

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук

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

© Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., 2023

Магнитожидкостные уплотнения для герметизации газовых сред нашли широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря своим неоспоримым преимуществам. Тем не менее такие уплотнения пока не способны надежно герметизировать жидкие среды с различной полярностью. В работе проанализированы физико-химические процессы, которые приводят к разрушению магнитной жидкости в уплотнении под воздействием контактирующей с ней жидкой средой. Приведены результаты экспериментальных исследований процесса герметизации, базирующегося на использовании магнитных жидкостей на основе силоксанов и триэтанолamina, а также немагнитных жидкостей с различной полярностью. Сделан вывод, что для герметизации полярных жидких сред представляется перспективным использовать олеофобные магнитные жидкости, содержащие в большом количестве наполнитель в виде сильномагнитных частиц с дисперсностью 0,1...1 мкм. Показана необходимость того, чтобы магнитная жидкость имела как можно меньшую площадь контакта с герметизируемой жидкостью и сохраняла ламинарный режим течения.

Ключевые слова: магнитная жидкость, уплотнение, жидкая среда.

DOI: 10.46573/2658-5030-2023-3-25-32

ВВЕДЕНИЕ

Новый функциональный материал – магнитные жидкости – нашел широкое применение в технических устройствах, таких как разнообразные датчики механических величин, демпферы, магнитные подшипники [1–3]. В настоящее время для работы в газовых средах часто используют магнитожидкостные уплотнения (МЖУ) [4, 5]. Герметизация в них осуществляется «пробкой» из магнитной жидкости, удерживаемой магнитным полем. Очевидные преимущества МЖУ перед сальниками и резиновыми манжетами – долговечность, лучшая герметизирующая способность, отсутствие физического контакта с валом (отсутствие износа поверхностей), низкие потери энергии на внутреннее трение, простота обслуживания и значительное увеличение межремонтного периода. К недостаткам МЖУ следует отнести ограниченность рабочего температурного диапазона, а также проблемы, связанные с разрушением коллоидной структуры магнитной жидкости в сильных магнитных полях, испарение дисперсионной среды и высокий момент страгивания.

При использовании МЖУ можно осуществить герметизацию жидких сред, но практическая реализация этой задачи очень сложная [6–11] и в настоящий момент находится на стадии решения. Главным образом трудности связаны с быстрым разрушением магнитной герметизирующей среды в процессе работы уплотнения, со снижением величины пробивного давления, а также с недостаточным пониманием теоретических вопросов взаимодействия магнитной жидкости с герметизируемой средой.

Задача исследований заключалась в теоретическом анализе разрушения магнитной жидкости под действием герметизируемой жидкости и в экспериментальном поиске подходов к увеличению долговечности МЖУ, работающих в контакте с жидкой средой.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРИ КОНТАКТЕ МАГНИТНОЙ И НЕМАГНИТНОЙ ЖИДКОСТЕЙ

Проанализируем основные причины, приводящие к разрушению магнито-жидкостной «пробки» под действием омывающей ее жидкой среды, и на основании этого выявим требования к составу магнитной жидкости и конструкции уплотнения. Наиболее очевидной причиной потери герметичности МЖУ является размывание магнитной жидкости герметизируемой средой из-за их взаимной растворимости. Поэтому магнитная жидкость должна очень слабо растворяться в уплотняемой жидкости и не вступать с ней в химическое взаимодействие.

Взаимная растворимость жидкостей определяется соотношением энергий взаимодействия однородных и разнородных компонентов раствора. Если преобладающей является энергия взаимодействия одинаковых молекул, растворимость обычно невелика. Как правило, плохо растворяются друг в друге разнородные по физико-химическим свойствам вещества. Качественно предсказать растворимость неэлектролитов можно на основании теории Дж. Гильдебранда, согласно которой растворимость веществ уменьшается и с увеличением разности их параметров растворимости: $\rho = (E / V)^{0,5}$, где E , V – удельная энергия испарения и мольный объем компонента соответственно. С примерами расчета параметра растворимости можно ознакомиться в справочнике под редакцией В.Б. Коган [13].

Эмпирическим способом установлено, что взаимная растворимость жидкостей чаще всего уменьшается с увеличением разности дипольных моментов их молекул. Если учитывать, что основной вклад в поляризацию жидких диэлектриков вносит ориентационная поляризация, об их растворимости можно качественно судить по диэлектрической проницаемости, которая легко определяется экспериментально.

В общем случае процесс растворения может протекать самопроизвольно, если изменение свободной энергии отрицательное: $\Delta G \sim \Delta H - T\Delta S$, где H – энтальпия, T – температура, S – энтропия. В рассматриваемых системах веществ, слабо изменяющих свой объем, $\Delta U \sim \Delta H$, где U – внутренняя энергия.

Для магнитных жидкостей часть внутренней энергии обусловлена магнитным диполь-дипольным взаимодействием частиц U_d . Если магнитная жидкость находится в однородном магнитном поле, то в процессе ее разбавления в основном будет происходить изменение расстояния между цепочками частиц, а расстояние между частицами в цепочке будет изменяться незначительно. Это объясняется действием сил отталкивания между цепочками. В результате при растворении инородных молекул изменение энергии магнито-статического взаимодействия будет $\Delta U_d < 0$, что приведет к снижению ΔU всей системы.

Число микросостояний частиц при растворении почти не изменится из-за того, что внешнее магнитное поле по-прежнему будет ограничивать их подвижность. Поэтому магнитное взаимодействие практически не влияет на величину энтропийного фактора $T\Delta S$. Из сказанного выше вытекает, что во внешнем однородном магнитном поле вероятность образования раствора может несколько увеличиваться.

По-другому растворение будет протекать в неоднородном магнитном поле. Различие магнитной энергии частиц в разных частях объема приводит к их перераспределению в соответствии с законом Больцмана. При разбавлении произойдет

увеличение магнитной энергии взаимодействия частиц U_d за счет того, что частицы вынуждены будут перейти в область с меньшей напряженностью магнитного поля. Это приведет к увеличению ΔU системы, а следовательно, к снижению вероятности образования раствора.

Однако даже если уплотняющая магнитная жидкость и уплотняемая жидкость взаимно нерастворимы, существует опасность нарушения герметизации из-за поверхностного разрушения магнитной жидкости. На наш взгляд, возможны два механизма такого разрушения. Первый проявляется тогда, когда энергия адгезии магнитной жидкости к уплотняемой жидкости выше энергии когезии магнитной жидкости. При этом условии энергетически выгодно образование на межфазной поверхности «растворитель – газ» пленки из магнитной жидкости. Оно приведет к тому, что циркулирующая уплотняющая жидкость постепенно размочит магнитную жидкость в уплотнении. Вероятность этого процесса тем выше, чем больше разность между поверхностным натяжением контактирующих жидкостей.

При перемещении магнитной жидкости во внешнее однородное магнитное поле на дисперсные частицы действует магнитный момент, стремящийся ориентировать их так, чтобы вектор намагниченности совпадал с направлением силовых линий. В структурированной подобным образом магнитной жидкости взаимодействие между частицами значительно выше, чем в изотропной, в которой магнитные моменты частиц разбросаны хаотично тепловым движением. Отсюда следует, что в магнитном поле энергия когезии у магнитной жидкости будет другой. В зависимости от ориентации поля по отношению к воображаемой поверхности разрыва когезия может быть как выше, чем без поля, так и ниже. При нормальной ориентации поля работа когезии выше, а при тангенциальной – ниже. Следует добавить, что некоторое воздействие магнитного поля происходит за счет изменения межмолекулярного взаимодействия [12, 13].

Для магнитной жидкости, находящейся в неоднородном магнитном поле (например, в уплотнении), пленочное разрушение затруднено также действием объемных магнитных сил, которые как бы увеличивают некоторую эффективную работу когезии.

Другой механизм разрушения уплотняющей магнитной жидкости может быть обусловлен образованием эмульсии из взаимонерастворимых уплотняемой жидкости и уплотняющей магнитной жидкости. Устойчивость эмульсий, а значит, и вероятность их образования зависят от величины межфазного поверхностного натяжения: чем оно меньше, тем выше устойчивость. Для снижения межфазного поверхностного натяжения используют эмульгирующие агенты, роль которых вполне могут играть ПАВ или дисперсные частицы, содержащиеся в магнитной жидкости.

Эмульгирование начинается после того, как течение жидкости перестает быть ламинарным и становится турбулентным. Возникающая при этом гидродинамическая неустойчивость поверхности магнитной жидкости сопровождается отрывом ее частиц и их уносом герметизируемой жидкостью. Скорость процесса эмульгирования зависит от следующих безразмерных критериев:

$$P_l / P_{lm}; H_l / H_{lm},$$

где P_l , H_l и P_{lm} , H_{lm} – плотность и вязкость соответственно магнитной жидкости и уплотняемой.

Плотность магнитной жидкости принимается равной условному значению, т.е.

$$P_{lm} = P_{o_{lm}} + F_{lm} / g,$$

где $P_{o_{lm}}$ – плотность магнитной жидкости как сложного вещества; F_{lm} – сила, действующая на единичный объем магнитной жидкости в магнитном поле уплотнения; g – ускорение силы тяжести.

В свою очередь:

$$F_{lm} \sim JH_m,$$

где J – намагниченность магнитной жидкости; H_m – максимальное поле в герметизируемом зазоре.

С уменьшением значения приведенных критериев снижается вероятность эмульгирования магнитной жидкости. Поэтому следует стремиться к повышению вязкости магнитной жидкости, ее плотности и намагниченности. Процесс эмульгирования, разумеется, зависит от конкретной конструкции уплотнения и от размеров последнего. Конструкция уплотнения должна быть такой, чтобы была минимальная площадь контакта магнитной жидкости с уплотняющей средой. Кроме того, геометрия уплотняемого зазора должна способствовать сохранению ламинарного течения жидкостей в широком диапазоне скоростей.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментально изучалась герметизирующая способность модернизированного радиального магнитоожидкостного подшипника скольжения [14–16]. Под этим понималась способность подшипника нормально работать в контакте с какой-либо жидкой средой и не пропускать ее через себя вдоль вала. Схема опытного подшипника и установки, на которой проводились эксперименты, показана на рисунке. Подшипниковый узел размещен в немагнитном корпусе 1 на станине 2. Корпус 1 подшипникового узла установлен на подшипник качения 12 и поэтому может вращаться относительно основания 2 для измерения момента трения M_T в магнитоожидкостном подшипнике скольжения и в уплотнении. Магнитоожидкостный подшипник состоит из магнитопровода 3, кольцевого постоянного магнита 4, магнитопровода с зубцами 5 (магнитоожидкостное уплотнение) и втулки 6 из бронзы. Нижний конец вала 8 из стали 45 закреплен во внутреннем кольце шарикоподшипника 9. Верхний конец вала соединен через муфту с электродвигателем. Герметизируемая жидкость размещается в рабочем объеме 10 корпуса 2 и сообщается с резервуаром 11, установленным на некоторой высоте для создания повышенного давления посредством трубопровода 14.

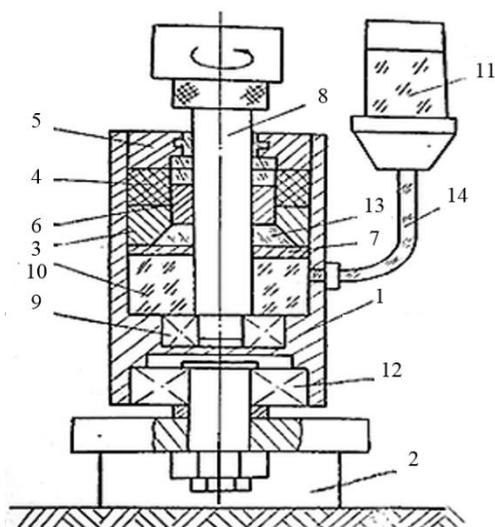


Схема экспериментальной установки

В приведенной конструкции подшипника (см. рисунок) магнитная жидкость непосредственно контактирует с герметизируемой жидкостью. Для уменьшения

площади контакта между магнитной и немагнитной жидкостями предусмотрено следующее конструктивное решение. К торцу магнитопровода 3 крепится немагнитная шайба 7. Между шайбой 7 и вращающимся валом 8 имеется минимально возможный зазор (менее 0,1 мм). Магнитное масло заполняет рабочий объем подшипникового узла и область 13 между магнитопроводом 3 и шайбой 7. Это снижает вероятность эмульгирования и скорость протекания диффузионных процессов взаимопроникновения жидкостей.

Магнитопровод с зубцами создает сильное магнитное поле в зазоре, отделяющем его от вала. Магнитная жидкость (масло), заполняющее зазор, компенсирует повышенное давление со стороны герметизируемой жидкости (по существу, магнитопровод, вал и магнитная жидкость составляют магнитожидкостные уплотнения).

В некоторых опытах испытывался подшипник, показанный на рисунке, в перевернутом виде, т.е. подшипник, в котором к герметизируемой жидкости был обращен магнитопровод 5. Вал, проходящий через подшипник, имел диаметр 14 мм, длина втулки равнялась диаметру вала, относительный зазор между валом и втулкой – $2 \cdot 10^{-3}$, а напряженность поля в этом месте составляла около $1,6 \cdot 10^5$ А/м. Зазор между зубцами и валом 0,2 мм, толщина зубцов 0,5 мм. Испытания проводили при скорости вращения вала 1 000 об/мин.

После периода приработки подшипника фиксировалось стабильное значение момента трения. Затем в рабочий объем 10 (см. рисунок) заливали жидкость и продолжали дальнейшие испытания. О проникновении жидкости судили по изменению момента трения, уровню жидкости в прозрачном резервуаре 11 и протеканию жидкости через зубцы магнитопровода 5. Испытания продолжали в течение 200 часов, если герметичность подшипника не нарушалась раньше.

Изучалась работа магнитожидкостного подшипника в контакте со слабополярными жидкостями: приборным маслом МВП, вазелиновым маслом и с сильно полярной жидкостью – водой.

Слабополярные жидкости имеют диэлектрическую проницаемость, составляющую менее 2...3, и поверхностное натяжение около 20...30 эрг/см². Для герметизации таких жидкостей была выбрана магнитная жидкость ММ-ТЭА с дисперсионной средой из триэтаноламина, который практически нерастворим в указанных углеводородных слабополярных жидкостях, имеет гораздо более высокое значение диэлектрической проницаемости (~110), а поверхностное натяжение приблизительно такое же. Если исходить из установленных механизмов разрушения герметизирующей магнитной жидкости, перечисленные свойства жидкости ММ-ТЭА позволяют выделить ее из ряда других.

Для герметизации воды были выбраны магнитные жидкости, содержащие в качестве основы силоксановые жидкости, которые не смешиваются с водой и являются гидрофобными (таблица).

Магнитные жидкости и их свойства

Магнитная жидкость	Дисперсионная среда	Вязкость, Па·с	Намагниченность, кА/м
ММ-ПЭС1	ПЭС-5	4,6	21
ММ-ФМ	ФМ-6	2,4	38
ММ-ПЭС2	ПЭС-5	15	195
ММ-ТЭА	ТЭА	1,2	31

Жидкость ММ-ПЭС1 (см. таблицу) отличается от ММ-ПЭС2 наличием в составе мелкодисперсного магнитного наполнителя, существенно повышающего ее намагниченность и вязкость. (Строго говоря, это не совсем магнитная жидкость, а скорее коллоидная система, напоминающая магнитореологическую жидкость.) Выбранные магнитные жидкости из-за высокой вязкости могут использоваться для смазки подшипников лишь в исключительных случаях. В связи с этим ими заполняли лишь уплотняющий зазор между валом и магнитопроводом с зубцами, а подшипник смазывали маловязкой магнитной жидкостью на основе ПЭС-В-2. Подшипник разворачивали так, чтобы уплотняющая магнитная жидкость была обращена в сторону воды. Около магнитопровода 5 (см. рисунок) устанавливалась такая же шайба, как и шайба 7. Для исключения перемешивания уплотняющей и смазочной жидкостей в подшипнике была установлена специальная перегородка. Как было ранее указано, испытания проводились при условиях, когда подшипник находился в контакте с ограниченным объемом непроточной жидкости. Когда герметизировалась вода, испытания проводились также при непрерывном протекании ее около подшипника. Для этого резервуар 11 подключался к водопроводной сети, а в полости 10 проделывалось сливное отверстие. Давление циркулирующей воды на подшипник не превышало 20 кПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Установлено, что магнитная жидкость ММ-ТЭА на основе триэтанолamina достаточно надежно герметизирует подшипник от проникновения слабополярных жидкостей при избыточном давлении 10 кПа и ниже.

Никаких объективных данных о снижении герметичности подшипника к концу испытаний получено не было. Сравнение ИК-спектров поглощения чистого вазелинового масла и проработавшего в контакте с магнитной жидкостью показало, что в последнем содержится незначительное количество триэтанолamina – около 10^{-2} %. Эта концентрация триэтанолamina, по-видимому, близка к предельной, поскольку в контакте с магнитной жидкостью находилось вазелиновое масло, превышающее ее по объему только в 10 раз.

При работе в непроточной воде с избыточным давлением 20 кПа все приведенные в таблице магнитные жидкости обеспечивали герметизацию в течение 200-часового цикла испытаний. Однако к концу испытаний в магнитных жидкостях ММ-ПЭС1 и ММ-ФМ происходили существенные необратимые изменения: увеличивалась вязкость, снижалась намагниченность. В проточной воде герметичность подшипника с этими жидкостями нарушается через несколько десятков часов. Негативное влияние воды на структуру указанных магнитных жидкостей не позволяет рекомендовать их для практического применения. Тем не менее вполне может быть, что если стабилизировать эти магнитные жидкости другим ПАВ (не на основе жирных кислот), то результат будет иным.

Магнитная жидкость ММ-ПЭС2 успешно выдержала все испытания, включая испытания в проточной воде при давлении 0,1 МПа. В процессе работы из магнитной жидкости вымывалась небольшая часть дисперсионной среды, других заметных изменений структуры не происходило. Более продолжительные испытания показали, что вымывание оставшейся части дисперсионной среды прекращается или существенно замедляется [17].

Недостатком магнитной жидкости ММ-ПЭС2 является ее высокая вязкость, особенно в магнитном поле. Поэтому уплотнения с этой жидкостью могут перегреваться из-за диссипативных потерь энергии на трение. Кроме того, наблюдается

аномально большой пусковой момент трения в уплотнениях с жидкостью ММ-ПЭС2, который является проявлением ее тиксотропной структуры.

Хорошая герметизирующая способность магнитной жидкости ММ-ПЭС2 объясняется ее особой структурой. Частицы супермелкого магнита совместно с более крупными частицами магнитного наполнителя образуют плотную упаковку с незначительной пористостью. Поры заполняются молекулами ПАВ-стабилизатора и дисперсионной среды. Герметизируемая вода не в состоянии разрушить магнитную жидкость механически из-за наличия в ней прочного каркаса из магнитных частиц. Вода может проникать через магнитную жидкость только по порам, но для этого требуется очень высокое давление. Не обязательно даже, чтобы поры были чем-либо заполнены, достаточно, чтобы стенки пор (частиц) были гидрофобны.

ВЫВОД

Таким образом, в настоящей работе была показана достаточно высокая герметизирующая способность магнитной жидкости ММ-ТЭА при контакте со слабополярными жидкими средами. Для герметизации полярных жидких сред представляется перспективным использовать олеофобные магнитные жидкости, содержащие в большом количестве наполнитель в виде магнитных частиц с дисперсностью, которая на 1...2 порядка более низкая, чем у частиц магнетита жидкости. Следует также обращать внимание на то, чтобы магнитная жидкость имела как можно меньшую площадь контакта с герметизируемой жидкостью и сохраняла ламинарный режим течения. Полученные результаты нашли практическое воплощение в конструкции магнитного шпиндельного узла для химического гомогенизатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов [и др.]. М.: Машиностроение. 1993. 272 с.
2. Фертман В.Е. Магнитные жидкости: справочное пособие. Минск: Вышэйш. шк. 1988. 184 с.
3. Болотов А.Н., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов в триботехнических системах: монография. Тверь: Тверской государственный технический университет. 2019. 164 с.
4. Сайкин М.С. Магнитожидкостные герметизаторы технологического оборудования. СПб.: Лань. 2017. 136 с.
5. Kole M., Khandekar S. Engineering applications of ferrofluids: A review // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2021. V. 537. P. 168222.
6. Федоров О.Л. Оценка ресурса магнитожидкостных уплотнений, контактирующих с жидкими средами // *XX юбилейная Всероссийская с международным участием Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям: Сборник научных трудов*. Иваново: ИГЭУ. 2022. С. 277–287.
7. Орлов Д.В., Федоров О.Л., Скроботова Т.В. Экспериментальное исследование ресурса магнитожидкостных уплотнений при герметизации жидких сред // *Магнитная гидродинамика*. 1989. № 4. С. 127–130.
8. Influence of viscosity and magnetoviscous effect on the performance of a magnetic fluid seal in a water environment / Z. Li [et al.] // *Tribology Transactions*. 2018. V. 61. № 2. P. 367–375.
9. The pressure loading process among stages of magnetic fluid seal in aqueous environment / Z. Wang [et al.] // *Tribology transactions*. 2019. V. 62. № 4. P. 650–657.
10. Matuszewski L., Szydło Z. Endurance testing of a rotating single-stage magnetic fluid seal for shipbuilding // *Polish Marine Research*. 2011. V. 18. № 2. P. 51–59.

11. Liu T., Cheng Y., Yang Z. Design optimization of seal structure for sealing liquid by magnetic fluids // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2005. V. 289. P. 411–414.
12. Зенгуил Э. Физика поверхности / пер. с англ. М.: Мир. 1990. 536 с.
13. Коган В.Б., Огородников С.К., Кафаров В.В. Справочник по растворимости. В 3 т. Л.: Академия наук СССР. 1970. Т. 1. 960 с.
14. Болотов А.Н. Триботехника магнитопассивных и магнитожидкостных подшипниковых опор скольжения. Дисс... докт. техн. наук. Москва. 1993. 555 с.
15. Bolotov A.N., Novikov V.V., Pavlov V.G. Magneto-liquid sliding bearings // *Journal of Friction and Wear*. 2004. V. 25. № 3. P. 286–291.
16. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Аналитическое моделирование взаимодействия постоянных магнитов из закритических материалов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 69–76.
17. Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Энергетические свойства поверхностей, смазанных магнитной наносмазкой // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 3 (15). С. 15–22.

Для цитирования: Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Герметизация с помощью магнитных жидкостей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 25–32.

SEALING WITH MAGNETIC FLUIDS

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc., G.B. BURDO, Dr. Sc.

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

Magnetofluidic seals for sealing gas media have found wide application in various industries due to their undeniable advantages. Nevertheless, such seals are not yet able to reliably seal liquid media with different polarities. The paper analyzes the physico-chemical processes that lead to the destruction of the magnetic fluid in the seal under the influence of the liquid medium in contact with it. The results of experimental studies of the sealing process based on the use of magnetic liquids based on siloxanes and triethanolamine, as well as non-magnetic liquids with different polarities are presented. It is concluded that for sealing polar liquid media, it seems promising to use oleophobic magnetic liquids containing a large amount of filler in the form of strong magnetic particles with a dispersion of 0.1...1 microns. It is shown that the magnetic fluid must have the smallest possible contact area with the sealed liquid and maintain the laminar flow regime.

Keywords: magnetic fluid, seal, liquid medium.

Поступила в редакцию/received: 31.03.2023; после рецензирования/revised: 14.04.2023;
принята/accepted: 21.04.2023