

УДК 621.321

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛОИДАЛЬНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТИ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ВАКУУМНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

И.М. АРЕФЬЕВ, Т.А. АРЕФЬЕВА, Ю.Б. КАЗАКОВ
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В силу того, что одними из основных показателей качества магнитных жидкостей являются их коллоидальная стабильность и термостабильность, которые определяют период времени работоспособности магнитной жидкости в вакуумных высокотемпературных магнитожидкостных уплотнениях, и ввиду отсутствия методики определения этих показателей, необходима их разработка, а также исследование свойств конкретных магнитных жидкостей.

Материалы и методы: С использованием метода замены несущей среды исследовались магнитные жидкости МКК 001-60, МКС 350-40 и МКУ 030-40.

Результаты: Разработаны методики определения коллоидальной стабильности и термостабильности магнитных жидкостей. На их основе исследована коллоидальная стабильность МЖ МКК 001-60, МКС 350-40 и МКУ 030-40 и термостабильность МЖ МКС 350-40 и МКУ 030-40.

Выводы: Магнитные жидкости МКС 350-40 и МКУ 030-40 перспективны для использования в магнитожидкостных уплотнениях энергетических устройств.

Ключевые слова: магнитная жидкость, коллоидальная стабильность, термостабильность, магнитожидкостное уплотнение.

RESEARCH OF COLLOIDAL STABILITY AND THERMOSTABILITY OF MAGNETIC LIQUIDS FOR VACUUM HIGH-TEMPERATURE MAGNETIC LIQUID SEALS OF POWER ENGINEERING DEVICES

I.M. AREFYEV, T.A. AREFYEVA, Yu.B. KAZAKOV
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: elmash@em.ispu.ru

Abstract

Background: The main indicators of magnetic liquids quality are their colloidal stability and thermostability. These indicators define the period of operation time for magnetic liquid in vacuum high-temperature magnetic liquid seals. Because of the absence of the techniques to define these values it is necessary to develop them and research the characteristics of specific magnetic liquids.

Materials and methods: Magnetic liquids MLK 001-60, MLS 350-40 and MLC 030-40 were researched by means of the method of a liquid-carrier replacement.

Results: Techniques for detection of colloidal stability and thermostability of magnetic liquids are developed. On the basis of the developed techniques colloidal stability of MLK 001-60, MLS 350-40 and MLC 030-40 and thermostability of MLS 350-40 and MLC 030-40 were researched.

Conclusions: Magnetic liquids MLS 350-40 and MLC 030-40 can be successfully used in magnetic fluid seals in engineering devices.

Key words: magnetic liquid, colloidal stability, thermostability, magnetic liquid seal.

Магнитные жидкости (МЖ) представляют собой коллоидные системы однодоменных магнитных частиц (дисперсная фаза), диспергированных в жидкости-носителе (дисперсионная среда) [1]. Сочетание свойств магнитного материала и жидкости, не встречающееся в известных природных материалах, открыло широкие перспективы для создания технических устройств с использованием магнитной жидкости в качестве рабочего тела. Эффективность инже-

нерного приложения магнитных жидкостей оценивается по достижению ими основных технических характеристик – намагниченности насыщения, вязкости, плотности, диапазона рабочих температур, вакуумных свойств и др. Однако главным критерием качества магнитной жидкости и возможности ее применения является коллоидальная стабильность МЖ. Прежде чем приступить к испытанию конкретных электромеханических устройств с использованием магнитных жид-

костей в реальных условиях их эксплуатации, необходимо определить, являются ли характеристики МЖ стабильными во времени при отсутствии воздействия со стороны внешних факторов.

В целях определения коллоидальной стабильности МЖ был использован метод замены несущей среды [2]. В синтезированную магнитную жидкость, для которой предварительно измеряются плотность, пластическая вязкость и намагниченность насыщения, добавляется коагулянт. В результате частицы дисперсной фазы, стабилизированные поверхностно-активным веществом (ПАВ), выпадают в осадок. Смесь жидкости-носителя и коагулянта над осадком сливается, после чего осадок несколько раз промывается коагулянт. После высушивания к осадку при перемешивании добавляется расчетное количество жидкости-носителя, при этом происходит повторная пептизация стабилизированного магнетита в жидкости-носителе с образованием магнитной жидкости. Вновь полученная магнитная жидкость центрифугируется, после чего для нее измеряются плотность, пластическая вязкость и намагниченность насыщения. Процедура коагуляция – повторная пептизация для исходной магнитной жидкости повторяется несколько раз. Если изменений плотности, пластической вязкости и намагниченности насыщения в допустимых пределах не наблюдается, синтезированная магнитная жидкость является коллоидально стабильной, т.е. способна сохранять свои характеристики во времени при отсутствии внешнего воздействия и готова к соответствующим испытаниям на стендах [3].

В качестве образцов исследования использовались МЖ на основе керосина (МКК 001-60), силоксановой жидкости (МКС 350-40) и синтетического углеводородного масла (МКУ 030-40). Данные магнитные жидкости обладают разными техническими характеристиками, что обуславливает их использование, например, в датчиках угла наклона (МКК 001-60), в магнитожидкостных уплотнениях (МКС 350-40), в демпферах и в качестве магнитных смазок (МКУ 030-40). Плотность МЖ измерялась по ГОСТ 18995.1-73. Пластическая вязкость – по ГОСТ 26581-85 на вискозиметре «Реотест-2». Намагниченность насыщения МЖ измерялась баллистическим методом.

Технические характеристики исходных магнитных жидкостей приведены в табл. 1.

Процедура коагуляция–пептизация МЖ проводилась 3 раза. Для вновь полученных магнитных жидкостей измерялись плотность, пластическая вязкость и намагниченность насыщения (табл. 2–4).

Согласно полученным данным, технические характеристики магнитных жидкостей МКК 001-60, МКС 350-40, МКУ 030-40 с разным объемным содержанием магнетита после первой, второй и третьей процедур коагуляции изменяются не более чем на ± 3 % относительно технических характеристик исходных МЖ. Экспе-

риментальные данные свидетельствуют о том, что синтезированные магнитные жидкости являются коллоидально стабильными, т.е. способны сохранять свои характеристики во времени при отсутствии внешнего воздействия (например, МЖ МКК 001-60 в закрытой таре сохраняет стабильность как минимум 15 лет). Следовательно, они могут подвергаться испытаниям в реальных условиях эксплуатации в конкретных электромеханических устройствах.

Таблица 1. Технические характеристики исходных магнитных жидкостей

Марка МЖ	Объемная доля магнетита, %	Намагниченность насыщения, кА/м	Плотность, г/см ³	Пластическая вязкость, Па·с
МКК 001-60	9,2	35	1,15	0,0015
МКК 001-60	21,6	82	1,70	0,02
МКС 350-40	4,7	18	1,19	0,66
МКС 350-40	9,7	37	1,40	1,63
МКУ 030-40	6,8	26	1,19	0,09
МКУ 030-40	11,8	45	1,41	0,35

Таблица 2. Технические характеристики магнитных жидкостей после первой коагуляции

Марка МЖ	Намагниченность насыщения, кА/м	Плотность, г/см ³	Пластическая вязкость, Па·с
МКК 001-60	34	1,12	0,0016
МКК 001-60	84	1,74	0,021
МКС 350-40	17	1,14	0,64
МКС 350-40	39	1,43	1,67
МКУ 030-40	26	1,17	0,09
МКУ 030-40	44	1,42	0,35

Таблица 3. Технические характеристики магнитных жидкостей после второй коагуляции

Марка МЖ	Намагниченность насыщения, кА/м	Плотность, г/см ³	Пластическая вязкость, Па·с
МКК 001-60	36	1,13	0,0016
МКК 001-60	81	1,72	0,02
МКС 350-40	17	1,16	0,64
МКС 350-40	38	1,42	1,65
МКУ 030-40	24	1,16	0,088
МКУ 030-40	45	1,40	0,34

Таблица 4. Технические характеристики магнитных жидкостей после третьей коагуляции

Марка МЖ	Намагниченность насыщения, кА/м	Плотность, г/см ³	Пластическая вязкость, Па·с
МКК 001-60	36	1,16	0,0015
МКК 001-60	81	1,71	0,0196
МКС 350-40	18	1,18	0,66
МКС 350-40	37	1,41	1,62
МКУ 030-40	25	1,17	0,092
МКУ 030-40	44	1,41	0,35

Метод замены несущей среды сравнительно прост, но весьма эффективен. При синтезе магнитной жидкости одной из ключевых стадий является стабилизация частиц дисперсной фазы поверхностно-активным веществом. Процесс является тонким и специфичным. Не исключено, что при синтезе МЖ стабилизация адсорбента пройдет не полностью. Не достаточно большой окажется энергия адсорбционного взаимодействия

молекул ПАВ с активными центрами на поверхности магнетита, что может быть вызвано энергетическими неоднородностями и дефектами поверхностного слоя частиц дисперсной фазы, не сто процентным будет покрытие слоем стабилизатора поверхности частиц дисперсной фазы и т.д. В этом случае при добавлении коагулянта к магнитной жидкости инициируется процесс десорбции (частичной или полной) молекул ПАВ с поверхности частиц. Как результат, в осадок выпадают частицы магнетита, частично или полностью лишенные защитных оболочек, а поверхностно-активное вещество удаляется вместе со сливаемой смесью коагулянта и жидкости-носителя. В случае, если поверхностно-активное вещество полностью десорбируется с поверхности магнетита при добавлении коагулянта (результат физической адсорбции молекул ПАВ), при добавлении расчетного количества жидкости-носителя магнитная жидкость не получается вовсе. В случае если поверхностно-активное вещество при добавлении коагулянта десорбируется с поверхности магнетита частично, при добавлении расчетного количества жидкости-носителя образуется магнитная жидкость, в которой объемная доля дисперсной фазы будет меньше первоначальной (осадок из частиц магнетита, лишенных защитных оболочек, отделяется после центрифугирования). Значения плотности, пластической вязкости и намагниченности насыщения такой магнитной жидкости будут отличаться от исходных. К тому же по незащищенным участкам на поверхности частиц магнетита начнут протекать процессы окисления и агрегации, а адсорбционные взаимодействия молекул ПАВ с активными центрами на поверхности, находящимися в непосредственной близости от незащищенных участков, будут ослабевать, т.е. с течением времени возможна десорбция. Все эти процессы невозможно остановить. Их разрушающее воздействие приводит к существенному изменению технических характеристик магнитных жидкостей в статике, что делает невозможным использование МЖ в устройствах, в которых под механическим воздействием, воздействием сильных магнитных полей, высоких и низких температур и т.д. все вышеописанные процессы протекают еще интенсивнее.

Одной из важнейших характеристик магнитных жидкостей, обуславливающей их использование в качестве рабочего тела, например, в магнитожидкостных уплотнениях, является диапазон рабочих температур. Диапазон температур эксплуатации МЖ обуславливается, с одной стороны, температурными характеристиками жидкостей-носителей, с другой – энергиями адсорбционных взаимодействий молекул поверхностно-активных веществ с активными центрами на поверхности частиц дисперсной фазы и средством ПАВ с жидкостью-носителем.

При длительном температурном воздействии в магнитных жидкостях могут протекать следующие процессы:

- десорбция молекул поверхностно-активных веществ с поверхности частиц дисперсной фазы с последующим объединением частиц в агрегаты и выпадением осадка, что приводит к расслоению магнитной жидкости;

- полимеризация как десорбированного поверхностно-активного вещества, так и жидкости-носителя;

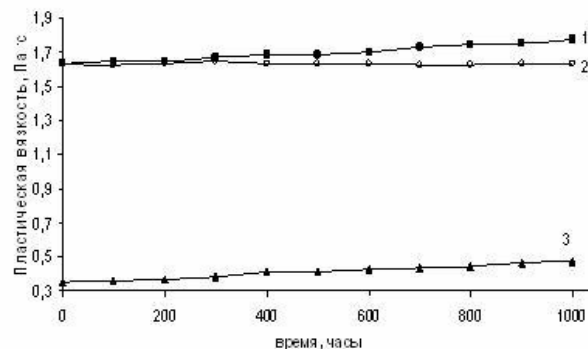
- термоокислительная деструкция жидкости-носителя, что приводит к изменению свойств самого носителя и, как следствие, к изменению свойств магнитной жидкости.

Все вышеуказанные процессы приводят к существенному изменению вязкости магнитных жидкостей. Поэтому вязкость является той характеристикой, по динамике изменения которой можно делать вывод о возможности эксплуатации МЖ при той или иной температуре в течение длительного промежутка времени [4].

Для изучения термостабильности были выбраны МЖ МКС 350-40 на основе вакуумной силиконовой жидкости с объемной долей магнетита 9,7 % и МКУ 030-40 на основе синтетического углеводородного масла с объемной долей магнетита 11,8 % (см. табл. 1).

Исследование проводилось при температурах 100 и 150 °С в течение 1000 ч при каждой температуре. При этом через каждые 100 ч для каждого из образцов магнитных жидкостей измерялась пластическая вязкость. Динамика изменения пластической вязкости при длительном температурном воздействии на магнитные жидкости МКС 350-40 и МКУ 030-40 показана на рисунке.

После длительной термообработки магнитные жидкости подвергались центрифугированию. Выпадения осадка из агрегированных частиц дисперсной фазы, полностью или частично лишенных защитных оболочек, не наблюдалось.



Динамика изменения пластической вязкости МЖ при длительном температурном воздействии: 1 – МКС 350-40, при $t = 150\text{ °C}$; 2 – МКС 350-40, при $t = 100\text{ °C}$; 3 – МКУ 030-40, при $t = 100\text{ °C}$

Это позволяет констатировать, что десорбции молекул поверхностно-активного вещества с поверхности частиц дисперсной фазы не происходит ни для одного из образцов магнитных жидкостей, ни при одной из температур.

Термоиспытания показали, что для магнитной жидкости МКС 350-40 пластическая вязкость практически не изменяется в течение 1000 ч термообработки при 100 °С. После 1000 ч

термообработки при 150 °С пластическая вязкость МЖ МКС 350-40 увеличивается не более чем на 10 % относительно исходной величины. Температура начала термоокисления для олигодизилсилоксанов со среднечисловой молекулярной массой 1300–2000, которые используются нами при синтезе магнитных жидкостей, составляет 150 °С [5]. Поэтому при 100 °С для МЖ МКС 350-40 пластическая вязкость не меняется при длительном термическом воздействии. При 150 °С пластическая вязкость МЖ возрастает вследствие увеличения динамической вязкости жидкости-носителя за счет термоокисления, инициирующегося при этой температуре. Однако, как показывает эксперимент, после тысячекратного воздействия пластическая вязкость изменилась незначительно. Испытания МЖ МКС 350-40 в магнитожидкостных уплотнениях, эксплуатирующихся при температурах 130–160 °С, показывают, что прирост вязкости МЖ на 10 %, не связанный с процессами десорбции и агрегации, никак не влияет на работу МЖУ. Таким образом, магнитную жидкость МКС 350-40 можно использовать в течение длительного времени, например, в качестве рабочего тела в МЖУ при температурах, как минимум, до 150 °С.

Для магнитной жидкости МКУ 030-40 при 100 °С пластическая вязкость практически не меняется в течение 200–300 ч. При дальнейшей термообработке пластическая вязкость МЖ монотонно увеличивается. В результате пластическая вязкость магнитной жидкости МКУ 030-40 после 1000 ч термического воздействия отличается от исходной величины приблизительно на 25–28 %.

Синтетическое углеводородное масло с комплексом антиокислительных присадок, используемое нами при синтезе магнитной жидкости МКУ 030-40, характеризуется высокой термоокислительной стабильностью. При 200 °С в течение 50 ч свойства, в том числе и динамическая вязкость, этого масла практически не изменяются [6]. Поэтому в кратковременном режиме магнитную жидкость МКУ 030-40 можно эксплуатировать при достаточно высоких температурах. При длительном термическом воздействии пластическая вязкость МЖ МКУ 030-40 будет расти. Увеличение вязкости можно связать отчасти с термоокислительными процессами, протекающими в жидкости-носителе, а также с увеличением объемной доли магнитной фазы в МЖ за счет испарения низкомолекулярных фракций жидкости-носителя. Наши экспериментальные данные показывают, что при 100 °С в течение 200–300 ч

пластическая вязкость МЖ МКУ 030-40 практически не меняется. Целесообразность использования этой магнитной жидкости в каких-либо устройствах при более высоких температурах и в течение более длительного промежутка времени могут подтвердить только соответствующие испытания на стендах, моделирующих конкретное электромеханическое устройство.

Список литературы

1. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 356 с.
2. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. – М.: Химия, 1989. – 240 с.
3. Арефьев И.М., Арефьева Т.А., Казаков Ю.Б. Метод определения коллоидальной стабильности магнитных жидкостей по результатам измерений вязкостных и магнитных свойств в процессе коагуляции и повторной пептизации / XIV Междунар. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. Плес, Россия. 7–10 сентября 2010. – Иваново, 2010. – С. 114–118.
4. Арефьев И.М., Арефьева Т.А., Казаков Ю.Б. Изучение термостабильности магнитных жидкостей / XIV Междунар. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям. Плес, Россия. 7–10 сентября 2010. – Иваново, 2010. – С. 119–122.
5. Олигоорганосилоксаны. Свойства, получение, применение / М.В. Соболевский, И.И. Скороходов, К.П. Гриневич и др. – М.: Химия, 1985. – 264 с.
6. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение / К.М. Бадыштова, Я.А. Берштадт, Ш.К. Багданов и др. – М.: Химия, 1989. – 432 с.

References

1. Rozentsveyg, R. *Ferrogidrodinamika* [Ferrodynamics], Moscow: Mir, 1989, 356 p.
2. Berkovskiy, B.M., Medvedev, V.F., Krakov, M.S. *Magnitnye zhidkosti* [Magnetic liquid], Moscow: Khimiya, 1989, 240 p.
3. Arefev, I.M., Arefeva, T.A., Kazakov, Yu.B. Metod opredeleniya kolloidal'noy stabil'nosti magnitnykh zhidkostey po rezul'tatam izmereniy vyazkostnykh i magnitnykh svoystv v protsesse koagulyatsii i povtomoy peptizatsii [Detection Method of Colloidal Stability of Magnetic Liquids based on Results of Viscosity and Magnetic Properties in Coagulation and Repeated Peptization Processes], in XIV *Mezhdunarodnaya konferentsiya po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam*. Ples, Rossiya [The XIVth International Conference on Nanodispersed Magnetic Liquids. Ples, Russia], Ivanovo, 2010, pp. 114–118.
4. Arefev, I.M., Arefeva, T.A., Kazakov, Yu.B. Izuchenie termostabil'nosti magnitnykh zhidkostey [Research of Magnetic liquids thermostability], in XIV *Mezhdunarodnaya konferentsiya po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam*. Ples, Rossiya [The XIVth International Conference on Nanodispersed Magnetic Liquids. Ples, Russia], Ivanovo, 2010, pp. 119–122.
5. Sobolevskiy, M.V., Skorokhodov, I.I., Grinevich, K.P. *Oligoorganosiloksany. Svoystva, poluchenie, primeneniye* [Oligoorganic siloxanes: properties, production, application], Moscow: Khimiya, 1985, 264 p.
6. Badyshtova, K.M., Bershtadt, Ya.A., Bagdanov, Sh.K. *Topliva, smazochnye materialy, tekhnicheskie zhidkosti. Assortiment i primeneniye* [Fuel, Lubricants, Technical Liquids. Assortment and Application], Moscow: Khimiya, 1989, 432 p.

Арефьев Игорь Михайлович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат химических наук, старший научный сотрудник,
e-mail: tatyana_arefyeva@mail.ru

Арефьева Татьяна Альбертовна,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
ведущий инженер кафедры электромеханики,
e-mail: tatyana_arefyeva@mail.ru

Казаков Юрий Борисович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики,
e-mail: elmash@em.ispu.ru