

<http://dx.doi.org/10.15589/evn20140108>

УДК 621.318

Р 15

IMPROVEMENT OF TECHNOGENIC SAFETY WHEN OPERATING THE EQUIPMENT WITH INCREASED RADIAL CLEARANCES

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ С УВЕЛИЧЕННЫМИ РАДИАЛЬНЫМИ ЗАЗОРАМИ

Oleksandr V. Radionov
ferrohydrodynamica@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1112-5146

Stanislav A. Kunikin

kunikin_s_a@rambler.ru

ORCID: 0000-0002-8773-8897

Svitlana A. Poliezhaieva

polijaeva@mail.ru

ORCID: 0000-0003-0379-489X

А. В. Радионов,

канд. техн. наук, ст. науч. сотр.¹;

С. А. Куникин,

канд. физ.-мат. наук, доц.²;

С. А. Полежаева,

инженер-исследователь³

¹Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

²North-Caucasian Federal University, Institute of Natural Sciences, Stavropol

³LLC «Ferrohydrodynamics», Mykolaiv

¹Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев;

²Северо-Кавказский федеральный университет, Институт естественных наук, г. Ставрополь;

³ООО «НПВП «Феррогидродинамика», г. Николаев

Abstract. The influence of the relaxation processes in the gap of the magnetic fluid seals on the environmental safety of enterprises has been discussed. It is noted that the constraining factor of the seals introduction is the lack of study of their efficiency for large values of the gap (up to 1.0 mm). For this purpose, it is necessary to create the magnetic fields with the induction of more than 2 T in the working area of the magnetic fluid seal. The aim of this work is to improve the environmental safety of the operating equipment by taking into account the influence of the relaxation processes in the technical magnetic colloids, the constituent particles size distribution and the features of the magnetization curves of these media for the reliability of the magnetic fluid seals. The structure formations in the magnetic fluid were studied experimentally on the basis of the particle size distribution and the features of the magnetization curves. It is concluded that the nanoparticles size in the stable magnetic fluid should not exceed 10 nm. At that either there should not be any particles with a diameter larger than 15 nm or their amount should not exceed 5% of the total number of particles. The coarse particles can be removed by centrifugation on various modes that allows adjusting their size within certain limits.

Keywords: magnetic fluid; magnetic fluid seal; colloid; magnetization curve; environmental safety.

Аннотация. Приведены результаты исследования релаксационных процессов при больших величинах зазора (до 1,0 мм) магнитожидкостных герметизаторов и их влияние на техногенную безопасность эксплуатации оборудования и экологическую безопасность предприятий. Структурные образования в магнитной жидкости экспериментально изучены на основе распределения частиц по размерам и особенностей кривых намагничивания. Рассмотрен пример снижения техногенного риска методом Файна–Кинни от применения магнитожидкостного герметизатора.

Ключевые слова: магнитная жидкость; магнитожидкостный герметизатор; коллоид; кривая намагниченности; экологическая безопасность.

Анотація. Наведено результати дослідження релаксаційних процесів при великих величинах зазору (до 1,0 мм) магніторідинних герметизаторів та їх впливу на техногенну безпеку експлуатації обладнання та екологічну безпеку підприємств. Структурні утворення в магнітній рідині експериментально вивчені на основі розподілу частинок за розмірами й особливостей кривих намагнічування. Розглянуто приклад зниження техногенного ризику методом Файна–Кінні від застосування магніторідинного герметизатора.

Ключові слова: магнітна рідина; магніторідинний герметизатор; колоїд; крива намагніченості; екологічна безпека.

REFERENCES

- [1] Belov S.A., Litvak V.V., Solod S.S. *Nadezhnost teploenergeticheskogo oborudovaniya TES* [Reliability of the TPP thermal power-generating equipment]. Tomsk, NTL Publ., 2008. 218 p.
- [2] Bykov A.A. O problemakh tekhnogennoho riska i bezopasnosti tekhnosfery [On the problems of the technology-related risk and the technosphere safety]. *Problemy analiza riska* [Problems of the risk analysis], 2012, vol. 9, no. 3, pp. 4–8.
- [3] Kazakov Yu.B., Morozov N.A., Stradomskiy Yu.I., Perminov S.M. *Germetizatory na osnove nanodispersnykh magnitnykh zhidkostey i ikh modelirovanie* [Seals on the basis of the nanodispersed magnetic fluids and their modeling]. Ivanovo, GOUVPO «Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina Publ., 2010. 184 p.
- [4] Kunikin S.A., Dikanskiy Yu.I. *Magnitnye kolloidy. Osobennosti funktsionalnykh zavisimostey magnitnoy vospriimchivosti*. [Magnetic colloids. Specific features of the functional dependences of the magnetic susceptibility]. Saarbrucken LAPLAMBERT Academic Publ., 2011. 151 p.
- [5] Kunikin S.A., Dikanskiy Yu.I. O temperaturnoy zavisimosti magnitnoy vospriimchivosti magnitnykh dispersnykh nanosistem [On the temperature dependence of the magnetic susceptibility of the magnetic dispersed nanosystems]. *ZhTF – JTP*, 2010, vol 80, issue 6, pp. 112–117.
- [6] Dikanskiy Yu.I., Balabanov K.A., Borisenko O.V., Kiselev V.V. Magnitnoe uporyadochenie v magnitnoy zhidkosti s kvazitverdymi agregatami [Magnetic ordering in the magnetic fluid with quasi-solid units]. *Magnitnaya gidrodinamika* [Magnetic hydrodynamics]. 1997, vol. 33, no 2, pp.243–245.
- [7] Gladkikh D.V., Dikanskiy Yu.I., Balabanov K.A., Radionov A.V. O vliyaniy strukturnoy organizatsii na relaksatsiyu magnitnogo momenta dispersnykh chastits v magnitnoy zhidkosti [On the influence of the structural organization on the relaxation of the magnetic moment of the dispersed particles in the magnetic fluid]. *ZhTF-JTP*, 2005, vol. 75, issue. 10, pp. 139–143.
- [8] Dikanskiy Yu.I., Gladkikh D.V., Kunikin S.A. O vozmozhnosti magnitnogo uporyadocheniya v kolloidnykh sistemakh odnodomennykh chastits [On the possibility of the magnetic ordering in the colloidal systems of the single-domain particles]. *III Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya «Fiziko-khimicheskie i prikladnye problemy magnitnykh dispersnykh nanosistem (15. 08. – 18.08.2011)* [III All-Russian Scientific Conference «Physical and chemical and applied problems of the magnetic dispersed nanosystems»]. Stavropol, 2011, pp. 240–246.
- [9] Radionov A.V., Podoltsev A.D., Zagorulko A.V. Konechno-elementnyy analiz magnitnogo polya i techeniya magnitnoy zhidkosti v aktivnoy zone magnitnozhidkostnogo germetizatora vrashchayushchegosya vala [Finite element analysis of the magnetic field and the flow of the magnetic fluid in the core of the magnetic fluid seal of the rotating shaft]. *Sb. Vibronadezhnost i germetichnost tsentrobeznykh mashin* [Vibroreliability and tightness of centrifugal machines], Sumy, 2011, pp. 77–87.
- [10] Radionov A.V., Podoltsev A.D. Magnitnozhidkostnye germetizatory kak sredstvo povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti tekhnologicheskogo oborudovaniya GES [Magnetic fluid seals as the means of improving the environmental safety of the HPP process equipment]. *Gidroenergetika Ukrainy* [Hydropower industry of Ukraine], 2014, no 2–3. pp. 58–62.
- [11] Radionov A.V. Opyt ekspluatatsii magnitnozhidkostnykh germetizatorov v promyshlennoy energetike [Experience in running the magnetic fluid seals in the power industry]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka* [Mining electromechanics and automation], 2011, issue. 87, pp. 134–138.
- [12] Rozentsveyg R. *Ferrogidrodinamika*. [Ferrohdrodynamics]. Moscow, Mir Publ., 1989, 357 p.
- [13] Tairova T.M. Metodolohichni zasady monitorynhu vyrobnychoho travmatyzmu (Methodological principles of the occupational injuries monitoring). 2014, 201 p. Available at: http://www.zerkalov.kiev.ua/sites/default/files/tairova_t_m_metodologichni_zasadi..._monografiya.pdf
- [14] Shets S.P. *Povyshenie iznosostoykosti podshipnikovyykh uzlov treniya mashin i mekhanizmov*. Aftoreferat Diss. [Increase the wear resistance of the friction units machinery. Author's abstract]. Bryansk, 2011. 36 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Современное состояние экологической безопасности основных отраслей промышленности Украины (нефтеперерабатывающей, горнодобывающей, химической и т. д.) характеризуется обострением ряда про-

блем, обусловленных прежде всего старением оборудования, что связано с недостаточностью средств, вкладываемых в его обновление. Последствия длительной эксплуатации изношенного оборудования проявляются в резком ухудшении техногенной

безопасности как составляющей части экологической безопасности по конечному результату влияния на окружающую среду и безопасную деятельность людей [1].

Несмотря на это, характерной тенденцией развития данных предприятий в настоящее время является стремление для повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции увеличить время работы между капитальными ремонтами до 2–3 лет без значительного снижения уровня экологической безопасности.

Стадии зарождения и развития аварийной ситуации протекают, как правило, скрытно и связаны с накоплением разрушительного потенциала. Об этом свидетельствует анализ крупных аварий последних десятилетий, многие из которых начинались с отказа вспомогательного, малозначительного элемента [2]. Один из основных источников опасности – уплотнительные системы [15]. Типичной причиной аварийной ситуации технологического оборудования являются две предпосылки – ошибка человека и отказ оборудования. Доля исходных предпосылок, вызванных ошибочными и несанкционированными действиями человека, составляет 50...80 %, тогда как технические предпосылки – 15...25 % [14]. Поэтому для поддержания техногенной безопасности эксплуатации оборудования необходимо исключить риски аварий уплотнительных систем.

Изучение обстоятельств аварийности и травматизма в этих отраслях показывает, что концепция безотказной работы технических систем и производственной безопасности должна рассматриваться

как составная часть техногенной и экологической безопасности. Промышленность, сконцентрировав в себе колоссальные запасы энергии и новых материалов, стала угрожать жизни и здоровью людей, а также окружающей среде. Считается, что ущерб от аварийности и травматизма достигает 10...15 % валового национального продукта промышленного развития государств, а экологическое загрязнение окружающей среды и несовершенная техника безопасности являются причиной преждевременной смерти 20...30 % мужчин и 10...20 % женщин. Несмотря на значительный прогресс в области герметологии и многообразии конструктивных решений, проблема обеспечения длительного безотказного функционирования уплотнений является чрезвычайно **актуальной**. Это связано с тем, что потенциальные возможности традиционных уплотнений (манжетных, сальниковых, торцевых, лабиринтных и других типов) в значительной степени исчерпали себя и обеспечить абсолютную герметичность не в состоянии.

Одним из возможных путей решения данной проблемы является применение нового типа уплотнений – магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ) [3, 13]. Типовая конструкция герметизатора, показанная рис. 1, *а*, содержит следующие основные элементы: постоянный магнит, полюсные наконечники и вращающийся вал, которые образуют замкнутую магнитную цепь. В рабочем зазоре между валом и наконечниками находится магнитная жидкость (МЖ), удерживаемая с помощью магнитных сил, зависящих от величины магнитного поля в зазоре.

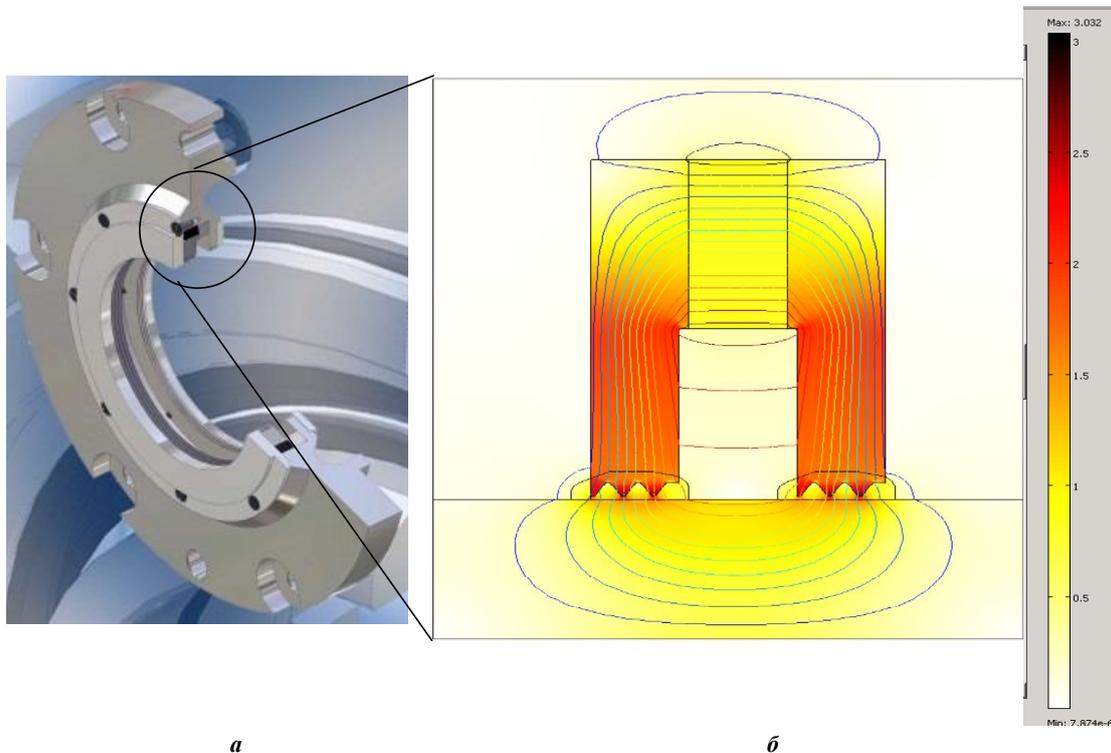


Рис. 1. Типовая конструкция МЖГ (*а*) и распределение силовых линий магнитного поля и магнитной индукции (в цвете) в его активной зоне (*б*)

Характер распределения магнитного поля в активной зоне МЖГ, полученный с помощью численного метода конечных элементов, показан на рис. 1, б.

Снижение риска аварий уплотнительных систем с МЖГ по сравнению с традиционными уплотнениями определяется практически полным предотвращением утечки герметизируемой среды, минимальным износом вследствие чисто жидкостного трения, низкими энергетическими потерями, высокой ремонтпригодностью, простотой технического обслуживания, работоспособностью в статике и динамике, самовосстановлением в случае аварийного прорыва уплотняемой среды [12].

Все техническое обслуживание МЖГ в период эксплуатации сводится к дозаправке магнитной жидкости один раз в 0,5...2,0 года (в зависимости от конструкции и условий эксплуатации), что минимизирует человеческий фактор и повышает безопасность обслуживающего персонала.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Сдерживающим фактором при оценке техногенной безопасности эксплуатации оборудования с МЖГ является неизученность работоспособности МЖГ при больших величинах рабочего зазора. Как правило, эта величина должна быть не более 0,20...0,25 мм [3]. В то же время анализ условий работы и состояния технологических установок показывает, что на практике этот параметр должен быть увеличен как минимум до 0,5...0,8 мм.

Это связано с изношенностью оборудования, для которого значения биения вала и несоосности поверхности значительно возрастают; с тяжелыми условиями эксплуатации (пыль, влага, абразив, повышенная вибрация и т. д.); большими диаметрами валов применяемых технических устройств (например, для двухрядных радиальных сферических роликоподшипников на диаметр 200...225 мм величина зазора составляет 0,22...0,29 мм, что уже больше оптимального рабочего зазора в МЖГ) [12].

Основные характеристики МЖГ определяются параметрами магнитного поля в рабочем зазоре и физическими свойствами (прежде всего седиментационной и агрегативной устойчивостью) находящейся в нем магнитной жидкости.

В настоящее время уровень развития вычислительной техники позволяет с достаточно высокой степенью точности определить распределение напряженности магнитного поля в зазоре [3, 10]. С определением долговечности и устойчивости МЖВ вопрос далеко не так однозначен.

В литературе практически отсутствуют данные о поведении магнитной жидкости в магнитных полях более 2 Тл, которые необходимо создавать в увеличенном зазоре МЖГ. В большой степени исследо-

ванными являются магнитные жидкости на основе керосина. Однако на практике применение получили жидкости на более вязких основах: минеральных маслах, кремнийорганических средах и т. д. Эффекты взаимодействия частиц в таких МЖ и их структурные свойства остаются до настоящего времени малоизученными.

Магнитная жидкость устойчива при отсутствии коагуляции и седиментации частиц. Для выполнения первого условия необходимо, чтобы сближение частиц вызвало проявление сил отталкивания между ними, что возможно при наличии на поверхности частиц защитного адсорбционного слоя, образованного молекулами поверхностно-активных веществ (ПАВ). Для исключения седиментации применяют два метода – измельчение суспензии магнетика до коллоидных размеров частиц или конденсацию атомарных или молекулярных частиц.

Важно, чтобы оба указанных условия выполнялись одновременно, т. е. защита частиц от коагуляции должна быть осуществлена в момент образования частиц.

Физические свойства концентрированных магнитных жидкостей во многом определяются межчастичными взаимодействиями. В сильно неоднородных магнитных полях возможно возникновение в магнитной жидкости необратимых концентрационных изменений, конечным результатом которых является расслоение жидкости.

Наличие в магнитном коллоиде агрегатов или крупных частиц может сыграть роль дестабилизатора, если МЖ подвергается длительному воздействию магнитных полей.

Поведение магнитной жидкости во внешних магнитных полях в значительной степени зависит от различных релаксационных процессов, протекающих на микроуровне. Механизм релаксации магнитного момента частицы – дебаевский (вращение магнитного момента частицы, жестко закрепленного в ней) и неелевский (вращение магнитного момента относительно твердой наночастицы) [8]. В общем случае процесс релаксации происходит одновременно и по дебаевскому, и по неелевскому механизмам, но один из них является преобладающим. Здесь также следует отметить, что макроскопические количества магнитной жидкости не являются монодисперсными: частицы магнетита имеют различный размер, но в абсолютном большинстве случаев эта полидисперсность характеризуется логнормальным распределением со средним размером порядка 10 нм. Известно [5], что в случае достаточно малого размера однодоменных частиц, составляющих магнитную жидкость, в них реализуется неелевский механизм релаксации магнитного момента. В случае коллоида с более крупными частицами (со средним диаметром более 10 нм) большая их часть может представлять собой жесткие

магнитные диполи. В таких коллоидах, согласно [9], при определенных условиях могут возникать агрегаты, сохраняющие магнитный момент. В этом случае на кривой намагничивания должна наблюдаться остаточная намагниченность МЖ, обусловленная затруднением переорганизации частиц после выключения поля.

Установлено, что для концентрированных коллоидов при определенной напряженности поля, хорошо коррелирующей с той, при которой они начинают анизотропно рассеивать свет, наблюдается излом кривой намагничивания [4]. Наличие этого излома авторы связывают с проявлением фазового расслоения МЖ.

В работе [6] отмечается, что возникновение намагниченных агрегатов возможно при длительном хранении магнитных жидкостей.

Исследование реологии МЖ позволяет получить общую информацию для анализа параметров МЖ, приготовленных по различной технологии, на различных компонентах при изменении магнитного поля, и представляют предварительные данные о МЖ, которые необходимо сравнить с аналогичными параметрами тех МЖ, которые обеспечивают наиболее высокую долговечность герметизатора.

Поскольку МЖ представляет собой сложную многофазную систему, управляемую внешним магнитным полем, которое воздействует на ферромагнитную фазу, магнитные свойства МЖ играют важнейшую роль в обеспечении ее работоспособности, определяя намагниченность жидкостей, а следовательно, и силы взаимодействия объемов жидкости с полем.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – повышение техногенной безопасности эксплуатации оборудования с повышенными радиальными зазорами путем применения МЖГ. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследование влияния на релаксационные процессы в технических магнитных коллоидах распределения составляющих их частиц по размерам и особенностям кривых намагничивания этих сред;
- исследование релаксационных процессов в рабочем зазоре МЖГ до 1,0 мм при сильно неоднородных магнитных полях;
- определение снижения техногенных, экологических рисков, аварийности и травматизма от применения МЖГ.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Наиболее эффективным экспериментальным способом изучения распределения частиц по размерам является применение электронной микроскопии. Исследования образцов магнитной жидкости были проведены на просвечивающем электроном микроскопе (ПЭМ) высокого разрешения Tecnai G2 F205-TWIN.

В качестве исходных образцов для исследования были выбраны магнитные жидкости на основе вакуумного масла VM-3, кремнийорганики ПЭС-3 и глицерина производства 2014 г. Кроме того, исследовались образцы магнитной жидкости на VM-3, изготовленные в 2002 г., и для исследования коллоида с более крупными частицами специально рассматривался образец на VM-3, не подвергавшийся центрифугированию. Все жидкости были получены в ООО «НПВП «Феррогидродинамика».

Для определения размеров частиц коллоидные растворы однодоменных частиц магнетита, стабилизированных олеиновой кислотой, разводились толуолом в соотношении 1:50. Далее растворы наносились каплями на углеродную сетку для исследования в ПЭМ при диапазоне увеличений $\times 700 \dots \times 450000$. Измерения и статистическая обработка их результатов проводились в метрологически сертифицированном программном обеспечении ImageScope.

Для измерения намагниченности МЖ в полях напряженностью от 0,1 до 900 кА/м, а также для определения намагниченности насыщения (одной из основных характеристик МЖ) использовался метод с применением вибрационного магнетометра фонеровского типа, аналогичный описанному в [4].

Вибрационный метод измерения намагниченности является относительным, поэтому для определения истинного значения намагниченности МЖ был использован эталонный образец никеля с известным магнитным моментом.

Схематическое устройство и принципиальная схема использованного вибрационного магнетометра приведены на рис. 2. Цилиндрический контейнер ($d = 0,5$; $l = 1,5$ см) 2 с исследуемой магнитной жидкостью укреплялся на тонком стержне из немагнитного материала, который соединялся с вибрационной системой и мог колебаться с заданной частотой перпендикулярно направлению магнитного поля, создаваемому электромагнитом 3. Контейнер с МЖ располагался между четырьмя одинаковыми измерительными катушками 1, которые неподвижно закреплялись на полюсах электромагнита типа ФЛ-1. Катушки были намотаны медным проводом диаметром $d = 0,06$ мм, содержали 7103 витков и соединялись попарно навстречу друг другу по схеме Маллинсона. Колебание штока с контейнером осуществлялось с помощью вибратора, питаемого звуковым генератором Tabor Electronics WW5061 на частоте 129 Гц. Амплитуда колебаний контролировалась вольтметром Instek GDM-8246 и поддерживалась постоянной по схеме обратной связи путем введения системы автоматической регулировки усиления (АРУ). Вибратор со штоком закреплялся на микрометрическом столике, с помощью которого контейнер с образцом МЖ устанавливался в нужном положении.

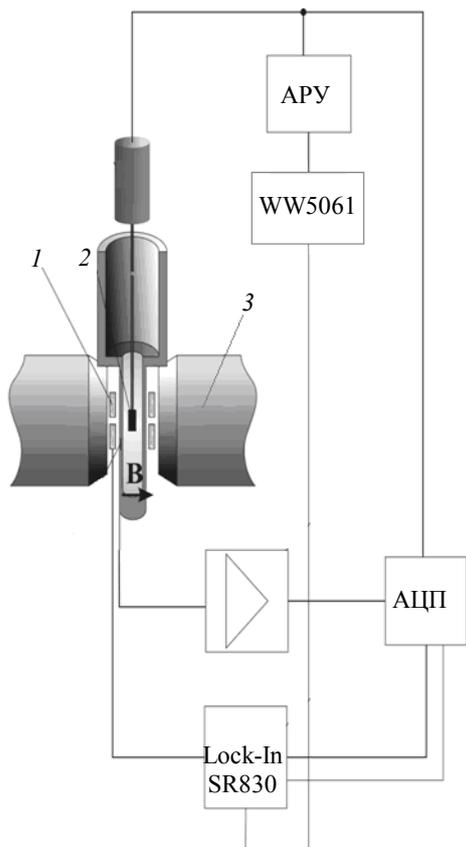


Рис. 2. Схема вибрационного магнетометра для исследования магнитных свойств магнитных жидкостей: 1 – измерительные катушки; 2 – контейнер с МЖ; 3 – электромагнит ФЛ-1

Напряжение, пропорциональное магнитному моменту образца, поступало с измерительных катушек 1 на вход фазового детектора Stanford Research SR830, имеющего большой коэффициент усиления и малые собственные шумы. Для уменьшения уровня шумов, наводимых в измерительной катушке, она соединялась с усилителем по дифференциальной схеме. Для более детального исследования линейного участка кривой намагничивания использовался баллистический метод.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены фотографии наночастиц магнетита (рис. 3,а – на основе глицерина и рис. 3,б – на основе вакуумного масла), а на рис. 4 – гистограммы распределения частиц магнитной жидкости по размерам. Из них видно, что средний размер частиц в пределах погрешности одинаков. Такое же распределение частиц было получено и для МЖ на основе полиэтилсилоксана ПЭС-3.

На рис. 5 приведены гистограммы для магнитных жидкостей на основе вакуумного масла (образец 4 – МЖ производства 2002 г., образец 5 – МЖ с частичным центрифугированием производства 2014 г.)

Из рис. 5 видно, что распределение частиц у образца 4 более чем за десятилетний срок хранения практически не изменилось. Средний размер частиц в пределах погрешности измерения аналогичен ранее рассмотренным образцам. Необходимо отметить, что количество более крупных частиц (диаметром от 14 нм и выше) значительно увеличилось, т. е за счет протекающих процессов коагуляции устойчивость понижается.

Образец \ Масштаб	20 нм	5 нм
	<i>а</i>	
<i>б</i>		

Рис. 3. Электронные фотографии наночастиц МЖ на основе: *а* – глицерина; *б* – вакуумного масла ВМ-3 (масштаб указан на фотографиях красной линией)

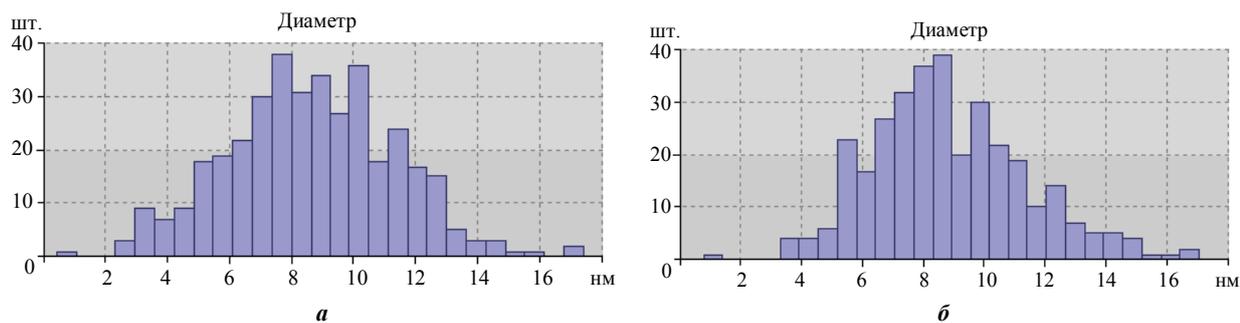


Рис. 4. Гистограмма распределения наночастиц по размерам в магнитной жидкости на основе: *a* – глицерина; *б* – вакуумного масла VM-3

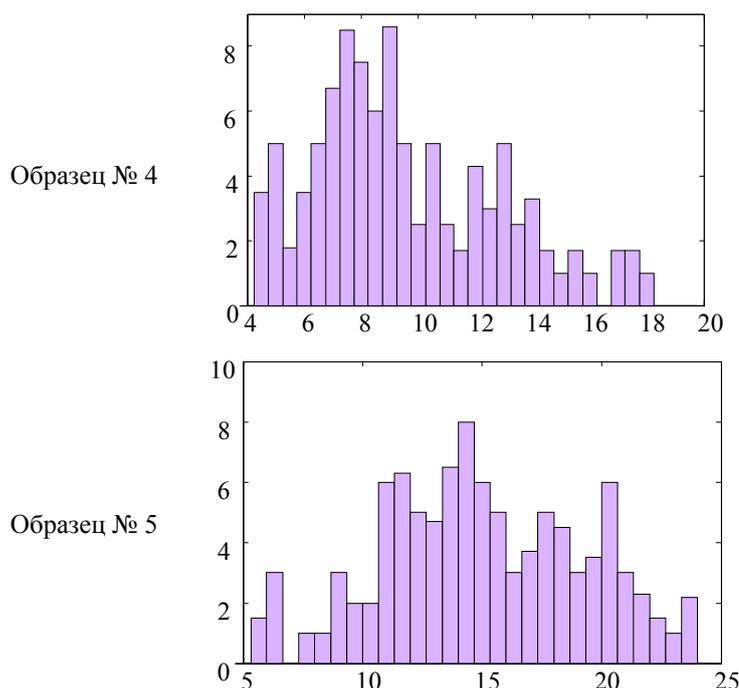


Рис. 5. Гистограмма распределения наночастиц магнитной жидкости на основе вакуумного масла

Однако только на основе результатов исследований на электронном микроскопе вывод о работоспособности МЖ сделать нельзя. Для относительно слабых магнитных полей такое распределение частиц может иметь и положительную сторону, так как основной вклад в намагничённость насыщения жидкости вносят именно крупные частицы вследствие их большого магнитного момента.

Результаты исследования образца № 5 подтвердили имеющийся в НПВП «Феррогидродинамика» опыт, что жидкости, не прошедшие полного центрифугирования, сохраняют свою устойчивость в течение максимум недели в резко неоднородных сильных МП [11, 12]. При этом необходимо отметить, что даже частицы с максимальным размером (24,6 нм) сохраняют однодоменную структуру. Если эту жидкость однозначно нельзя применять в зазоре МЖГ, то для других магнитожидкостных устройств это может быть достаточно приемлемым вариантом.

Кривые намагничивания для первых трех образцов (рис. 6–8) имеют классический характер, нет никаких изломов, экстремумов. Это в целом свидетельствует, что данные МЖ достаточно высокого качества и могут быть рекомендованы для применения в магнитожидкостных герметизаторах.

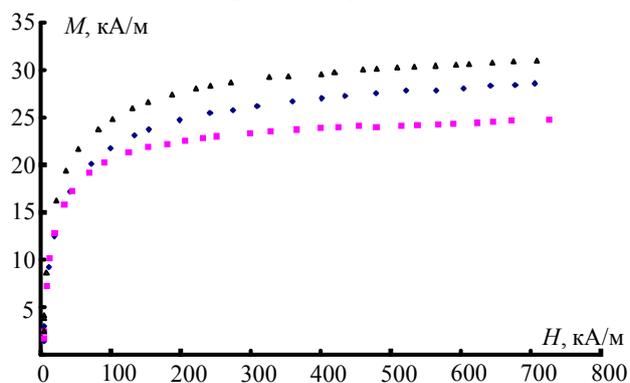


Рис. 6. Кривые намагничивания магнитных жидкостей на основе: ♦ – ПЭС-3; ■ – глицерина; Δ – VM-3

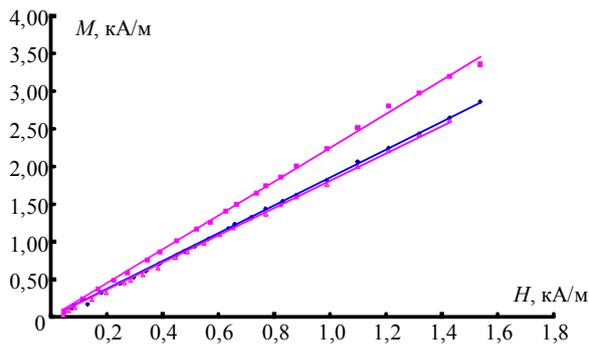


Рис. 7. Линейный участок кривых намагничивания магнитных жидкостей на основе: \blacklozenge – ПЭС-3; \blacksquare – VM-3; \blacktriangle – глицерина

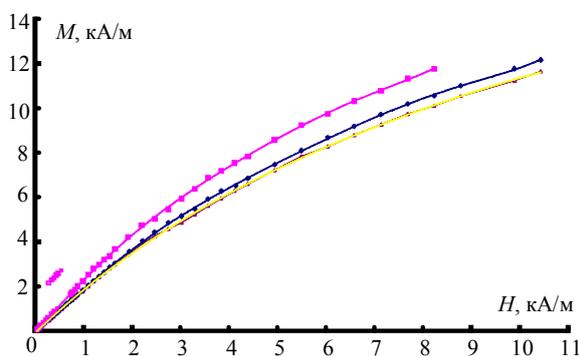


Рис. 8. Начальный участок кривых намагничивания магнитных жидкостей на основе: \blacklozenge – ПЭС-3; \blacksquare – VM-3; \blacktriangle – глицерина

К таким же выводам можно прийти после рассмотрения кривой намагничивания для образца 4. Данная жидкость после двенадцатилетнего хранения была процентрифугирована, и, как видно из рис. 9, кривые намагничивания совпали. Образец 5 отличается достаточно высокой намагниченностью. При этом кривая намагничивания не имеет гистерезисного характера, что говорит об отсутствии остаточной намагниченности и намагниченных агрегатов. Однако, исходя из среднего размера частиц, можно констатировать, что в рассматриваемой жидкости произошло образование цепочечных структур из связанных между собой дипольных частиц и вероятность расслоения такой жидкости в сильных магнитных полях достаточно высока.

Проведенные исследования показали возможность применения МЖ при величинах зазоров до 1 мм при наличии сильно неоднородных магнитных полей, что позволяет внедрить МЖГ вместо штатных уплотнений при описанных выше условиях эксплуатации.

Кратко рассмотрим снижение техногенного риска методом Файна–Кинни [7] для электродвигателя ВАО, служащего приводом насоса, перекачивающего раствор метилдиэтанолamina (МДЭА) при взрывопожароопасном производстве аммиака.

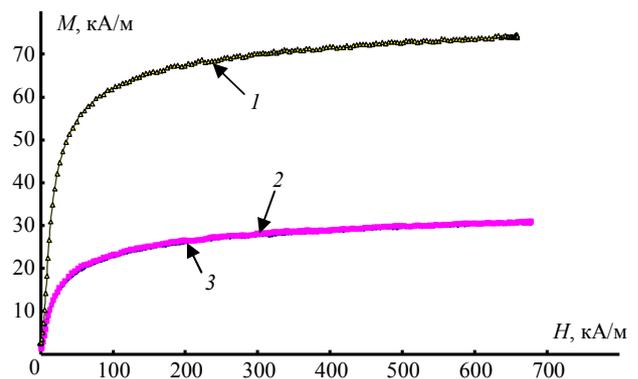


Рис. 9. Кривые намагничивания магнитной жидкости на основе VM-3: 1 – осадок от центрифугирования; 2 – жидкость до центрифугирования; 3 – жидкость после центрифугирования

Метод Файна–Кинни удобен тем, что позволяет выполнять оценку риска как всего производства, так и отдельного механизма. Риск R по данному методу вычисляется по формуле

$$R = P_1 \times P_2 \times S,$$

где P_1 – вероятность возникновения опасной ситуации; P_2 – вероятность того, что опасная ситуация приведет к нанесению вреда; S – тяжесть последствий.

Фактически величины, входящие в формулу, непрерывны, однако на практике используют их дискретные значения. Каждому фактору присваивают значения по шкале от 1 до 10 в соответствии с результатами оценки или априорной информацией из таблиц, приведенных, например, в источнике [7].

Величина риска R в результате может иметь значения от 1 до 1000.

Значения параметров P_1, P_2, S определяются исходя из требований, изложенных в таблицах метода Файна–Кинни, и результатов сравнительной эксплуатации МЖГ и лабиринтного уплотнения. Так, техногенный риск при работе электродвигателя с лабиринтным уплотнением составляет 24 единицы, что требует повышенного внимания к эксплуатации оборудования; при применении МЖГ техногенный риск составляет 12 единиц, что входит в графу приемлемого риска.

ВЫВОДЫ

1. Доказано, что применение магнитожидкостных герметизаторов является обоснованным направлением повышения техногенной безопасности оборудования при радиальных зазорах до 1 мм.
2. Выполненная оценка снижения техногенного риска при применении МЖГ в 2 раза ниже по сравнению с уровнем техногенного риска лабиринтных уплотнений.
3. Проведенный анализ подтвердил устойчивость магнитной жидкости в условиях резко неоднородного магнитного поля с индукцией в диапазоне более

2–3 Тл, которую необходимо создавать в рабочей зоне МЖГ при зазорах, превышающих 0,3 мм.

4. Доказано, что структурные образования в магнитной жидкости в сильных магнитных полях влияют на эксплуатационные характеристики и надежность МЖГ, от которых зависит экологическая безопасность эксплуатирующегося оборудования.

5. На основе изучения распределения частиц по размерам и особенностей кривых намагничивания сделан вывод, что размер наночастиц в устойчивой магнитной жидкости не должен превышать 10 нм, причем частицы диаметром более 15 нм либо должны отсутствовать, либо их количество должно составлять не более 5 % от обще-

го числа. Крупные частицы можно удалять путем центрифугирования при различных режимах, что в определенных пределах позволяет регулировать их размер.

6. Влияние структурного состояния МЖ на ее устойчивость может значительно изменяться при дополнительном действии сдвиговых деформаций и течений. Поэтому следующим этапом исследования должно быть изучение устойчивости магнитного потока при высоких линейных скоростях в рабочей зоне герметизатора, так как полученные результаты можно использовать при условии, что магнитные силы в зазоре герметизатора значительно превосходят центробежные.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Белов, С. А.** Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС [Текст] / С. А. Белов, В. В. Литвак, С. С. Солод. – Томск : Изд-во НТЛ, 2008. – 218 с.
- [2] **Быков, А. А.** О проблемах техногенного риска и безопасности техносферы [Текст] / А. А. Быков // Проблемы анализа риска. – 2012. – Т. 9, № 3. – С. 4–8.
- [3] Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование [Текст] / Ю. Б. Казаков, Н. А. Морозов, Ю. И. Страдомский, С. М. Перминов. – Иваново : ГОУВПО «Ивановский гос. энергет. ун-т им. В.И. Ленина», 2010. – 184 с.
- [4] **Куникин, С. А.** Магнитные коллоиды. Особенности функциональных зависимостей магнитной восприимчивости [Текст] / С. А. Куникин, Ю. И. Диканский. – Saarbrücken LAPLAMBERT Academic Publishing, 2011. – 151 с.
- [5] **Куникин С. А.** О температурной зависимости магнитной восприимчивости магнитных дисперсных наносистем [Текст] / С. А. Куникин, Ю.И. Диканский // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, вып. 6. – С. 112–117.
- [6] Магнитное упорядочение в магнитной жидкости с квазитвердыми агрегатами [Текст] / Ю. И. Диканский, К. А. Балабанов, О. В. Борисенко, В. В. Киселев // Магнитная гидродинамика. – 1997. – Т. 33. – № 2. – С. 243–245.
- [7] **Макдональд, Д.** Промышленная безопасность, оценка риска и системы аварийного останова [Текст] / Д. Макдональд. – М. : Группа ИДТ, 2007. – 409 с.
- [8] О влиянии структурной организации на релаксацию магнитного момента дисперсных частиц в магнитной жидкости [Текст] / Д. В. Гладких, Ю. И. Диканский, К. А. Балабанов, А. В. Радионов // ЖТФ. – 2005. – Т. 75, вып. 10. – С. 139–143.
- [9] О возможности магнитного упорядочения в коллоидных системах однодоменных частиц [Текст] / Ю. И. Диканский, Д. В. Гладких, С. А. Куникин [и др.] // III Всероссийская научная конференция «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем» : сб. науч. тр. – Ставрополь, 2011. – С. 240–246.
- [10] **Радионов, А. В.** Конечно-элементный анализ магнитного поля и течения магнитной жидкости в активной зоне магнитоожидкостного герметизатора вращающегося вала [Текст] / А. В. Радионов, А. Д. Подольцев, А. В. Загоруйко // Вибронадежность и герметичность центробежных машин. – Сумы, 2011. – С. 77–87.
- [11] **Радионов А. В.** Магнитоожидкостные герметизаторы как средство повышения экологической безопасности технологического оборудования ГЭС [Текст] / А. В. Радионов. А. Д. Подольцев // Гідроенергетика України. – 2014. – № 2–3. – С. 58–62.
- [12] **Радионов, А. В.** Опыт эксплуатации магнитоожидкостных герметизаторов в промышленной энергетике [Текст] / А. В. Радионов // Гірнична електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 87. – С. 134–138.
- [13] **Розенцвейг Р.** Феррогидродинамика [Текст] / Р. Розенцвейг. – М. : Мир, 1989. – 357 с.

- [14] **Таїрова, Т. М.** Методологічні засади моніторингу виробничого травматизму [Електронне видання] : монографія / Т. М. Таїрова. – К. : Основа, 2014. – Режим доступу: http://www.zerkalov.kiev.ua/sites/default/files/tairova_t_m._metodologichni_zasadi..._monografiya.pdf
- [15] **Шец, С. П.** Повышение износостойкости подшипниковых узлов трения машин и механизмов [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. / С. П. Шец. – Брянск, 2011. – 36 с.

© О. В. Радіонов, С. А. Кунікін, С. О. Полєжаєва

Надійшла до редколегії 25.12.13

Статтю рекомендує до друку

д-р техн. наук, проф. *А. П. Шевцов*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 1, 2014

