития темы за последние десятилетия. Магнитные жидкости перестали быть экзотикой и превратились в рабочий инструмент для тех задач, где обычная смазка не обеспечивает достаточного уровня управляемости.

9. Перспективы развития и выводы

Наиболее перспективным направлением развития авторы считают переход от пассивных магнитных наножидкостей к активно управляемым смазочным системам. Это означает, что поле должно использоваться не просто как внешний фактор, а как инструмент обратной связи: датчики фиксируют режим работы, а система подбирает нужную индукцию, чтобы поддерживать оптимальный уровень вязкости и удержания смазки [21, 3].

Другой важный путь – разработка гибридных составов. Такие системы могут сочетать магнитные наночастицы с твердыми смазочными добавками, например с MoS_2 или PTFE, чтобы компенсировать абразивное

действие частиц. Концепция инверсной МНЖ уже показывает, что локальное управление твердыми смазками с помощью магнитного поля возможно, и это направление, вероятно, будет активно развиваться [12].

С инженерной точки зрения наиболее разумный вывод состоит в следующем. Магнитные смазочные наножидкости не следует рассматривать как универсальный заменитель традиционных масел. Их надо понимать как специальный класс управляемых смазочных сред, которые особенно полезны в уплотнениях, прецизионных узлах, вакуумной технике и системах, где критичны локализация смазки и отсутствие утечек. В этих задачах МНЖ дает не просто уменьшение трения, а новый принцип работы узла.

Таким образом, исследования показывают, что магнитные смазочные наножидкости находятся на пересечении трибологии, магнитогидродинамики, коллоидной химии и материаловедения. Именно междисциплинарность объясняет как силу этого направления, так и его сложность. Для дальнейшего прогресса необходимы более точные модели, долговременные испытания и целенаправленная оптимизация состава под конкретные инженерные задачи. Подводя итог, можно сказать, что главная ценность магнитных смазочных наножидкостей состоит в том, что они позволяют не просто смазывать, а управлять смазкой. Это и есть тот качественный сдвиг, который отличает данную область от традиционной трибологии и объясняет устойчивый интерес исследователей к теме.

Библиографический список:

1. **Säynätjoki, M.** Magnetic fluids in sealing and lubrication: a state of the art review / M. Säynätjoki, K. Holmberg // Lubrication Science. – 1993. – V. 10. – I. 2. – P. 119-132. DOI: 10.1002/jsl.3000100203.
2. **Li, D.** Theory analyses and applications of magnetic fluids in sealing / D. Li, Y. Li, Z. Li, Y. Wang // Friction. – 2023. – V. 11. – I. 10. – P. 1771-1793. DOI: 10.1007/s40544-022-0676-8.
3. **Sun, L.** Magnetic lubricants: preparation, physical mechanism, and application / L. Sun, Y. Zhang, X. Cui et al. // Friction. – 2025. – V. 13. – I. 7. – Art. № 9441010. – 29 p. DOI: 10.26599/FRICT.2025.9441010.
4. **Орлов, Д.В.** Магнитные жидкости в машиностроении / Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин, В.В. Подгорков, А.П. Сизов. – М.: Машиностроение, 1993. – 272 с.
5. **Болотов, А.Н.** Герметизация с помощью магнитных жидкостей/ А.Н. Болотов, Г.Б. Бурдо // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2023. – Т. 3. – № 19. – С. 25-32. DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-25-32.
6. **Болотов, А.Н.** Современные исследования магнитных смазочных материалов / А.Н. Болотов, О.О. Новикова, Е.А. Раткевич // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2026. – Т. 1. – № 29. – С. 5-14. DOI: 10.46573/2658-5030-2026-1-5-14.
7. **Болотов, А.Н.** Роль магнитного поля при трении поверхностей, смазываемых магнитным маслом / А.Н. Болотов, Н.В. Лочагин, Ю.О. Михалев // Трение и износ. – 1988. – Т. 9. – № 5. – С. 870-878.
8. **Wang, X.** Viscosity variations and tribological performances of oleylamine-modified Fe_3O_4 nanoparticles as mineral oil additives / X. Wang, H. Liu, Q. Zhao, X. Wang, W. Lou // Lubricants. – 2023. – V. 11. – I. 3. – Art. № 149. – 13 p. DOI: 10.3390/lubricants11030149.
9. **Zhang, Q.** A review of research on the effect of electromagnetic field on friction and wear / Q. Zhang, X. Yu, X. Xu et al. // Lubricants. – 2025. – V. 13. – I. 10. – Art. № 454. – 18 p. DOI: 10.3390/lubricants13100454.
10. **Odenbach, S**. Magnetic hybrid-materials: multi-scale modelling, synthesis, and applications / S. Odenbach. – Berlin, Boston: De Gruyter, 2021. – XXX+781 p. DOI: 10.1515/9783110569636.
11. **Болотов, А.Н.** Триботехника магнитопассивных и магнитожидкостных подшипниковых опор

скольжения: дисс. … д-ра техн. наук: 05.02.04 / Болотов Александр Николаевич. – М.: ИМАШ РАН, 1993. – 555 с.
12. **Bolotov, A.N.** On the role of structural components of magnetic oil in the boundary lubrication conditions / A.N. Bolotov, K.K. Sozonov, D.V. Orlov // Journal of Friction and Wear. – 1991. – Vol. 12. – № 5. – P. 824-831.
13. **Bolotov, A.N.** Studying tribotechnical properties of nanostructured lubricating oils with various dispersive media / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // Journal of Friction and Wear. – 2017. – V. 38. – № 2. – P. 121-125.
14. **Berkovsky, B.M.** Magnetic fluids: engineering applications / B.M. Berkovsky, V.F. Medvedev, M.S. Krakov. – Oxford: Oxford University Press, 1993. – 243 p.
15. **Rosensweig, R.E.** Ferrohydrodynamics / R.E. Rosensweig. – Cambridge: Cambridge University Press, 1985. – 344 p.
16. **Болотов, А.Н.** Магнитные свойства магнитных нанодисперсных смазочных масел / А.Н. Болотов, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019. – Вып. 11. – С. 564-573. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.564.
17. **Болотов, А.Н.** Смазочные свойства магнитных наножидкостей на основе эфиров карбоновых кислот / А.Н. Болотов, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019. – Вып. 11. – С. 555-563. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.555.
18. **Bolotov, A.N.** Lubricating oils obtained via modifying magnetic nanofluids / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // Inorganic Materials: Applied Research. – 2020. – V. 11. – I. 4. – P. 865-871. DOI: 10.1134/S2075113320040073.
19. **Болотов, А.Н.** Смазочные свойства нанодисперсных магнитных масел на основе нетрадиционных технических жидкостей / А.Н. Болотов, Л.Е. Афанасьева, В.В. Мешков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15. – С. 679-691. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.679.
20. **Болотов, А.Н.** Экспериментальное изучение текучести наноструктурированной магнитной жидкости в сильном магнитном поле / А.Н. Болотов, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Вып. 15. – С. 692-700. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.692.
21. **Sahoo, R.** Design of smart lubricants using the inverse ferrofluid approach // R. Sahoo, P. Ussa-Aldana, D. Lancon, F. Rondelez, J.R. Morillas, R. Hidalgo-Alvarez, J. de Vicente // Tribology International. – 2022. – V. 166. –Art. № 107346. – 12 p. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.107346.
22. **Li, D.** Effect of ferromagnetic metal base on friction and wear of 3D-printed aluminum alloy surface under magnetorheological fluid action / D. Li, R. Li, C. Lee // Lubricants. – 2023. – V. 11. – I. 7. – Art. № 273. – 20 p. DOI: 10.3390/lubricants11070273.

References:

1. Säynätjoki M., Holmberg K. Magnetic fluids in sealing and lubrication: a state of the art review, *Lubrication Science*, 1993, vol. 10, issue 2, pp. 119-132. DOI: 10.1002/jsl.3000100203.
2. Li D., Li Y., Li Z., Wang Y. Theory analyses and applications of magnetic fluids in sealing, *Friction*, 2023, vol. 11, issue 10, pp. 1771-1793. DOI: 10.1007/s40544-022-0676-8.
3. Sun L., Zhang Y., Cui X. et al. Magnetic lubricants: preparation, physical mechanism, and application, *Friction*, 2025, vol. 13, issue 7, art. no. 9441010, 29 p. DOI: 10.26599/FRICT.2025.9441010.
4. Orlov D.V., Mikhalev Yu.O., Myshkin N.K., Podgorkov V.V., Sizov A.P. *Magnitnyye zhidkosti v mashinostroyenii* [Magnetic fluids in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1993, 272 p. (In Russian).
5. Bolotov A.N., Burdo G.B. Germetizatsiya s pomoshch'yu magnitnykh zhidkostey [Sealing with magnetic fluids], *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki [Bulletin of the Tver State Technical University. Series: Engineering sciences]*, 2023, vol. 3, issue 19, pp. 25-32. DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-25-32. (In Russian).
6. Bolotov A.N., Novikova O.O., Ratkevich Ye.A. Sovremennyye issledovaniya magnitnykh smazochnykh materialov [Modern research on magnetic lubricants], *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki [Bulletin of the Tver State Technical University. Series: Engineering sciences]*, 2026, vol. 1, issue 29, pp. 5-14. DOI: 10.46573/2658-5030-2026-1-5-14. (In Russian).
7. Bolotov A.N., Lochagin N.V., Mikhalev Yu.O. Rol' magnitnogo polya pri trenii poverkhnostey, smazyvayemykh magnitnym maslom [Role of magnetic field in friction of surfaces lubricated by magnetic oil], *Treniye i iznos [Friction and wear]*, 1988, vol. 9, issue 5, pp. 870-878. (In Russian).

8. Wang X., Liu H., Zhao Q., Wang X., Lou W. Viscosity variations and tribological performances of oleylamine-modified Fe_3O_4 nanoparticles as mineral oil additives, *Lubricants*, 2023, vol. 11, issue 3, art. № 149? 13 p. DOI: 10.3390/lubricants11030149.
9. Zhang Q., Yu X., Xu X. et al. A review of research on the effect of electromagnetic field on friction and wear, *Lubricants,* 2025, vol. 13, issue 10, art. no. 454, 18 p. DOI: 10.3390/lubricants13100454.
10. Odenbach S. *Magnetic hybrid-materials: multi-scale modelling, synthesis, and applications*. Berlin, Boston, De Gruyter, 2021, XXX+781 p. DOI: 10.1515/9783110569636.
11. Bolotov A.N. *Tribotekhnika magnitopassivnykh i magnitozhidkostnykh podshipnikovykh opor skol'zheniya:* [Tribotechnics of magneto-passive and magnetic-fluid sliding bearing assemblies]. Dr. eng. sci: 05.02.04. Moscow: IMASH RAN Publ., 1993, 555 p. (In Russian).
12. Bolotov A.N., Sozonov K.K., Orlov D.V. On the role of structural components of magnetic oil in the boundary lubrication conditions, *Journal of Friction and Wear*, 1991, vol. 12, issue 5, pp. 824-831.
13. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Studying tribotechnical properties of nanostructured lubricating oils with various dispersive media, *Journal of Friction and Wear*, 2017, vol. 38, issue 2, pp. 121-125.
14. Berkovsky B.M., Medvedev V.F., Krakov M.S. *Magnetic Fluids: Engineering Applications*. Oxford, Oxford University Press, 1993, 243 p.
15. Rosensweig R.E. *Ferrohydrodynamics.* Cambridge, Cambridge University Press, 1985, 344 p.
16. Bolotov A.N., Novikova O.O. Magnitnye svojstva magnitnykh nanodispersnykh smazochnykh masel [Magnetic properties of the magnetic nanodispersed lubricant oils], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2019, issue 11, pp. 564-573. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.564. (In Russian).
17. Bolotov A.N., Novikova O.O. Smazochnye svojstva magnitnykh nanozhidkostej na osnove efirov karbonovykh kislot [Lubrication properties of magnetic nanoliquids based on carboxylic acids], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials],* 2019, issue 11, pp. 555-563. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.555. (In Russian).
18. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Lubricating oils obtained via modifying magnetic nanofluids, *Inorganic Materials: Applied Research*, 2020, vol. 11, issue 4, pp. 865-871. DOI: 10.1134/S2075113320040073.
19 Bolotov A.N., Afanasiyeva L.Ye., Meshkov V.V. Smazochnyye svoystva nanodispersnykh magnitnykh masel na osnove netraditsionnykh tekhnicheskikh zhidkostey [Lubricant properties of nanodisperse magnetic oils based on novel technical liquids], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2023, issue 15, pp. 679-691. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.679. (In Russian).
20. Bolotov A.N., Novikova O.O. Eksperimental'noye issledovaniye tekuchesti nanostrukturirovannoy magnitnoy zhidkosti v sil'nom magnitnom pole [Experimental study of the fluidity of nanostructured magnetic fluid in a strong magnetic field], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2023, issue 15, pp. 692-700. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.692. (In Russian).
21. 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, vol. 166, art. no. 107346, 12 p. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.107346.
22. Li D., Li R., Lee C. Effect of ferromagnetic metal base on friction and wear of 3D-printed aluminum alloy surface under magnetorheological fluid action, *Lubricants*, 2023, vol. 11, issue 7, art. no. 273, 20 p. DOI: 10.3390/lubricants11070273.