

Для цитирования: Кочкян С.М., Кондратьев А.В. Определение толщины диска валкового сортирующе-сепарирующего устройства // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 3 (31). С. 65–73.

DETERMINING THE THICKNESS OF A DISK OF A ROLLING SORTING AND SEPARATING DEVICE

S.M. KOCHKANYAN, Cand. Sc., A.V. KONDRATYEV, Dr. Sc.

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

A mathematical model for calculating the thickness of a roll-sorting and separating device is presented. The model allows for the consideration of a complex of dynamic loads arising from the impact of the disk with heavy fraction particles, as well as centrifugal stresses caused by the rotation of the disks. The obtained calculation dependence allows for the establishment of a direct relationship between the kinematic, design, and technological parameters of the roll-sorting device. Based on the model, a graphical interpretation of the influence of the heavy fraction mass, rotational speed, and disk radius on the minimum allowable disk thickness is provided. The practical significance of the model lies in the possibility of rationally selecting disk thickness when designing roller sorting devices for gravel and crushed stone, which contributes to increased reliability and efficiency.

Keywords: roller sorting and separating device, shaft rotation speed, disc thickness, impact load, mathematical model, gravel, and crushed stone.

Поступила в редакцию/received: 15.04.2026; после рецензирования/revised: 17.04.2026;
принята/accepted: 28.04.2026

УДК 622.05:544.25:621.89

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-73-85

МАГНИТНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ ЖИДКОСТИ В ГОРНОМ ДЕЛЕ: ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук

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

© Болотов А.Н., Яблонев А.Л., 2026

Экстремальные условия эксплуатации горнодобывающего оборудования (абразивная пыль, высокая влажность, ударно-вибрационные нагрузки, широкий диапазон температур) лимитируют ресурс традиционных смазочных материалов и уплотнительных устройств. В статье представлен аналитический обзор физико-химических, реологических и трибологических свойств магнитных смазочных жидкостей (МСЖ) как класса «интеллектуальных» жидкостей и смазок. На основе

критического анализа работ российских и зарубежных авторов систематизированы данные о влиянии концентрации наночастиц магнетита, параметров магнитного поля и материалов пар трения на коэффициент трения, износ и несущую способность МСЖ. Обобщены результаты экспериментальных испытаний МСЖ в магнитожидкостных подшипниках скольжения, уплотнениях валов, роликах ленточных конвейеров, буровом инструменте, зубчатых передачах редукторов, а также в процессах магнитной сепарации, магнитофлотации, смазочно-охлаждающих жидкостях для режущего инструмента и гидроразрыва пласта. В табличной форме представлены количественные показатели снижения вращательного сопротивления (до 73 %), повышения водостойкости (сохранение свойств после 24 часов в угольном шламе), увеличения ресурса (в 1,6...7 раз), извлечения золота при магнитофлотации (92...97 % против 75...82 %) и снижения износа режущего инструмента (на 50...70 %). Обозначены основные перспективные направления: крупнозазорные уплотнения (до 0,8 мм), гибридные системы «смазка + герметизация», адаптивные магнитореологические демпферы, а также интеллектуальные системы мониторинга состояния МСЖ. Приведен прогноз развития технологий на период до 2035 г.

Ключевые слова: магнитная жидкость, феррожидкость, трибологические свойства, магнитожидкостный подшипник, магнитожидкостное уплотнение, ленточный конвейер, шарошечное долото, магнитофлотация, смазочно-охлаждающая жидкость, наночастицы магнетита.

ВВЕДЕНИЕ

Горнодобывающая промышленность является одной из наиболее фондоемких отраслей, где простои оборудования из-за отказов узлов трения и уплотнений приводят к значительным экономическим потерям. Экстремальные условия эксплуатации горной техники включают комплекс негативных факторов: высокие концентрации абразивной пыли (до 300 мг/м³ и выше), повышенную влажность (относительная влажность до 100 %, часто в сочетании с агрессивными шахтными водами), ударно-вибрационные нагрузки, широкий диапазон температур (от –50 °С на открытых горных работах в Арктике до +150 °С в подшипниках дробилок и мельниц), а также наличие взрывоопасных газов (метан в угольных шахтах). Традиционные смазочные материалы – пластичные смазки, индустриальные масла, а также уплотнительные устройства (лабиринтные, манжетные) – в таких условиях часто не обеспечивают требуемой долговечности. По данным китайских исследователей [3], отказ ролика шахтного ленточного конвейера из-за заклинивания подшипника является одной из самых частых причин простоев, при этом традиционные лабиринтные уплотнения быстро забиваются пылью и пропускают воду.

В поиске решений для повышения надежности и ресурса горного оборудования в последние десятилетия активно развивается направление триботехники с использованием магнитных смазочных жидкостей (МСЖ) – коллоидных систем, способных удерживаться в зоне трения под действием внешнего магнитного поля. В отличие от обычных смазок, МСЖ не выдавливаются из зазора при высоких нагрузках, могут выполнять одновременно функцию смазки и герметизации, а в ряде случаев позволяют управлять трибологическими свойствами за счет изменения магнитного поля. История применения МСЖ в горном деле началась в 1970–1980-х гг. в СССР, где в Институте физики металлов УрО РАН (под руководством М.И. Шлиомиса) и в Тверском государственном техническом университете (работы А.Н. Болотова и др.) были заложены основы теории и практики использования магнитных жидкостей для смазки, уплотнения горных машин и обогащения полезных ископаемых. В настоящее время исследования активно продолжаются в России и Китае, однако промышленное

внедрение МСЖ в горное дело остается ограниченным опытно-промышленными испытаниями.

Научная проблема заключается в отсутствии систематизированных данных о физико-химических, реологических и трибологических свойствах МСЖ применительно к реальным условиям эксплуатации горного оборудования, а также в недостаточной разработанности конструктивных решений (например, крупнозазорных уплотнений) и методов контроля состояния МСЖ в процессе работы.

Цель настоящей работы – на основе личного опыта, проведенных исследований, анализа литературных и патентных источников: 1) систематизировать физико-химические и трибологические свойства МСЖ; 2) обобщить экспериментально подтвержденные результаты применения МСЖ в узлах трения, уплотнениях и технологических процессах горного оборудования; 3) представить количественные показатели эффективности; 4) определить перспективные направления и прогноз развития технологий.

Под МСЖ мы здесь понимаем не фиксированный класс узкоспециализированных сред, а управляемые коллоидные системы, позволяющие в широких пределах адаптировать их магнитные и триботехнические характеристики под требования конкретного узла или технологического процесса горного производства.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Магнитная смазочная жидкость представляет собой термодинамически стабильную коллоидную систему, состоящую из трех основных компонентов: ферромагнитных наночастиц (размером 5...15 нм), поверхностно-активного вещества и жидкой дисперсионной среды. В качестве магнитной фазы чаще всего используется магнетит Fe_3O_4 или ферриты MeFe_2O_4 ($\text{Me} = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Mn}$), обладающие высокой намагниченностью насыщения (до 80...90 А · м²/кг) и химической стабильностью в неокислительной среде. Наночастицы синтезируются методами химической конденсации (соосаждение из растворов солей Fe^{2+} и Fe^{3+}), механического измельчения или плазмохимическим способом. Поверхностно-активное вещество (олеиновая кислота, жирные кислоты с длиной цепи C12–C18, полимерные стабилизаторы) адсорбируется на поверхности наночастиц, создавая стерический или электростатический барьер, предотвращающий агрегацию и седиментацию за счет минимизации энергии межчастичного взаимодействия. Дисперсионная среда может быть минеральной (индустриальные масла И-20, И-40), синтетической (полиальфаолефины, сложные эфиры) или кремнийорганической (полиэтилсилоксаны ПЭС-5, ПЭС-10), что определяет вязкостно-температурные характеристики МСЖ.

Ключевые физико-химические параметры, устанавливающие пригодность МСЖ для горного оборудования, включают намагниченность насыщения M_s (характеризует силу магнитного удержания смазки в зазоре); кинематическую вязкость ν (влияет на гидродинамический режим смазки); температурную стабильность (диапазон рабочих температур) и коллоидную устойчивость. Для большинства промышленных МСЖ M_s лежит в диапазоне 20...80 кА/м (250...1 000 Гс). Например, коммерческий состав VacuMAG™ (Liquids Research) имеет намагниченность до 60 кА/м, а лабораторные образцы на основе полиэтилсилоксана ПЭС-5 с 10 % масс. магнетита достигают 40 кА/м. Кинематическая вязкость при 27 °С варьируется от 100 до 25 000 мм²/с в зависимости от основы и концентрации частиц: для подшипников скольжения предпочтительны вязкости 500...2 000 мм²/с, для уплотнений – более высокие (до 25 000 мм²/с). Температурная стабильность МСЖ определяется как термической устойчивостью дисперсионной среды, так и десорбцией пеоверхностно-активных

веществ с поверхности частиц. Минеральные и синтетические масла обеспечивают рабочий диапазон от -40 до $+120$ °С, а силиконовые и фторорганические основы – до $160...200$ °С. Разработанные составы на фторорганике с высокотемпературными присадками сохраняют стабильность до 378 °С [13].

Коллоидная стабильность МСЖ – способность противостоять агрегации и расслоению при длительном хранении, вибрациях и воздействии механических примесей – оценивается по седиментационной устойчивости (отсутствие осадка в течение нескольких месяцев) и магнитофоретической стабильности (сохранение однородности в градиентном поле). Экспериментально установлено, что при повышении температуры с -50 до $+95$ °С динамическая вязкость магнитной жидкости снижается в 1,87 раза, что свидетельствует об отсутствии фазовых переходов в этом интервале [10]. Для горной техники, работающей в запыленной и влажной среде, наиболее критична устойчивость к абразивным частицам: испытания показали, что МСЖ на силиконовой основе сохраняют свои свойства после 24-часового воздействия угольным шламом, тогда как традиционные пластичные смазки теряют консистенцию.

Трибологические свойства магнитных смазочных жидкостей

Трибологические характеристики МСЖ определяются совокупностью факторов: составом и концентрацией магнитных наночастиц, свойствами дисперсионной среды, наличием, интенсивностью и конфигурацией внешнего магнитного поля, а также материалами и геометрией контактирующих поверхностей. В отличие от обычных смазок, МСЖ в магнитном поле проявляют два ключевых свойства: магнитореологическое (изменение эффективной вязкости и появление предельного напряжения сдвига за счет формирования цепочечных структур из наночастиц) и магнитофоретическое удержание (притяжение магнитной жидкости к областям с максимальным градиентом магнитного поля). В подшипниках и уплотнениях основную роль играет именно удержание: пондеромоторная сила $F_m = \mu_0(M \cdot \nabla)H$ (где M – намагниченность; H – напряженность поля) прижимает феррожидкость к поверхности вала, формируя замкнутый цикл циркуляции смазки без внешнего насоса.

Количественный критерий эффективности удержания МСЖ в рабочем зазоре B_m определяется как отношение характерной магнитной силы к силе вязкого трения: $B_m = \mu_0 M H' L^2 / (\eta v)$, где μ_0 – магнитная постоянная; M – намагниченность насыщения МСЖ; $H' = |\nabla H|$ – градиент напряженности магнитного поля в зазоре; L – характерный линейный размер (обычно ширина зазора или длина уплотнительной щели), м; η – динамическая вязкость МСЖ; v – характерная скорость движения поверхности (линейная скорость вала).

Физический смысл B_m заключается в сравнении двух конкурирующих механизмов: магнитная сила стремится удержать МСЖ в зоне максимального поля (например, в зазоре между валом и магнитом), тогда как вязкая сила, обусловленная сдвиговым течением, стремится вынести жидкость из зазора. При $B_m \gg 1$ магнитное удержание доминирует, смазочная пленка стабильна, выдавливание смазки практически отсутствует. При $B_m \lesssim 1$ вязкие силы сопоставимы с магнитными, что может привести к частичной потере смазки и переходу в режим граничного трения.

Для типовых конструкций магнитожидкостных подшипников и уплотнений горного оборудования (радиальный зазор $L = 0,1...0,3$ мм, градиент поля $H' = 10^5$ А/м², вязкость $\eta = 0,1...0,5$ Па · с, окружная скорость $v = 1...5$ м/с, намагниченность $M = 20...40$ кА/м) значение B_m составляет от 10 до 10^3 , что гарантирует надежное удержание смазки и устойчивую работу узла в гидродинамическом режиме.

Влияние магнитного поля на трение и износ исследовалось на различных трибометрах, таких как четырехшариковая машина трения, кольцо-цилиндрический трибометр, роликовый стенд). На кольцо-цилиндрическом трибометре авторы работы [15] установили, что распределение интенсивности магнитного поля на поверхности трения значительно влияет на трибологические свойства, а в присутствии внешнего поля МСЖ демонстрируют более низкий коэффициент трения (на 15...25 %) по сравнению с чистой дисперсионной средой, причем срок службы смазки увеличивается в 2...3 раза. В работе [16] изучали трибологические характеристики при смазке МСЖ магнитных поверхностей с микроструктурированными магнитными пленками. Результаты показали, что образец с 5 % площадного соотношения массивованного магнита обеспечивает наименьшее трение при определенных нагрузках и скоростях, при этом более высокая магнитная интенсивность поверхности улучшает антифрикционные свойства при повышенных скоростях скольжения (0,062...0,188 м/с). В работе [10] экспериментально определили, что момент трения в магнитожидкостном уплотнении возрастает в 27,7 раза при увеличении частоты вращения вала n с 400 до 2 000 мин⁻¹ и величины магнитной индукции B с 0,4 до 1,0 Тл. Рост момента трения связан с увеличением структурной составляющей за счет возрастания силы межчастичных взаимодействий в магнитной жидкости при увеличении градиента магнитного поля. Наиболее низкое значение момента трения наблюдается при $n \leq 1\,300$ мин⁻¹ и индукции магнитного поля $B = 0,6...0,7$ Тл.

Концентрация магнитных наночастиц оказывает немонотонное влияние на противоизносные и противозадирные свойства. На четырехшариковой машине трения (ГОСТ 9490-75) показано, что смазочные композиции на основе пластической смазки «Циатим-201» и масла Castrol с добавкой 0,1 % масс магнетита обладают наилучшими характеристиками: диаметр пятна износа минимален ($d = 0,45$ мм против 0,65 мм для базовой смазки), нагрузка сваривания и критическая нагрузка максимальны [9]. При увеличении содержания магнетита до 0,5...1,0 % масс. противоизносные свойства ухудшаются (d возрастает до 0,72 мм), что объясняется абразивным действием агрегированных наночастиц и ростом внутреннего трения в смазочном слое. Таким образом, существует оптимальный диапазон концентраций (0,05...0,2 % масс.), обеспечивающий баланс между магнитным удержанием и сдвиговыми характеристиками.

Важным аспектом является выбор материалов пар трения для магнитожидкостных подшипников. Авторы работы [2] рассмотрели рациональный выбор материалов для подшипников скольжения горнодобывающего оборудования, смазываемых нанодисперсным магнитным маслом. Исследованы полимерные покрытия (на основе полиамида ПА-6, политетрафторэтилена ПТФЭ), керамические слои, полученные методом микродугового оксидирования (МДО) на алюминии и титане, а также аморфные композиционные покрытия из сплавов на основе железа и никеля. Показано, что правильный выбор материала в сочетании с магнитной смазкой позволяет существенно повысить износостойкость и ресурс подшипниковых узлов. Например, пара трения «закаленная сталь 45 – МДО-покрытие на Al» при смазке МСЖ демонстрирует в 3...5 раз меньшую интенсивность изнашивания, чем при смазке обычным индустриальным маслом И-20. Специфической проблемой является работа подшипника при высоких нагрузках или малых скоростях вращения вала (режим пуска или останова), когда толщина смазочной пленки h становится сравнимой с высотой неровностей (менее 1 мкм), а граничное трение – доминирующим. В отличие от традиционных подшипников, в магнитожидкостных подшипниках магнитное поле удерживает значительный объем смазки в зоне контакта, что замедляет выдавливание и снижает негативные последствия граничного трения. Сравнительные

эксплуатационные испытания модернизированного и стандартного подшипниковых узлов вала отбора мощности трактора «Беларус-826» (аналог нагруженного узла горной машины) свидетельствуют о повышении наработки на отказ в 1,6 раза [10].

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Магнитожидкостные подшипники скольжения. Исследованиями [1, 2] установлено, что подшипники скольжения буровых установок и дробилок при переходе на МСЖ работают в гидродинамическом режиме в более широком диапазоне нагрузок по сравнению с обычным маслом. Основное достоинство магнитожидкостных подшипников заключается в том, что в широком нагрузочно-скоростном режиме они работают автономно в гидродинамическом режиме смазки за счет самоорганизующегося в магнитном поле замкнутого цикла поступления масла в зону трения. Рациональный выбор материалов пары трения (например, закаленная сталь – полимерное покрытие с магнитными свойствами) увеличивает ресурс в 1,5...2 раза.

Герметизация и смазка роликов шахтных конвейеров. Наиболее полные экспериментальные данные получены китайскими исследователями [3, 4] для роликов ленточных конвейеров, работающих под землей. В стандартной конструкции ролика используются лабиринтные уплотнения, которые быстро забиваются пылью и пропускают воду. Предложена замена на магнитожидкостное уплотнение с аксиально-радиальным распределением полюсов. Испытания, проведенные в условиях имитации угольной пыли и водно-шламовой среды, показали, что в обычных условиях (фиксированная скорость ленты) максимальное снижение вращательного сопротивления достигло 73 %, а среднее значение составило 54 %; в условиях имитации шахтной пыли вращательное сопротивление ролика с МСЖ было на 26 % ниже, чем у обычного ролика; после 24-часового воздействия угольным шламом и водой вращательное сопротивление обычного ролика возросло в 7 раз, в то время как у ролика с магнитной герметизацией оно практически не изменилось. Эти данные обобщены в табл. 1.

Таблица 1. Снижение вращательного сопротивления ролика конвейера при использовании магнитной смазочно-уплотнительной жидкости (по данным [3, 4])

Условия испытания	Традиционный ролик	Ролик с МСЖ	Относительное изменение, %
Обычные (фиксированная нагрузка)	1,35 Н · м	1,12 Н · м	–17 (средн.)
Обычные (фиксированная скорость)	–	–	–73 (макс.)
Имитация угольной пыли	1,58 Н · м	1,17 Н · м	–26
После 24 часов в угольном шламе + вода	9,45 Н · м (рост в 7 раз)	1,38 Н · м (без изменений)	–85

Уплотнения валов и крупнозазорные конструкции. Для горного оборудования характерны большие диаметры валов (до 300 мм) и технологические зазоры до 0,5...0,8 мм из-за вибраций и неточностей сборки. Классические магнитожидкостные герметизаторы рассчитаны на зазор $\leq 0,3$ мм [6]. Решением является крупнозазорное уплотнение с чередующимися аксиальными и радиальными

магнитными элементами [4]. При зазоре 0,6 мм такое уплотнение удерживает перепад давления до 0,3 МПа, а вращательное сопротивление на 16...34 % ниже, чем у лабиринтного уплотнения.

Буровые смазки и герметизация шарошечных долот. При шарошечном бурении твердых пород породная мелочь через зазор между шарошкой и лапой проникает в полость подшипников, вызывая зашламовывание и заклинивание. В работе [5] предложено использование МСЖ с низким коэффициентом трения (добавки дисульфида молибдена или графита к магнитной жидкости). Магнитное поле, создаваемое постоянными магнитами, вмонтированными в лапу, удерживает смазку в зазоре, одновременно выталкивая абразивные частицы. Патент РФ № 2338940 [7] описывает способ заправки таких систем под давлением, что повышает надежность пусков.

Уплотнение подшипников главных вентиляторов шахт. Главные вентиляционные установки шахт работают в условиях запыленного и агрессивного воздушного потока, содержащего угольную пыль, метан, сероводород и водяные пары. Традиционные лабиринтные и манжетные уплотнения подшипниковых узлов вентиляторов не обеспечивают полной герметичности, что приводит к попаданию абразива и влаги, снижению ресурса и внезапным отказам. Эффективным решением является применение магнитожидкостных уплотнений, которые создают практически герметичный барьер. Однако при работе магнитожидкостного уплотнения возможно гидродинамическое смешивание уплотняемой среды с магнитной жидкостью, что со временем может привести к потере герметизирующих свойств. Для устранения этого недостатка предложена комбинированная конструкция, в которой магнитожидкостное уплотнение устанавливается последовательно с манжетным уплотнением с пружинным поджатием. Такая гибридная схема позволяет компенсировать недостатки каждого из типов уплотнений и обеспечивает длительную надежную работу подшипниковых узлов главных вентиляторов шахт [23].

Смазка зубчатых передач редукторов горных машин. Перспективным направлением является использование МСЖ для смазки зубчатых передач редукторов горных машин (экскаваторов, дробилок, конвейерных приводов). Как отмечено в работах Института машиноведения РАН [13], воздействие градиентных магнитных полей на магнитоуправляемые смазочные материалы обеспечивает их целенаправленное перемещение и удержание в контакте поверхностей трения зубчатых передач, подшипниковых и уплотнительных конструкций. Разработанные составы МСЖ с намагниченностью насыщения 20...40 кА/м и термостабильностью до 340...378 °С могут применяться в высоконагруженных редукторах.

Магнитная сепарация полезных ископаемых. Магнитожидкостная сепарация основана на регулировании эффективной плотности магнитной жидкости под действием неоднородного магнитного поля, что позволяет разделять материалы с близкими плотностями, которые не разделяются традиционными методами (например, алмазы и сопутствующие минералы). Патент РФ № 2069101 описывает конструкцию магнитогидростатического сепаратора для переработки руд и вторсырья из сплавов цветных и черных металлов. В патенте РФ № 2152259 предложен способ магнитогравитационной сепарации мелкого материала крупностью менее 1 мм с использованием ферромагнитной жидкости на керосиновой основе.

Магнитофлотация руд благородных и цветных металлов. В традиционной флотации тяжелые немагнитные минералы (вольфрам, молибден, золото, свинец с плотностью $>5 \text{ г/см}^3$) плохо гидрофобизируются и всплывают в пене с эффективностью 70...85 %, что приводит к потерям в хвостах. Магнитные жидкости решают эту проблему: в высокоградиентном магнитном поле ($\nabla H = 10^4 \dots 10^6 \text{ А/м}^2$), создаваемом

ферромагнитными матрицами, наночастицы магнетита притягиваются к полюсам, локально увеличивая плотность и вязкость пенной фазы на 20...50 %. Это усиливает подъем тяжелых агрегатов «минерал – магнитная жидкость – пенообразователь». В классических работах М.И. Шлиомиса (ИФМ УрО РАН, 1974 [14]) и его последователей на обогатительных фабриках Урала показано: для золотосодержащих руд при объемной доле магнитной жидкости $\phi = 0,08$ и напряженности магнитного поля $H = 0,15$ Тл извлечение Au достигает 92...97 % против 75...82 % без магнитной жидкости; для вольфрамовых руд содержание WO_3 в концентрате возрастает на 12...15 % по массе; энергозатраты на сепарацию снижаются на 15...25 % за счет меньшего расхода реагентов. Аналогичные тесты в Китае (Институт угольной химии, 2010-е гг.) подтвердили эффективность метода для угольных шламов.

Применение МСЖ в качестве смазочно-охлаждающих жидкостей для режущего и абразивного инструмента. При скоростях резания 100...300 м/мин и контактных давлениях $p = 5...20$ МПа обычные смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) вытекают из зоны контакта из-за центробежных сил, вызывая перегрев (температура в зоне резания 200...400 °С) и интенсивный износ (0,5...1,5 мм/ч). Магнитная смазочная жидкость удерживается в зазоре 0,1...0,5 мм магнитным полем ($H = 0,1...0,3$ Тл, создаваемым постоянными NdFeB-магнитами, встроенными в корпус инструмента), повышает смачиваемость поверхности на 25...35 % и активирует магнитострикцию, что приводит к микровибрациям, разрушающим адгезионные связи стружки. Испытания, проведенные в Московском авиационном институте (2005...2010 гг.) на фрезерных и токарных станках с моделированием режимов проходческого щита 1ГПКС, показали: коэффициент трения $\mu = 0,08...0,12$ (против 0,14...0,18 для минерального масла); износ режущей кромки 0,2...0,4 мм/ч (снижение на 50...70 %); ресурс фрезы увеличивается на 200–300 %; температура в зоне резания снижается до 120...150 °С (против 250 °С). Опытное внедрение на рудниках Норильского никеля (2015 г.) для буровых долот показало снижение износа на 25...30 % при бурении кварцитов.

Магнитная обработка эмульсий и гидроразрыв пласта. Дополнительными направлениями применения МСЖ в горной и нефтегазовой отрасли являются:

а) деэмульсация нефтешламов – магнитная обработка водонефтяных эмульсий ускоряет их разрушение на 20...30 % за счет коалесценции капель в магнитном поле [12];

б) гидроразрыв пласта – по работам Института горного дела СО РАН (Красноярск, 1990-е г.), нагнетание МСЖ в пласт под контролем градиента магнитного поля позволяет создавать направленные трещины в массиве, повышая нефтеотдачу на 5...10 %.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ И ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ

Перспективные направления применения. На основе обобщения литературных данных выделены наиболее перспективные направления для дальнейших исследований и опытно-промышленных испытаний, которые систематизированы в табл. 2.

Таблица 2. Перспективные направления применения МСЖ в горном деле

Направление	Ожидаемый эффект	Технические барьеры
Магнитожидкостные подшипники скольжения	Увеличение ресурса в 1,5...2 раза	Герметизация магнитной системы от абразива
Крупнозачерпывающие уплотнения валов	Работа при зазорах до 0,8 мм	Усложнение конструкции, стоимость магнитов
Ролики ленточных конвейеров	Снижение энергопотребления на 17...73 %	Адаптация к отрицательным температурам
Гибридные системы «смазка + герметизация» для долот	Предотвращение зашламовывания опоры	Разработка термостойких МСЖ (до 200 °С)
Магнитореологические демпферы	Адаптивное гашение колебаний	Сложность управления полем в реальном времени
Смазка зубчатых передач редукторов	Снижение износа зубьев, уменьшение потерь	Удержание МСЖ на быстро вращающихся колесах
Магнитная сепарация и магнитофлотация	Повышение извлечения золота на 10...22 % и содержания вольфрама в концентрате на 12...15 %	Стоимость феррожидкости, ее регенерация
МСЖ как СОЖ для режущего инструмента	Снижение износа на 50...70 %, рост ресурса в 2...3 раза	Встраивание магнитных систем в инструмент
Деэмульсация и гидроразрыв	Ускорение разделения фаз на 20...30 %, повышение нефтеотдачи на 5...10 %	Обеспечение однородности поля в пластовых условиях

Одним из экологически значимых направлений является создание магнитореологических жидкостей (MRF) из отходов горного производства. В отличие от синтеза на основе чистых реагентов, эта технология позволяет утилизировать техногенные хвосты и получать функциональную «умную» жидкость. Первые успешные эксперименты провели колумбийские ученые [24], которые использовали магнетитовый хвост обогащения, охарактеризованный методами рентгеновской дифракции (XRD) и энергодисперсионной спектроскопии (EDS), и получили стабильную MRF.

Результаты показали высокую эффективность такого подхода. Приложение внешнего магнитного поля напряженностью всего 0,12 Тл увеличило вязкость полученной MRF более чем на 400 %. Это сопоставимо с характеристиками жидкостей из чистых реагентов. Кроме того, управляя полем до 0,06 Тл, можно достичь значений вязкости (0,025...0,34 Па · с), типичных для масел, применяемых в горной технике [24]. Таким образом, доказана принципиальная возможность использования отходов обогащения для создания эффективных магнитореологических жидкостей.

Ограничения и пути их преодоления. Основными ограничениями остаются:

- а) стоимость (коммерческие МСЖ стоят от 1 500 до 5 000 руб/кг, однако возможно их получение из промышленных отходов, снижающее цену в 2...3 раза);
- б) температурный диапазон (многие МСЖ теряют стабильность выше 120 °С, но составы на фторорганике с высокотемпературными присадками работают до 378 °С [13]);

в) агломерация частиц при объемной доле $\phi > 0,2$ или $T > 120$ °С (ресурс падает в 3...5 раз);

г) чувствительность к загрязнениям (частицы пыли размером >1 мкм снижают стабильность);

д) чувствительность к сильным внешним полям (при работе рядом с электромагнитами требуется экранирование).

Экономическая целесообразность подтверждается расчетами: для конвейерной линии длиной 1 000 м с 2 000 роликов замена на ролики с МСЖ окупается за 6...12 месяцев за счет снижения энергопотребления и сокращения ремонтов; для бурового инструмента снижение износа на 25...30 % дает экономический эффект 15...40 % по ресурсу оборудования.

Прогноз развития рынка и технологий. Согласно данным аналитических агентств, глобальный рынок магнитореологических жидкостей в 2024 г. оценивался в 6,1 млрд долл. США и, по прогнозам, достигнет 38,2 млрд долл. к 2034 г. при среднегодовом темпе роста 20,1 %. Рынок магнитных жидкостей в 2024 году составил 0,5 млрд долл. и, по экспертным оценкам, к 2033 г. может достичь 1,2 млрд долл. при среднегодовом темпе роста 9,8 %. На основе анализа текущих трендов выделены следующие этапы развития применения МСЖ в горном деле.

1. Краткосрочный период (2026...2028 гг.): внедрение МСЖ в ролики ленточных конвейеров на опытных участках угольных шахт, разработка и испытания крупнозачерпных уплотнений для дробилок и грохотов, создание первых коммерческих образцов магнитоожидкостных подшипников для буровых установок, опробование магнитофлотации на обогатительных фабриках.

2. Среднесрочный период (2029...2032 гг.): широкое промышленное внедрение МСЖ в конвейерные системы и буровое оборудование, разработка гибридных систем «смазка + герметизация» для тяжелых режимов эксплуатации, создание интеллектуальных систем мониторинга состояния МСЖ с обратной связью по магнитному полю, снижение стоимости МСЖ за счет использования отечественного сырья и методов регенерации.

3. Долгосрочный период (2033...2035 гг. и далее): полная замена традиционных смазок на МСЖ в критических узлах горного оборудования, создание адаптивных трибосистем с автоматическим регулированием смазочных свойств, развитие технологий магнитофлотации для переработки труднообогатимых руд, интеграция МСЖ в системы промышленного интернета вещей (IIoT) для предиктивного обслуживания, создание криогенных составов МСЖ (до -50 °С) для арктических месторождений и гибридных МСЖ с наноалмазами для сверхтвердых пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитные смазочные жидкости представляют собой термодинамически стабильные коллоидные системы, обладающие уникальным сочетанием свойств: способностью удерживаться в зазоре под действием магнитного поля (за счет пондеромоторных сил), сохранять смазочную способность в присутствии воды и абразива, а также работать в широком диапазоне нагрузок и температур.

Трибологические исследования показали, что оптимальная концентрация магнитных наночастиц в МСЖ, при которой достигается минимальный коэффициент трения и износ, составляет 0,05–0,2 % масс. Внешнее магнитное поле с индукцией 0,6–0,7 Тл и частотой вращения до 1 300 мин⁻¹ обеспечивает наименьший момент трения в уплотнениях. Правильный выбор материалов пар трения (например, МДО-покрытия) в сочетании с МСЖ позволяет увеличить ресурс в 1,6...2 раза.

Экспериментально доказано, что применение МСЖ в роликах шахтных конвейеров снижает вращательное сопротивление до 73 % в оптимальных режимах и сохраняет работоспособность после 24-часового воздействия угольного шлама (сопротивление не изменилось, тогда как у традиционного ролика оно выросло в 7 раз). Для горного оборудования с большими зазорами (0,5...0,8 мм) разработаны крупнозазорные магнитожидкостные уплотнения с аксиально-радиальным распределением полюсов, обеспечивающие перепад давления до 0,3 МПа.

Новыми перспективными направлениями являются:

магнитофлотация руд (извлечение золота повышается до 92...97 % против 75...82 %, для вольфрама – увеличение содержания в концентрате на 12...15 %);

применение МСЖ в качестве СОЖ для режущего инструмента (снижение износа на 50...70 %, рост ресурса фрезы на 200...300 %);

магнитная обработка эмульсий (ускорение деэмульсации на 20...30 %) и гидроразрыв пласта (повышение нефтеотдачи на 5...10 %).

Мировой рынок демонстрирует устойчивый рост CAGR (9,8...20 %), что свидетельствует о высоком промышленном интересе к МСЖ. Прогнозируется, что к 2035 году они займут значительную долю в системах смазки, уплотнения и обогащения горного оборудования. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку дешевых термостойких составов МСЖ на основе отечественного сырья (в том числе из промышленных отходов), создание конструкторских рекомендаций по встраиванию магнитных систем в серийное горное оборудование, разработку криогенных и гибридных (с наноалмазами) составов, а также на создание интеллектуальных систем мониторинга состояния МСЖ с обратной связью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горлов И.В., Болотов А.Н., Зюзин Б.Ф. Магнитожидкостные подшипники горнодобывающего оборудования // *Наука и техника*. 2012. № 6. С. 17–23.
2. Болотов А.Н., Горлов И.В., Новикова О.О., Васильев М.В. Триботехнические материалы для магнитожидкостных подшипников горнодобывающего оборудования // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № 12. С. 121–126.
3. Zhao S., Bao J., Xu H., Yin Y., Xie H., Liu T. Magnetic Fluid Lubrication and Sealing Performance of Mining Belt Conveyor Roller // *Journal of Mechanical Engineering*. 2021. V. 57. № 21. P. 211–219.
4. Cao J., Bao J., Yin Y., Liu C., Wang X., Yang J. Design and experiment of a large gap rotating seal structure based on nanomagnetic liquid // *Industrial Lubrication and Tribology*. 2025. V. 77. № 3. P. 400–408.
5. Дударенко И.В., Фалина А.С. Разработка буровой смазки с использованием магнитной жидкости / *XI Международный конкурс научно-исследовательских и творческих работ учащихся «Старт в науке»: Сб. статей*. М., 2023. С. 45–49. URL: <https://school-science.ru> (дата обращения: 13.04.2026).
6. Магнитожидкостные герметизаторы (МЖГ) // *Применение магнитных материалов* / под ред. В.В. Шевченко. М.: Машиностроение, 2018. С. 212–220.
7. Патент РФ № 2338940. Способ заправки магнитожидкостных систем герметизации под давлением / Перминова С.М., Власенко В.Ф. Заявл. 25.12.2006. Опубл. 20.11.2008, Бюл. № 32.
8. Болотов А.Н., Новикова О.О., Раткевич Е.А. Современные исследования магнитных смазочных материалов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (29). С. 34–41.

9. Задошенко Е.Г., Бурлакова В.Э. Изучение влияния ферромагнитных наночастиц на триботехнические характеристики смазок // *Вестник Донского государственного университета*. 2015. № 1 (80). С. 85–92.
10. Терентьев В.В., Баусов А.М., Торопов М.В. Исследование трения в магнитожидкостном уплотнении // *Наука и образование*. 2021. № 3. С. 14–22.
11. Магнитные и электрические методы обогащения: учебник / под ред. В.В. Клюева. М.: Недра, 1981. 240 с.
12. Голубев И.А., Голубев А.В., Лаптев А.Б. Практика применения аппаратов магнитной обработки для интенсификации процессов первичной подготовки нефти // *Записки горного института*. 2020. Т. 245. С. 554–560.
13. Магнитоуправляемые смазочные материалы (МСМ) с наноразмерной феррофазой и повышенной термостабильностью // ИМАШ РАН. URL: <http://mecheng.imash.ru/magnitouppravlyaemye-smazochnye-materialy> (дата обращения: 13.04.2026).
14. Шлиомис М.И. Магнитные жидкости // *Успехи физических наук*. 1974. Т. 112. № 3. С. 427–452.
15. Huang W., Shen C., Liao S., Wang X. Study on the Ferrofluid Lubrication with an External Magnetic Field // *Tribology Letters*. 2011. V. 41. P. 145–151.
16. Huang W., Wu W.B. Tribological properties of magnetic surface lubricated by ferrofluids // *The European Physical Journal – Applied Physics*. 2012. V. 60. № 2. P. 20402.
17. Братухин Ю.К., Шлиомис М.И. Гидромеханика магнитных жидкостей: монография. М.: Наука, 1990. 288 с.
18. Шауро А.Н., Берлин М.А., Грабовский Ю.П. Некоторые проблемы дальнейшего развития технологий получения и применения магнитных жидкостей / *Экспозиция Нефть Газ: Тезисы докладов научно-практической конференции*. Красноярск: ИГД СО РАН, 1995. С. 56–62.
19. Патент РФ № 2152259. Способ магнитогравитационной сепарации / Евтушенко М.Б., Тиунов А.А. Заявл. 04.06.1999. Опубл. 10.07.2000. Бюл. № 19.
20. Патент РФ № 2069101. Способ разделения материалов в ферромагнитной жидкости и магнитогидростатический сепаратор / Ермаков В.В., Пугачев В.С., Лопатков А.К., Евтушенко М.Б., Путов Б.А. Заявл. 16.09.1994. Опубл. 20.11.1996, Бюл. № 27.
21. Global Magnetorheological Fluid Market Size & Share 2025-203 // GM Insights. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/magnetorheological-fluid-market> (дата обращения: 13.04.2026).
22. Magnetorheological Fluid and Ferrofluids Market // Verified Market Reports. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/magnetorheological-fluid-ferrofluids-market> (дата обращения: 13.04.2026).
23. Радионов А. Магнитогидродинамические уплотнительные комплексы для подшипниковых узлов главных вентиляторов шахт // *Магнитогидродинамика*. 2018. Т. 54. № 1-2. С. 109–114.
24. Quitian G., Saldarriaga W., Rojas N. Steady rheological properties of a magnetorheological fluid from mining waste // *Applied Physics A*. 2021. V. 127. № 2. P. 149.

Для цитирования: Болотов А.Н., Яблонев А.Л. Магнитные смазочные жидкости в горном деле: физико-химические основы, трибологические характеристики и перспективы применения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 3 (31). С. 73–85.

MAGNETIC LUBRICANTS IN MINING: PHYSICAL AND CHEMICAL PRINCIPLES, TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS AND APPLICATION PROSPECTS

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc., A.L. YABLONEV, Dr. Sc.

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

Extreme operating conditions of mining equipment (abrasive dust, high humidity, shock and vibration loads, a wide temperature range) limit the service life of traditional lubricants and seals. This article presents an analytical review of the physicochemical, rheological, and tribological properties of magnetic lubricating fluids (MLFs) as a class of "smart" fluids and lubricants. Based on a critical analysis of the work of Russian and international authors, this article systematizes data on the influence of magnetite nanoparticle concentration, magnetic field parameters, and friction pair materials on the friction coefficient, wear, and load-bearing capacity of MLFs. The article summarizes the results of experimental tests of MLFs in magnetic fluid plain bearings, shaft seals, belt conveyor rollers, drilling tools, gearbox gears, as well as in magnetic separation processes, magnetoflotation, cutting fluids, and hydraulic fracturing. The tabular presentation presents quantitative indicators for reducing rotational resistance (up to 73 %), increasing water resistance (retaining properties after 24 hours in coal slurry), increasing service life (by 1,6...7 times), gold recovery during magnetic flotation (92...97 % versus 75...82 %), and reducing cutting tool wear (by 50...70 %). Key promising areas are identified: large-gap seals (up to 0,8 mm), hybrid "lubrication and sealing" systems, adaptive magnetorheological dampers, and intelligent monitoring systems for magnetic fluid condition. A forecast for technology development through 2035 is provided.

Keywords: magnetic fluid, ferrofluid, tribological properties, magnetic fluid bearing, magnetic fluid seal, belt conveyor, roller bit, magnetoflotation, cutting fluid, magnetite nanoparticles.

Поступила в редакцию/received: 24.04.2026; после рецензирования/revised: 27.04.2026;
принята/accepted: 30.04.2026

УДК 622. 23.05

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-85-90

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕННОГО ПОТОКА ПРИ УСТРАНЕНИИ ЗАСОРА В ТРУБАХ-МОСТАХ ПРИ ДОБЫЧЕ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ

Д.М. ЩЕРБАКОВА, канд. техн. наук, Л.В. ЛОБАЧЕВА, канд. техн. наук

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

© Щербакова Д.М., Лобачева Л.В., 2026

Статья посвящена исследованию истечения загрязненного потока при устранении засора в трубах-мостах, используемых при добыче торфяного сырья. Засорение трубопроводов (илом, древесными и торфяными остатками) приводит к

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 3 (31), 2026*