

УДК 621.892.8

DOI 10.47367/0021-3497_2025_4_210

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ
МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛАХ
МАШИН И МЕХАНИЗМОВ**

**THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE STABILITY OF MAGNETIC
FLUIDS IN BEARING ASSEMBLIES OF MACHINES AND MECHANISMS**

А.М. БАУСОВ¹, А.Л. НИКИФОРОВ¹, В.А. КОМЕЛЬКОВ¹, В.Е. РУМЯНЦЕВА^{1,2}, А.С. МИТРОФАНОВ¹

A.M. BAUSOV¹, A.L. NIKIFOROV¹, V.A. KOMELKOV¹, V.E. RUMYANTSEVA^{1,2}, A.S. MITROFANOV¹

¹Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
²Ивановский государственный политехнический университет)

(¹Ivanovo Fire and Rescue Academy of State Fire Service of EMERCOM of Russia,
²Ivanovo State Polytechnic University)

E-mail: ambausov@yandex.ru, anikiforoff@list.ru, komelkov@rambler,
varrym@gmail.com, mitart1992@mail.ru

В статье рассмотрены методы теоретического исследования устойчивости магнитной жидкости (МЖ). При решении задачи о теоретическом определении устойчивости МЖ существенным является вопрос о взаимодействии коллоидных частиц. Эти методы применяются в исследовании влияния межчастичных взаимодействий на образование кластеров и цепочек в магнитных жидкостях. Результаты моделирования для частиц, например кобальта размером 15 нм, показали, что в нулевом внешнем поле частицы образуют структуры с незамкнутыми контурами без какой-либо выделенной пространственной ориентации.

The article discusses methods for theoretical investigation of the stability of magnetic fluid (MFs). When solving the problem of theoretical determination of the stability of MF, the question of colloidal particle interaction is essential. These methods are applied in studying the effect of interparticle interactions on the formation of clusters and chains in magnetic fluids. Simulation results for cobalt particles with a size of 15 nm showed that in zero external field, the particles form structures with open contours without any specific spatial orientation.

Ключевые слова: магнитные жидкости, коллоидные системы, устойчивость магнитных жидкостей, дисперсная фаза, концентрация, коагуляция.

Keywords: magnetic fluids, colloidal systems, stability of magnetic fluids, dispersed phase, concentration, coagulation.

Практически во всех механических устройствах, машинах и аппаратах используются различные виды подшипников и уплотнений. Наибольшее распространение получили подшипники качения и скольжения, а также сальниковые уплотнения [1]. Следует отметить, что данные элементы по своей сути являются расходными материалами и требуют постоянного контроля, надлежащего обслуживания и своевременной замены. Сроки эксплуатации данных подшипниковых узлов и уплотнений обусловлены такими факторами, как характеристики конструкционных материалов, качество исполнения, условия эксплуатации, наличие смазочных средств и др. В то же время во многих отраслях техники сегодня находят применение перспективные разработки аналогичных устройств, в основу которых заложено использование магнитных жидкостей в качестве альтернативных смазочных материалов, эффективно снижающих трение [2]. Имеющийся опыт может и должен быть внедрен для использования в машинах и аппаратах текстильного отделочного производства. Магнитожидкостные подшипниковые узлы и уплотнения лишены ряда недостатков традиционных устройств, что связано с отсутствием трения и обусловленного этим явлением износа трущихся деталей. На рис. 1 приведена принципиальная схема такого подшипника, где 1 – постоянный магнит; 2 – магнитная жидкость; 3 – шарик в сепараторе; 4 – наружное кольцо сепаратора; 5 – внутреннее кольцо сепаратора.

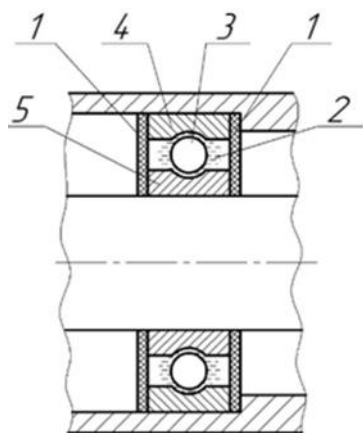


Рис. 1

Суть работы данного устройства заключается в том, что в качестве смазывающей среды используется магнитная жидкость, которая при наличии внешнего магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, непрерывно обеспечивает наличие смазки между трущимися деталями. Внедрение магнитожидкостных устройств имеет огромные перспективы, однако для обеспечения надежности и долговечности новых устройств необходимо решить важнейшую задачу, связанную с поддержанием стабильности состояния самой магнитной жидкости. В процессе создания новых и модернизации существующих уплотнений, использующих МЖ в качестве рабочего тела, возникает проблема прогнозирования ресурса работы самих устройств в целом. Так как ресурс работы рабочей среды является определяющим, то теоретические и экспериментальные методы исследований процессов структурообразования и устойчивости магнитной жидкости как системы представляют особый интерес и являются актуальной задачей.

Цель настоящей работы заключалась в теоретическом обосновании обеспечения стабильности магнитных жидкостей. В Ивановской пожарно-спасательной академии на протяжении ряда лет проводятся работы по созданию магнитных жидкостей и их использованию в узлах и механизмах специальной техники широкого назначения. Понимание процессов устойчивости магнитожидкостных дисперсий необходимо для выбора способа их стабилизации, что обеспечит надежную и пролонгированную эксплуатацию уплотнений и подшипниковых узлов, работающих в суровых условиях. Следует отметить, что данные вопросы начали рассматриваться некоторое время тому назад, что, в частности, нашло отражение в диссертационной работе [3], где был заложен научный подход к решению проблемы устойчивости магнитных жидкостей. Научный прогресс в области использования магнитных жидкостей требует некоторого переосмысления и доработки имеющихся идей. От стабильности магнитных смазочных сред зависит продолжитель-

ность жизненного цикла устройства в целом, будь то уплотнение или подшипник. При этом надо особо обращать внимание на условия эксплуатации указанных устройств.

Для решения поставленной задачи абстрагируемся от того, что практически все магнитные жидкости представляют собой коллоидную систему, состоящую из частиц ферромагнитных материалов и рабочей жидкости, в качестве которой сегодня используют воду, полярные и неполярные органические растворители и высокомолекулярные соединения. Магнитные жидкости, в которых средний размер коллоидных частиц составляет от 5 нм до 10 мкм, обладают устойчивостью в течение 5 лет при сохранении высоких показателей намагниченности и хорошей текучести.

Учитывая, что это утверждение является общей усредненной характеристикой всех магнитных жидкостей и не затрагивает нюансов и проблем эксплуатации вполне конкретных систем, считаем необходимым рассмотреть подробно существующие методы исследований свойств коллоидных систем и обеспечения их устойчивости.

Известно, что структура и устойчивость МЖ зависит от технологии приготовления соответствующей коллоидной системы [4]. По этой причине будет безуспешной попытка разработать общую теорию структурирования и устойчивости, охватывающую физико-химические и технологические факторы. Поэтому необходимо рассмотреть достаточно характерные и практически важные случаи устойчивости МЖ как коллоидной системы.

Прежде чем обсуждать методы исследования устойчивости МЖ, имеет смысл определиться с содержанием самого термина "устойчивость". Следует помнить, что в любом случае понятие "устойчивость" не является абсолютным и его содержание определяется относительно условий, ставящихся в конкретных задачах.

Устойчивость дисперсной коллоидной системы характеризуется неизменностью во времени ее основных параметров: дисперсности и равновесного распределения дисперсной фазы в дисперсной среде. Применительно к МЖ, используемой в комби-

нированном МЖУ, считается, что она технически устойчива, если изменения ее параметров не влекут за собой выхода из строя комбинированного МЖУ или не вызывают существенного изменения эксплуатационных параметров устройства.

К числу фундаментальных относятся понятия седиментационной (кинетической) и агрегативной устойчивости [5]. Седиментационной называется устойчивость дисперсной фазы к внешним градиентным полям. Агрегативная устойчивость – способность системы к сохранению дисперсности и индивидуальности частиц дисперсной фазы. Следует отметить, что при определенных условиях может существовать связь между обоими видами устойчивости, за счет которой обеспечивается стабилизация системы в целом. Если концентрация дисперсной фазы достаточно большая, то вследствие агрегативной устойчивости в системе образуется непрерывная структура, фиксирующая частицы и обеспечивающая седиментационную устойчивость дисперсной системы в статических условиях [6].

Прежде чем сформулировать критерии устойчивости системы в статических и динамических условиях, следует отметить предложенный ранее метод изучения взаимодействия между частицами коллоида для характеристики его устойчивости [7].

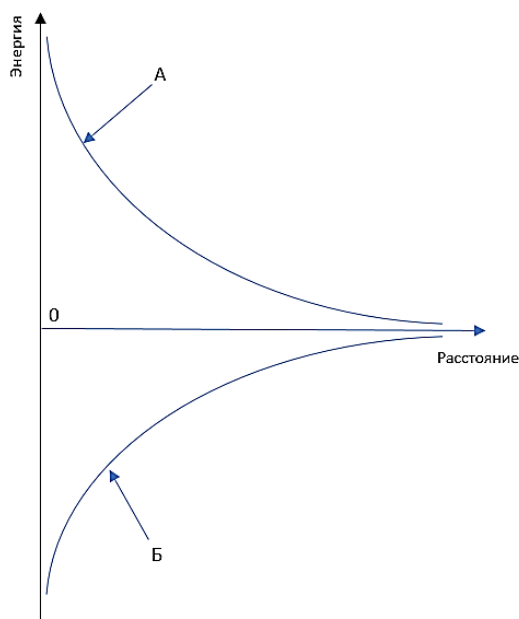


Рис. 2

Этот метод состоит в расчете и вычерчивании потенциальных кривых, представляющих потенциальную энергию как функцию расстояния между двумя коллоидными частицами. В общем виде без привязки к конкретным значениям процессы "отталкивание – притяжение" представлены на рис.2 в виде кривых А и Б (А – отталкивание; Б – притяжение).

Реальные результирующие кривые взаимодействия могут иметь различные виды, которые определяются конкретной формой кривых отталкивания и притяжения. Соотношение между потенциальной энергией частиц определяет свойства дисперсной системы, в том числе возможность и время ее существования [3].

Теория устойчивости коллоидов, основанная на этих идеях, получившая название "теория ДЛФО", разработана Дерягиным и Ландау [7] и дополнена Фервем и Овербеком. На теории ДЛФО основаны представления о том, как происходит необратимая коагуляция коллоидных частиц, если они сближаются настолько медленно, что их кинетической энергией можно пренебречь по сравнению с энергией взаимодействия.

Однако допущение, что условие наступления коагуляции не зависит от кинетической энергии частиц, становится некорректным при рассмотрении коагуляции частиц в динамических условиях. А именно в таких условиях, как правило, эксплуатируется МЖ в комбинированных МЖУ. Применительно к магнитной жидкости, эксплуатируемой в динамических условиях, эту теорию необходимо расширить до учета динамических эффектов. Критерий коагуляции в динамических условиях представлен в работе [8] и рассчитывается по формуле:

$$R_{e0} = \frac{\rho R_0 V_0}{\eta} > R_{exp0} = \frac{9}{4} \ln \left(\frac{12h_0 A_0}{A_*} \right) \div \sqrt{\frac{3h_0 \rho}{\pi \eta^2}} \ln \left(\frac{12A_0}{\chi A_*} \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность вещества частицы; R_0 – радиус частицы, которая предполагается сферической; V_0 – скорость сближения двух частиц; η – вязкость дисперсной среды;

h_0 – расстояние между частицами в начальный момент времени; A_* , A_0 – константы частиц Гамакера; χ – обратный дебаевский радиус, определяется в первую очередь гидродинамикой вязкой дисперсной среды между поверхностями частиц. Поэтому существенное значение приобретает фактор формы поверхностей частиц, т. е. для анизотричных частиц потеря агрегативной устойчивости в динамических условиях более вероятна, как, впрочем, и слипание частиц участками с наименьшей кривизной.

Эта гипотеза основана на предположении, что фактором, предотвращающим слипание частиц после любого соударения, является двойная электрическая сила (электростатический потенциал поверхностей частиц).

В то же время наиболее мощным фактором стабилизации в дисперсных системах, в том числе и в динамических условиях, является структурно-механический фактор. В соответствии с представлениями Ребиндера [8] агрегативная устойчивость дисперсных систем, стабилизированных поверхностно-активным веществом (ПАВ), в статических условиях обеспечивается высокой вязкостью и механической прочностью слоя ПАВ и лиофильностью его наружной части.

В динамических условиях потеря устойчивости может обеспечиваться тремя возможными процессами:

1) процессами, протекающими в адсорбционном слое при соприкосновении частиц по лиофобным участкам при наличии лиофильно-лиофобной мозаичности частиц, а также при столкновении частиц при полном покрытии их поверхности слоем ПАВ;

2) процессом вытеснения молекул ПАВ из зазора между частицами, т. е. выдавливанием слоя ПАВ;

3) процессом деформации слоя ПАВ. На основании результатов, представленных в работе [5], показано, что при выполнении условия, приведенного в формуле (2), процесс упругой деформации слоя ПАВ является более энергетически выгодным, чем процесс вытеснения молекул ПАВ:

$$V_0 = \frac{E_{пав} \delta^2}{\Pi_{пав} R_i}, \quad (2)$$

где V_0 – скорость сближения частиц; $E_{ПAB}$ – модуль упругости адсорбционного слоя ПАВ; δ – толщина адсорбционного слоя ПАВ; $\Pi_{ПAB}$ – вязкость адсорбционного слоя ПАВ; R_i – минимальный радиус кривизны одной из рассматриваемых частиц.

Следовательно, если в статических условиях при столкновении частиц, покрытых слоями ПАВ, важную роль играют процессы десорбции молекул адсорбционных слоев и их взаимопроникновения, то в динамических условиях адсорбционный слой ведет себя как чисто упругий. Тогда, если при столкновении частиц максимальное напряжение, развивающееся в слоях, сравнимо с критическим значением, т. е. с прочностью слоя, то слой будет "пробит" [9]. Используемый здесь термин "пробой слоя" условен. Потеря агрегативной устойчивости системы происходит при развитии в каком-либо ее слое напряжений, превышающих критические, или деформации, сравнимой с его толщиной. Можно считать это условие достаточным, что, однако, требует дополнительного обсуждения, так как при выполнении этого условия интенсифицируется ряд процессов, облегчающих коагуляцию: усиливается вероятность отрыва молекул ПАВ от поверхности частиц, становится возможным более тесное сближение этих поверхностей, т. е. начинают действовать поверхностные силы притяжения, чему ранее препятствовал слой ПАВ. В результате этих явлений в динамических условиях происходит активная лиофобизация поверхностей частиц, лиофильных в статических условиях.

Тогда критерий коагуляции можно записать в виде формулы [10]:

$$\Delta E_k > \Delta E_{ei} + \Delta E_{di}, \quad (3)$$

где ΔE_k – кинетическая энергия, сообщаемая частицам внешним источником; ΔE_{di} – упругая энергия, которую может запасти слой при деформации, сравнимой с его толщиной; ΔE_{ei} – энергия, диссипируемая за счет вязкого трения при сближении поверхностей.

При решении задачи теоретического определения устойчивости МЖ существен-

ным является вопрос о взаимодействии коллоидных частиц. Магнитные материалы, как правило, являются лиофобными, что приводит к большому избытку свободной энергии на поверхности раздела фаз. Кроме того, между частицами существует диполь-дипольное взаимодействие, зависящее от величины и ориентации магнитных моментов частиц. Все эти факторы способствуют агрегатированию частиц, которое приводит либо к нарушению седиментационной устойчивости, либо к изменению механических свойств системы и характера ее устойчивости, так как роль диффузионных потоков при этом падает.

Сложность рассматриваемой системы и актуальность поставленной задачи породили различные теории, которые описывают свойства магнитной жидкости и достаточно универсальные критерии и принципы устойчивости. Созданные теории можно условно поделить на две большие группы: фундаментальные и наглядно-прикладные. К фундаментальным можно отнести теории, оперирующие понятиями равновесной и неравновесной термодинамики и статической физики. К наглядно-прикладным – теории, которые используют различные модификации уравнений, по форме являющиеся уравнениями Фокера-Планка с различными граничными условиями.

Прежде всего следует отметить, что до сих пор не проведено полного исследования условий термодинамической устойчивости даже для однокомпонентной намагничивающейся среды. Однако была предпринята попытка, которая привела к термодинамической, механической, магнитной, диффузионной устойчивости при соблюдении соотношений, записанных в виде формул:

$$T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_{V,H,C_\alpha} > 0, \quad (4)$$

$$T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_{p,H,C_\alpha} > 0, \quad (5)$$

$$T \left(\frac{\partial S^0}{\partial T} \right)_{p^0,C_\alpha} > 0, \quad (6)$$

$$T \left(\frac{\partial S^0}{\partial T} \right)_{V,C_\alpha} > 0, \quad (7)$$

$$\partial \rho / \partial V < 0, \quad (8)$$

$$\partial \rho / \partial^0 V < 0, \quad (9)$$

$$\partial B / \partial H < 0, \quad (10)$$

$$\phi_{\alpha\beta} \delta C_{\beta} \delta C_{\alpha} > 0, \quad (11)$$

$$\left(\frac{\partial \phi^0(T, p, C_{\dots} C_n)}{\partial C_{\beta}} \right)_{T, p^0} \delta C_{\alpha} \delta C_{\beta} > 0, \quad (12)$$

где C_{α}, C_{β} – массовая концентрация компонентов; S, S^0 – энтропия системы в поле и без поля; ρ – плотность среды; V – удельный объем; T – абсолютная температура; P – давление; B, H – магнитная индукция и напряженность магнитного поля ($B = \mu H$, где μ – магнитная постоянная среды); $\phi_{\alpha} \phi^{\mu}$ – парциальные химические потенциалы.

Условия диффузионной устойчивости необходимо анализировать с привлечением равенств, являющихся следствием уравнения Гиббса-Дюгема [8], которые выполняются для среды в отсутствие поля:

$$\varphi_{\alpha\beta} = \varphi_{\beta\alpha} \left(\frac{\partial \phi_{\alpha}}{\partial C_{\beta}} \right)_{T, p, B, V} = \left(\frac{\partial \phi_{\beta}}{\partial C_{\alpha}} \right)_{T, p, B, V}. \quad (13)$$

Если среда термодинамически устойчива в отсутствие магнитного поля и выполняются неравенства (14)...(16), то магнитное поле способствует термодинамической и механической устойчивости среды:

$$\int_0^H \frac{\partial^2 \mu}{\partial T^2} H dH \geq 0, \quad (14)$$

$$\int_0^H \frac{\partial^2 \mu}{\partial p^2} H dH \leq 0, \quad (15)$$

$$\mu + \frac{d\mu}{dH} H > 0. \quad (16)$$

Упомянутые результаты обладают достаточной общностью, но для их практического применения необходимы измерение и расчет целого ряда параметров, поэтому для практических целей или используют упрощенные модели, или прибегают к прямому измерению устойчивости.

Наверное, самые простые (но и самые грубые) оценки устойчивости МЖ можно сделать по следующим результатам:

- для обеспечения устойчивости к седиментационному расслоению во внешнем неоднородном магнитном поле:

$$d \leq \left(\frac{6kT}{\pi\mu_0 M H} \right)^{1/2}, \quad (17)$$

- для предотвращения слипания спонтанно намагниченных частиц:

$$d \leq \left(\frac{144kT}{\pi\mu_0 M^2} \right)^{1/3}, \quad (18)$$

где d – диаметр частиц; k – постоянная Больцмана; M – намагниченность вещества частиц; H – напряженность магнитного поля; μ_0 – магнитная проницаемость.

Теоретические исследования свойств магнитной жидкости представляют работы по второму направлению, которое основано на методах статистической физики. Целью работ, связанных с термодинамическими величинами, которые могут быть измерены экспериментально, является вычисление функции распределения и корреляционных функций.

Для закрытой системы, содержащей фиксированное число частиц, равновесное распределение задают при условии, когда функция распределения пропорциональна больцмановскому множителю с гамильтонианом и содержит сумму импульсов частиц и конфигурационную энергию. В связи с этим конфигурационная энергия зависит от ориентации и положения частиц. В силу того, что мы имеем дело с независимыми импульсами, важным моментом является определение конфигурационной энергии. Выбор потенциала взаимодействия частиц, через который определяется конфигурационная энергия, объясняется наличием большого количества выдвигаемых теорий.

Нельзя оставить без внимания и тот факт, что широкое распространение в теории магнитной жидкости получили модели невзаимодействующих диполей Ланжевена, а также модели, содержащие межчастичное взаимодействие, а именно модели Вейса, Онзангера и средне-сферического приближения (ССП). Подробный анализ моделей приведен в работе [10], где модель Вейса рассматривается с лоренцевым значением константы молекулярного поля $1/3$ с концентрацией $\varphi < 0,06$ в области сильных полей, что обеспечивает адекватность модели применительно к магнитным жидкостям. При этом следует отметить, что модель

Вейса предсказывает ненаблюдаемый эффект при $\varphi > 0$, в том числе и в слабых полях.

В сравнении с моделью Вейса главным недостатком модели Онзангера является существенное расхождение расчетных и экспериментальных данных, причем рассчитанная по этой модели начальная восприимчивость оказывается заниженной на 20...25%.

Наилучшее согласование расчетных и экспериментальных результатов для широкого диапазона температур и концентраций обеспечивает модель ССП. Расхождение между результатами расчета ССП и экспериментом не превышает 4...6%, при умеренных параметрах магнитодипольного взаимодействия $\lambda < 1$.

Использование методов машинного моделирования позволяет устранить различие между теориями. В таком случае конфигурационная энергия вычисляется точно и определяются вероятные макроскопические свойства самой модели. На сколько близки выбранная форма и величина конфигурационной энергии для реальных частиц, можно судить, сравнивая свойства реальной и моделированной на ЭВМ системы.

При исследовании больших систем в основу методов машинного моделирования положены методы молекулярной динамики (МК) и Монте-Карло (МК), в которых реализуется численное решение уравнений движений Ньютона для совокупности N молекул. Система выбирается для фиксированного количества частиц в объеме с известной энергией. Информация, получаемая о равновесных и динамических состояниях, отвечает последовательности состояний, соответствующих "реальному времени". При этом каждое из состояний встречается с вероятностью, пропорциональной больцмановскому множителю. Обычно определяется последовательность при фиксированных значениях количества частиц, объема и температуры [8, 9].

Рассмотренные методы применяются для исследования взаимодействий между ферромагнитными частицами на предмет образования кластеров и цепочек в МЖ при взаимодействии магнитного момента частицы с внешним полем. Это явление нахо-

дит подтверждение в работах Хансена [11], где однородно намагниченная сферическая частица в системе из N частиц представляется в виде суммы энергии диполь-дипольного взаимодействия и энергии сферического отталкивания. При этом в нулевом внешнем поле частицы образуют структуры с незамкнутыми контурами без какой-либо выделенной пространственной ориентации, что подтверждается результатами моделирования для частиц кобальта размером 15 нм. Образование длинных цепочек частиц, вытянутых вдоль направления поля, осуществляется за счет сильного однородного (порядка 1 Тл) поля.

Как показали исследования, проведенные тем же методом, образование кластеров приводит к появлению начальной восприимчивости магнитной жидкости типа Кюри-Вейса:

$$\chi = \frac{c}{(T-T_0)}, \quad (19)$$

где χ – магнитная восприимчивость МЖ; T – температура; T_0 – температура упорядоченная.

Однако, как показывает опыт, расчетные результаты, получаемые данным способом, несколько расходятся с практическими, что можно объяснить ланжевеновским характером намагничивания магнитной жидкости.

Проведенный анализ теоретических исследований устойчивости магнитных жидкостей позволяет заключить, что повышение надежности и увеличение срока службы магнитожидкостных подшипников и уплотнений машин обеспечивается поддержанием их седиментационной устойчивости.

Таким образом, стабильность распределения ферромагнитных частиц в растворителе должна достигаться путем правильного выбора обоих ключевых компонентов коллоидной магнитной жидкости с учетом рекомендаций и принципов, представленных в данной статье.

При отсутствии непосредственного контакта рабочих частей уплотнения именно стабильность магнитной жидкости будет определяющим фактором долговечности уплотнения [12].

Важным является индивидуальный подбор сенсibilизаторов с учетом особенностей каждой конкретной магнитной жидкости.

Следующий этап работы будет связан с экспериментальной проверкой выдвинутых предположений и оптимизацией состава магнитных жидкостей, применяемых в уплотнительных и подшипниковых узлах текстильного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Немтырева П.Ю. Подшипники скольжения и качения. Особенности конструкции и область их применения // Студенческий вестник. 2021. № 18-9(163). С. 16...17. – EDN CEAIHY.
2. Зубенко Е.В., Павлюк Р.В., Доронина Н.П., Федосов Д.Р. Использование магнитной жидкости при механической обработке деталей // Сельский механизатор. 2021. № 9. С. 51...53. – EDN TMMMLK.
3. Баусов А.М. Комбинированные магнито-жидкостные уплотнения подшипниковых узлов сельскохозяйственной техники: дис. ... д-ра техн. наук. М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2004.
4. Malkin A.Y., Isayev A.I. Rheology: concepts, methods, and applications. Elsevier, 2022.
5. Wagner N.J., Mewis J. (ed.). Theory and applications of colloidal suspension rheology. Cambridge University Press, 2021.
6. Suleimanov B.A., Veliyev E.F., Vishnyakov V. Nanocolloids for petroleum engineering: Fundamentals and practices. John Wiley & Sons, 2022.
7. Дерягин Б.В., Ландау Л.Ф. Теория устойчивости сильно заряженных лиофобных золь и слипания сильнозаряженных частиц в растворах электролитов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1945. Т. 15. С. 662...682.
8. Ребиндер П.А. Избранные труды. Т. 1 и 2. М.: Наука, 1978-1979.
9. Tiwari B.N., Thakur R.K. On stability of thermodynamic systems: a fluctuation theory perspective. Eur. Phys. J. Plus 138, 525 (2023).
10. Пиеничников А.Ф., Шлиомис М.И. Межчастичные взаимодействия в ферроколлоидах: границы применимости различных теоретических моделей // V Всесоюзное совещание по физике магнитных жидкостей: тез. докл. Пермь, 1990. С. 106...107.
11. Hansen J.P., McDonald J.R. Theory of Simple Liquids-Academic Press. London, 1976. 375 с.
12. Serantes D., Baldomir D. Nanoparticle size threshold for magnetic agglomeration and associated

hyperthermia performance // Nanomaterials. 2021. T. 11. №. 11. С. 2786.

REFERENCES

1. Nemtyreva P.Y. Sliding and rolling bearings. Design features and scope of their application // Student Bulletin. 2021. № 18-9(163). Pp. 16...17. – EDN CEAIHY.
2. Zubenko E.V., Pavlyuk R.V., Doronina N.P., Fedosov D.R. The use of magnetic fluid in the machining of parts // Rural mechanizer. 2021. No. 9. pp. 51...53. – EDN TMMMLK.
3. Bausov A.M. Kombinirovanny`e magnito-zhidkostny`e uplotneniya podshipnikovy`x uzlov sel`skhozyajstvennoj texniki: dis. ... Dr. Tech. Sci. M.: MSAU im. V.P. Goryachkina, 2004.
4. Malkin A.Y., Isayev A.I. Rheology: concepts, methods, and applications. Elsevier, 2022.
5. Wagner N. J., Mewis J. (ed.). Theory and applications of colloidal suspension rheology. Cambridge University Press, 2021.
6. Suleimanov B.A., Veliyev E.F., Vishnyakov V. Nanocolloids for petroleum engineering: Fundamentals and practices. John Wiley & Sons, 2022.
7. Deryagin B.V., Landau L.F. Theory of stability of highly charged lyophobic sols and adhesion of highly charged particles in electrolyte solutions // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 1945. Vol. 15. Pp. 662...682.
8. Rebinde P.A. Selected works. Vol. 1 and 2. M.: Nauka, 1978-1979.
9. Tiwari B.N., Thakur R.K. On stability of thermodynamic systems: a fluctuation theory perspective. Eur. Phys. J. Plus 138, 525 (2023).
10. Pshenichnikov A.F., Shliomis M.I. Interparticle interactions in ferrocloids: the limits of applicability of various theoretical models // V All-Union meeting on the physics of magnetic fluids. Perm, 1990, pp. 106...107.
11. Hansen J.P., McDonald J.R. The Theory of Simple Liquids-Academic Press. London, 1976. 375 с.
12. Serantes D., Baldomir D. Nanoparticle size threshold for magnetic agglomeration and associated hyperthermia performance // Nanomaterials. 2021. T. 11. №. 11. С. 2786.

Рекомендована кафедрой пожарной безопасности объектов защиты (в составе УНК "Государственный надзор") Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России. Поступила 12.11.24.