

УДК 621.7.06

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ГЕРМЕТИЗАТОРОВ

В. А. ПОЛЕТАЕВ¹, А. М. ВЛАСОВ², Т. А. ПАХОЛКОВА³

¹poletaev@tam.ispu.ru, ²leshka.vlasov@gmail.com, ³tanypah@mail.ru

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет» (ИГЭУ)

Поступила в редакцию 17.03.2017

Аннотация. Описана экспериментальная установка для исследования температуры и моментов трения в рабочих зазорах магнитожидкостных герметизаторов в зависимости от величин шероховатости и волнистости поверхностей полюсов и втулок из разных материалов, контактирующих с магнитной жидкостью разного типа.

Ключевые слова: шероховатость; волнистость; магнитное поле; ферромагнитная жидкость; температура.

Момент трения является одним из важнейших параметров электромеханических устройств. В магнитожидкостных герметизаторах (МЖГ) стремятся к снижению момента трения, определяющего внутренние тепловыделения и разогрев устройства. При изготовлении деталей электромеханических устройств на их поверхностях образуется множество микроскопических выступов и впадин (шероховатость поверхности) и волнистость. В электромеханических устройствах при переходе магнитного потока из воздуха в магнитопроводящую деталь в ее приповерхностном слое происходит перераспределение магнитного поля. Выступы шероховатой и волны волнистой поверхности концентрируют магнитный поток, образуя зоны с повышенной напряженностью магнитного поля, во впадинах между выступами создаются зоны с пониженной напряженностью поля. Поле из однородного преобразуется в неоднородное.

При удалении от поверхности неоднородность магнитного поля, обусловленная шероховатостью поверхности, постепенно ослабевает и исчезает. В устройствах, где используются мелкодисперсные магнитные среды (магнитные порошки, магнитные жидкости, тонкие пленки), в системах с движущимися электропроводящими жидкостями, перераспределение напряженности магнитного поля около шероховатой и волнистой магнитопро-

водящей поверхности может существенно изменять происходящие физические и технологические процессы, а также параметры технических устройств. Поэтому представляет большой интерес исследование влияния на момент трения в МЖГ характера перераспределения магнитного поля около магнитопроводящей поверхности, где поле является неоднородным, и на каком удалении от поверхности неоднородность поля, вызванная шероховатостью и волнистостью, отсутствует. В зависимости от условий эксплуатации конструктивное исполнение МЖГ на основе нанодисперсных магнитных жидкостей очень разнообразно, как и величина рабочего зазора в них. Дальнейшее развитие и применение МЖГ требуют тщательного моделирования и расчета их магнитных систем с учетом строения рабочего зазора в них в зависимости от величины шероховатости и волнистости внутренних поверхностей магнитных полюсов и наружных поверхностей валов из различных материалов, контактирующих с магнитной жидкостью разных марок, а также свойств и особенностей поведения магнитных жидкостей в различных условиях, влияющих на изменение моментов трения.

Наиболее распространена цилиндрическая конструкция МЖГ (рис. 1), в которых роль уплотнителя зазора между вращающимся валом и неподвижными деталями играет магнитная жидкость.

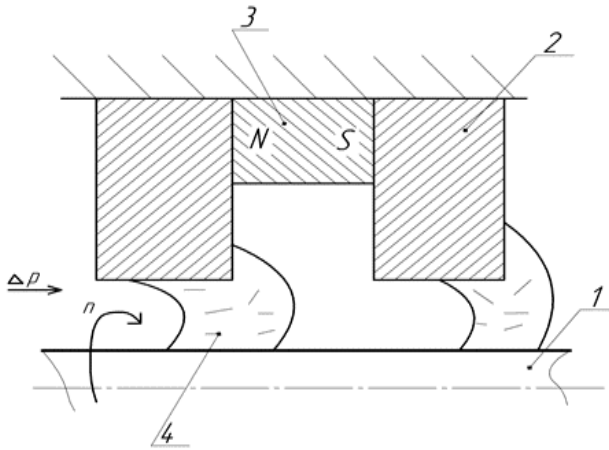


Рис. 1. Цилиндрическая конструкция МЖГ:

1 – вал; 2 – полюсный наконечник;

3 – постоянный магнит; 4 – магнитная жидкость

В случае необходимости герметизации вала большого диаметра, когда нет возможности выполнить цельный постоянный магнит, его выполняют сборным из большого числа элементов. Чаще всего для этого изготавливается дисковый сепаратор 1 из немагнитного материала, и который и укладываются стандартные дисковые постоянные магниты 2 (рис. 2).

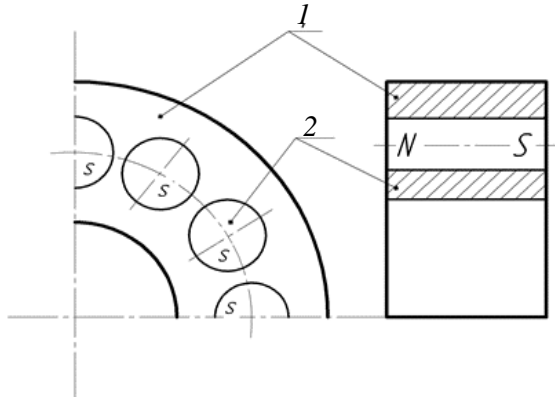


Рис. 2. Дисковый сепаратор:

1 – сепаратор; 2 – магниты

Наборный магнит большого диаметра может быть сделан и из прямоугольных пластин, также изготавливаемых в массовом производстве. Сепаратор представляет собой кольцо из немагнитного материала, которое ограничивает перемещение магнитных пластин или дисков. Между отдельными магнитами расстояние в наборном магните должно быть малым, чтобы не возникали большие потоки рассеяния. Для дисковых магнитов их радиус должен быть больше удвоенного расстояния между дисками. Все магниты располагаются в составном магните однополярно.

В условиях жидкостной (гидродинамической) смазки между поверхностями трения взаимодействующих деталей возникает зазор, превышающий сумму максимальных высот микронеровностей и волн этих поверхностей. Подшипники скольжения со смазочной магнитной жидкостью и магнитожидкостные уплотнения [1, 2], как правило, просты по конструкции (рис. 3).

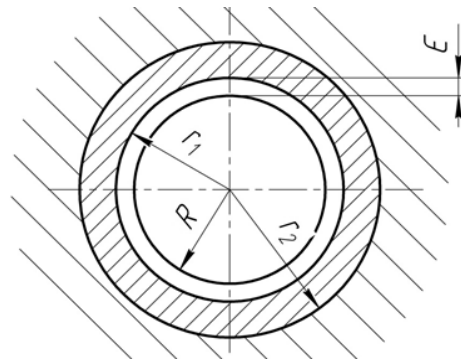


Рис. 3. Схема магнитожидкостного герметизатора при гидродинамической (жидкостной) смазке

Из-за различия в размерах вала и втулки между ними имеется радиальный зазор, заполненный ферромагнитной жидкостью:

$$\varepsilon = r_1 - R, \quad (1)$$

где r_1 – внутренний радиус втулки; R – радиус вала.

Толщина слоя магнитной жидкости и зависит от угловой скорости и вязкости магнитной жидкости. Чем больше эти параметры, тем больше h . При установившемся режиме работы толщина h слоя магнитной жидкости должна быть больше суммы микронеровностей полюса R_{z1} и вала (втулки) R_{z2} (рис. 4).

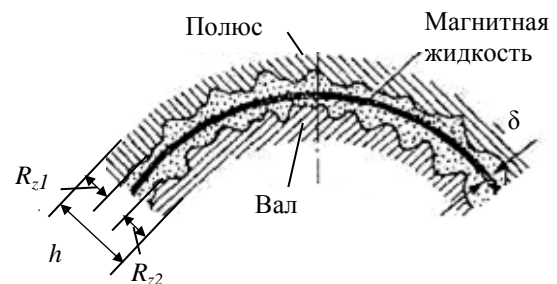


Рис. 4. Слой магнитной жидкости при установившемся режиме работы: δ – радиальный зазор; h – толщина слоя магнитной жидкости; R_{z1} – величина микронеровностей полюса; R_{z2} – величина микронеровностей вала (втулки)

Момент трения является одним из важнейших параметров магнитожидкостных герметизаторов, оказывающий влияние на величины передаваемых моментов и мощности. На момент трения магнитожидкостных герметизаторов влияют вязкость используемой магнитной жидкости, напряженность магнитного поля, градиент скорости сдвига в рабочем зазоре устройства, величина рабочего зазора, включающая величины шероховатости поверхностей полюсов и втулки, контактирующих с магнитной жидкостью, а изнашивание контактирующих поверхностей здесь практически исключается.

Для определения момента сопротивления вращения вала, обусловленного трением с магнитной жидкостью (момента трения) воспользуемся формулой Н. П. Петрова, справедливой при ламинарном течении жидкости между соосными цилиндрами, один из которых вращается и малом зазоре между ними

$$M_{Tp} = \eta \cdot R \cdot S \cdot v / \delta, \quad (2)$$

где η – динамическая вязкость жидкости, R – радиус вращающегося вала, соприкасающегося с магнитной жидкостью; v – окружная скорость вала; δ – зазор между валом и полюсом, заполненный жидкостью; S – площадь соприкосновения прослойки магнитной жидкости с валом.

Фактическая площадь контакта в рабочем зазоре магнитожидкостных герметизаторов определяется не только площадью соприкосновения прослойки магнитной жидкости с валом, а суммой площадей внутренней поверхности съемного полюса и наружной поверхности сменной втулки с прослойкой из ферромагнитной жидкости.

Расчет фактической площади контакта внутренней поверхности съемного полюса и наружной поверхности сменной втулки с прослойкой из ферромагнитной жидкости в магнитожидкостных герметизаторах при гидродинамической (жидкостной) смазке производится по формуле [3]

$$\eta_1 = \eta_2 \cdot \eta_3;$$

$$\eta_2 = \frac{A_r}{A_b}; \quad \eta_3 = \frac{A_b}{A_a},$$

где A_r – фактическая площадь контакта; A_b – площадь контакта на поверхностях волн; A_a – номинальная площадь контакта.

$$\eta_1 = \eta_2 \cdot \eta_3 = \frac{1}{2} b \cdot K^{\frac{2V}{2V+1}} \times$$

$$\times \left(\frac{1}{D_1} q \right)^{\frac{2V}{2V+1}} D_1, \quad (3)$$

где

$$K = \left(\frac{1,06\pi \cdot (1-\mu^2) R^{0,5}}{K_2 \cdot V \cdot b \cdot R_{\max}^{0,5}} \right);$$

$$D_1 = 2\pi \left(c_1^2 + \frac{c_1^2 b_1}{\sqrt{a_1^2 - c_1^2}} F(\lambda; K_0) + b_1 \sqrt{a_1^2 - c_1^2} \cdot E(\lambda; K_0) \right) \times$$

$$\times \frac{1}{\ell_{pr} \cdot \ell_{pop}};$$

$$K_0 = \frac{a_1^2 \cdot (b_1^2 - c_1^2)}{b_1^2 \cdot (a_1^2 - c_1^2)};$$

$$\lambda = \arcsin \sqrt{\frac{a_1^2 - c_1^2}{a_1}};$$

$F(\lambda; K_0)$ и $E(\lambda; K_0)$ – эллиптические интегралы первого и второго рода

$$F(\lambda; K_0) = \int_0^\lambda \frac{ds}{\sqrt{1 - K_0^2 \cdot \sin^2 \phi}};$$

$$E(\lambda; K_0) = \int_0^\lambda \sqrt{1 - K_0^2 \cdot \sin^2 \phi} \cdot d\phi;$$

где b и V – константы, характеризующие опорную кривую; R – радиус закругления выступов; R_{\max} – максимальная высота выступов; μ – коэффициент Пуассона; c и x – константы; K_2 – коэффициент; ℓ_{pr} и ℓ_{pop} – длины волн поверхностей в продольном и поперечном направлениях; q – номинальное удельное давление; $a_1 > b_1 > c_1$ – полуоси эллипсоида общего вида.

На рис. 5, 6 показаны разработанные модели рабочих зазоров магнитожидкостных герметизаторов, образованных поверхностями с разной величиной шероховатости [4].

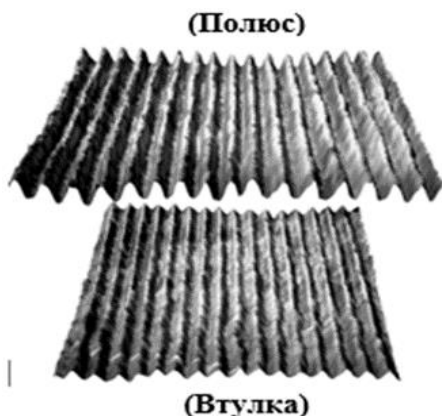


Рис. 5. Модель рабочего зазора, составленного из поверхностей втулки (сталь 40X13) с шероховатостью $R_a = 0,945$ мкм ($R_z = 4,026$ мкм) и полюса (сталь 3) с шероховатостью $R_a = 0,808$ мкм ($R_z = 3,875$ мкм)

Модель рабочего зазора, составленного из поверхностей втулки (сталь 40X13) с шероховатостью $R_a = 0,945$ мкм ($R_z = 4,026$ мкм) и полюса (сталь 3) с шероховатостью $R_a = 3,301$ мкм ($R_z = 14,333$ мкм)

Для определения влияния вязкости используемой магнитной жидкости, температуры, напряженности магнитного поля, частоты вращения вала, величин шероховатости R_a и волнистости поверхностей сменных втулок и полюсов на момент трения в рабочем зазоре магнитожидкостного герметизатора была модернизирована установка с радиальным магнитожидкостным уплотнением [5], представленная на рис. 7.

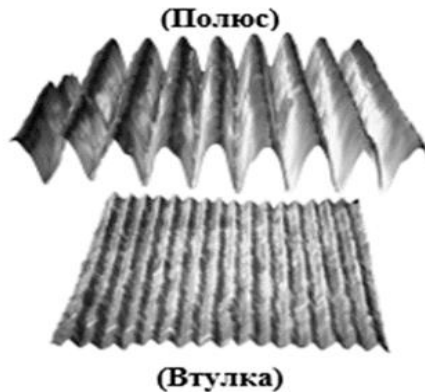


Рис. 6. Модель рабочего зазора, составленного из поверхностей втулки (сталь 40X13) с шероховатостью $R_a = 0,945$ мкм ($R_z = 4,026$ мкм) и полюса (сталь 3) с шероховатостью $R_a = 3,301$ мкм ($R_z = 14,333$ мкм)

Исследованиями магнитных жидкостей, возможностей их технического и технологического применения активно ведутся учеными в МГУ (г. Москва), а также в Краснодаре, Минске, Николаеве, Новосибирске, Перми, Санкт-Петербурге, Ставрополе, Харькове, Ярославле и др. За рубежом наиболее интенсивно работают ученые США, Японии, Латвии и др.

Имеющиеся экспериментальные установки предназначены для измерения перепада давлений в герметизаторах [6, 7].

Разработанная и изготовленная экспериментальная установка используется для исследования моментов трения в рабочем зазоре, образо-

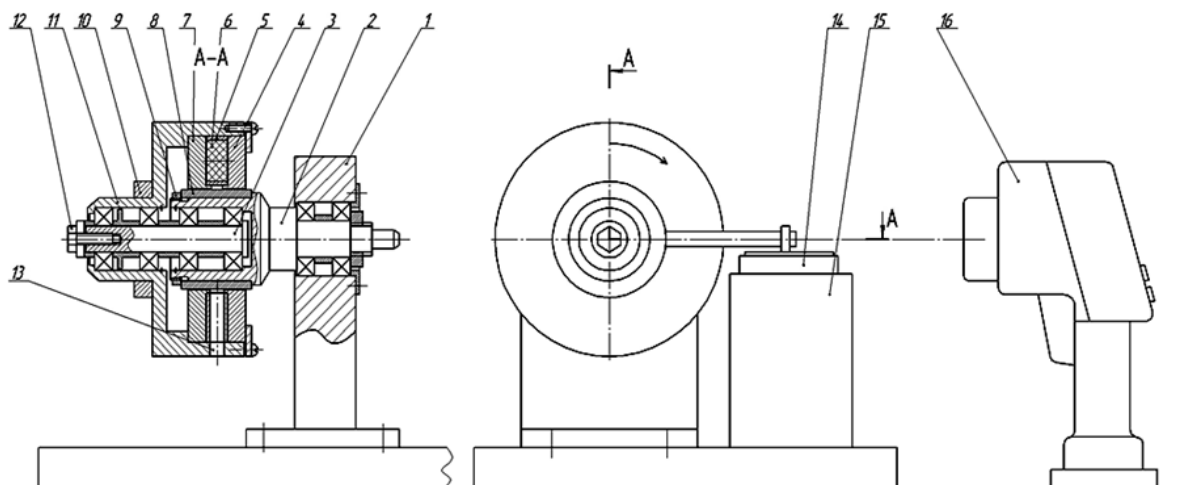


Рис. 7. Схема экспериментальной установки:
 1 – стойка; 2 – подвижный вал; 3 – неподвижный вал; 4 – съемный полюс; 5 – диск (обойма);
 6 – магнит; 7 – съемный полюс; 8 – сменная втулка; 9 – гайка; 10 – хомут; 11 – корпус;
 12 – болт; 13 – отверстие для измерения температуры;
 14 – весы; 15 – стойка; 16 – тепловизор

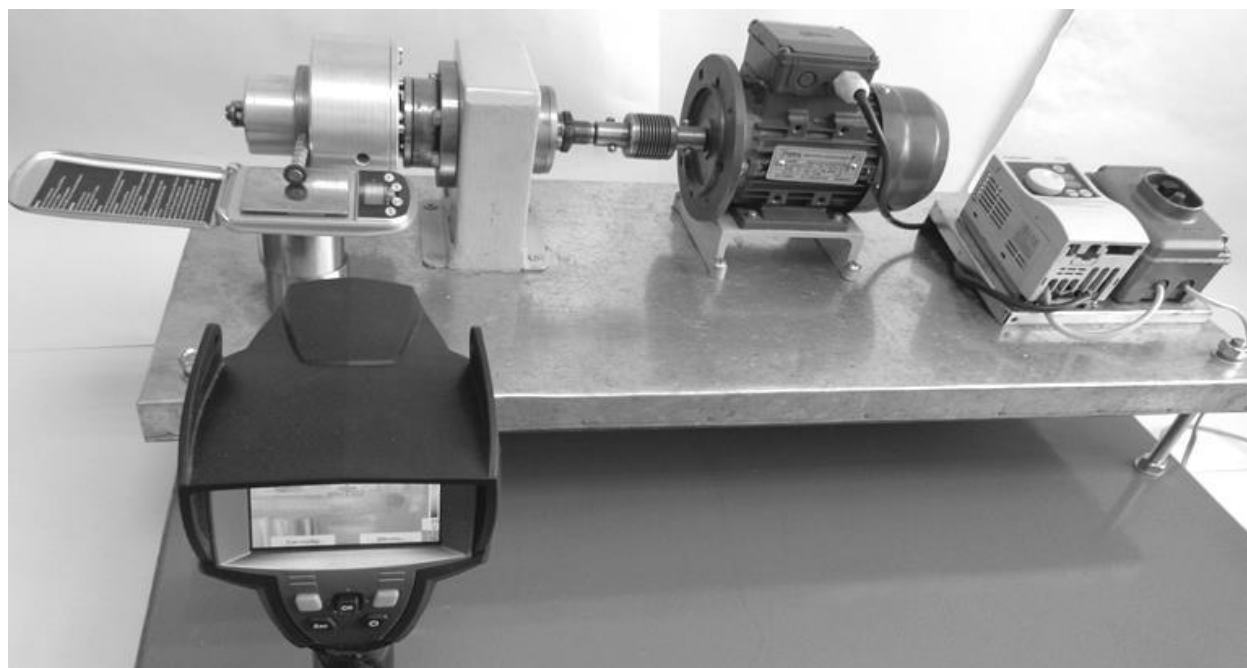


Рис. 8. Фотография экспериментальной установки

ванном поверхностями трения и заполненным магнитной жидкостью, в зависимости от величин шероховатости и волнистости поверхностей трения магнитных полюсов и валов из различных материалов, вязкости магнитной жидкости заданной марки, частоты вращения вала, величины магнитного поля постоянных магнитов.

На рис. 8 показана фотография экспериментальной установки, на рис. 9 – фотографии ее отдельных элементов

Магнитная жидкость размещается с равномерным рабочим зазором с однородным магнитным полем между сменными полюсами 4 и сменной втулкой 9. Источником магнитного поля являются цилиндрические постоянные магниты 6, равномерно размещенные по окружности между полюсными приставками. Вал 2 приводится в движение электродвигателем с регулируемой скоростью вращения. Момент трения, создаваемый магнитной жидкостью и опорными подшипниками, передается на магнитную систему устройства и измеряется электронными весами 14. Температура на поверхности сменной втулки 8 измеряется через отверстие 13 при помощи тепловизора 16.

Для проведения исследований используется тепловизор Testo882 с размером матрицы 320×240 пикселей, температурной чувствительностью <math>< 60\text{ мК}</math> при 30°C. Температурный диа-

пазон от -20°C до $+100^{\circ}\text{C}$. Погрешность измерения $\pm 2\%$ от величины показания. При измерении температуры применялся коэффициент излучения 0,95.

Для исследования используются постоянные магниты типов:

- ИЖКГ из материалов ЮНДКТ5БА диаметром 10 мм с индукцией = 0,5 (Тл) и коэрцитивной силой = 120 (кА/м);

- ЕАЖИ из материала феррита стронция диаметром 15 мм с индукцией = 0,3 (Тл) и коэрцитивной силой = 158 (кА/м);

- ИЖКГ из материала феррит стронция диаметром 20 мм с индукцией = 0,3 (Тл) и коэрцитивной силой = 185 (кА/м).

Одним из основных производителей МЖ технического назначения в России является Проблемная научно-исследовательская лаборатория прикладной феррогидродинамики Ивановского государственного энергетического университета (ПНИЛ ПФГД ИГЭУ).

В табл. приведены некоторые типы МЖ, выпускаемые лабораторией, их основные параметры.

Сменные втулки 8 (рис. 9) изготовлены из стали 3 с разными величинами шероховатости наружной поверхности Ra (0,354 мкм; 1,220 мкм; 7,210 мкм) и из стали 40Х13 при величине шероховатости наружной поверхности Ra (0,362 мкм; 0,945 мкм; 8,028 мкм).

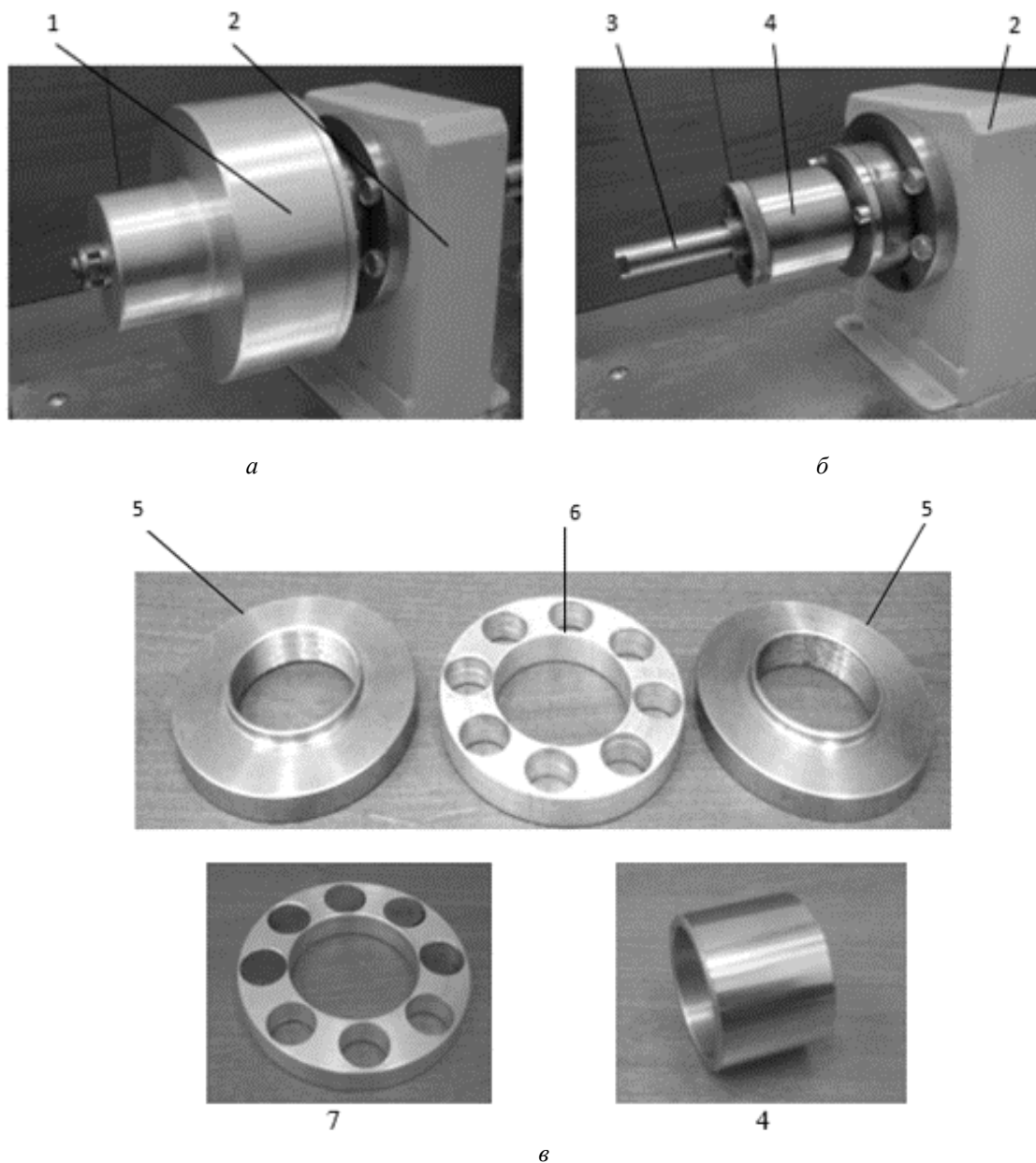


Рис. 9. Фотографии отдельных элементов экспериментальной установки в собранном виде (а) и в разборном виде (б, в):
 1 – корпус; 2 – стойка; 3 – неподвижный вал; 4 – сменная втулка; 5 – съемный полюс;
 6 – диск (обойма); 7 – сменная втулка с постоянными магнитами

Таблица

Типы МЖ, выпускаемые ПНИЛ ПФГД ИГЭУ

Марка МЖ	Диапазон рабочих температур, °С	Вязкость пластическая, Па·с	Намагниченность насыщения, кА/м
(№1)МКА-1-25	-50 ÷ +70	0,5 ÷ 0,6	20 ÷ 30
(№2)МКА-1-30	-60 ÷ +130	0,15 ÷ 2,0	10 ÷ 70
(№3)МКС- 350-40	-50 ÷ +150	до 2	20 ÷ 40
(№4)МКА-1-40	-70 ÷ +70	0,03 ÷ 0,8	20 ÷ 75
(№5)МКС 003-60	-50 ÷ +70	0,003 ÷ 0,02	10 ÷ 70

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная экспериментальная установка позволяет проводить исследования изменения температуры и моментов трения в рабочих зазорах магнитоожидкостных герметизаторов в зависимости от величины шероховатости и волнистости поверхностей полюсов и втулок из разных материалов, контактирующих с магнитной жидкостью разного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перминов С. М., Перминова А. С., Полетаев В. А. Патент № 22531070 РФ. Магнитоожидкостное уплотнение вала с пониженным моментом трения; заявл. 05.04.13; опубл. 20.10.14; бюлл. № 29. 2 с. [S. M. Perminov, A. S. Perminova, V. A. Poletaev. Patent № 22531070 RF Magneto-fluidic seal of the shaft with low friction torque, *zajavl.* 05.04.13; *opubl.* 20.10.2014, *Vjull.* no. 29. pp. 2.]

2. Перминов С. М., Перминова А. С. Полетаев В. А. Патент № 2536863 РФ. Способ повышения ресурса и надежности устройств с нанодисперсной магнитной жидкостью; заявл. 05.04.13; опубл. 20.12.14; бюлл. № 36. 2 с. [S. M. Perminov, A. S. Perminova, V. A. Poletaev. Patent № 2536863 RF A method of increasing the life and reliability of devices with nano-disperse magnetic fluid, *zajavl.* 05.04.13; *opubl.* 20.12.2014, *Vjull.* no. 36. pp. 2]

3. Полетаев В. А., Власов А. М., Пахолкова Т. А. Расчет фактической площади контакта в подшипниках скольжения при гидродинамической (жидкостной) смазке // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. №11. С. 26–31. [V. A. Poletaev, A. M. Vlasov, T. A. Paholkova, "Calculation of actual contact area in sliding bearings with hydrodynamic (liquid) grease", (in Russian), in *Trenie i smazka v mashinah i mehanizmah*, no. 11, pp. 26-31, 2014.]

4. Власов А. М., Полетаев В. А., Пахолкова Т. А. Построение трехмерной модели шероховатой поверхности // Новые материалы и технологии в машиностроении: сборник научных трудов. 2014. №20. С. 19–22. [A. M. Vlasov, V. A. Poletaev, T. A. Paholkova, "the construction of a three-dimensional model of a rough surface", (in Russian), in *Novye materialy i tehnologii v mashinostroenii: sbornik nauchnyh trudov*, no. 20, pp. 19-22, 2014.]

5. Полетаев В. А., Пахолкова Т. А., Власов А. М. Установка для исследования величины рабочего зазора на момент трения магнитоожидкостных устройств // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. №9. С. 29–31. [V. A. Poletaev, T. A. Paholkova, A. M. Vlasov, "Setup for studying the magnitude of the working gap at the time of friction ferrofluid-based devices", (in Russian), in *Trenie i smazka v mashinah i mehanizmah*, no. 9, pp. 29-31, 2013.]

6. Магнитные жидкости в машиностроении / Д. В. Орлов [и др.]; под общ. ред. Д. В. Орлова, В. В. Подгоркова. М.: Машиностроение, 1993. 272 с. [D. V. Orlov [and others], *Magnetic fluids in mechanical engineering*, (in Russian), pod obshh. red. D. V. Orlova, V. V. Podgorkova. M.: Mashinostroenie, 1993.]

7. Блум Э. Я., Майоров М. М., Цеберс А. О. Магнитные жидкости / АН Латвийской ССР; Институт физики. Рига: Зинатне, 1989. 386 с. [E. Ya. Bloom, M. M. Mayorov, A. O. Zebers, "Magnetic fluids", (in Russian), in *AN Latvijas SSR; Institut fiziki. Riga: Zinatne*, pp. 386, 1989.]

ОБ АВТОРАХ

ПОЛЕТАЕВ Владимир Алексеевич, проф. каф. технологии машиностроения. Дипл. инженер-механик (Ивановск. гос. энергет. ун-т, 1976). Д-р техн. наук по технологии машиностроения (СПГТУ, 1998). Иссл. в обл. упрочнения металлов, трения и износа.

ВЛАСОВ Алексей Михайлович, ассистент каф. технологии машиностроения. Дипл. инженер-технолог (ИГЭУ, 2012). Готовит дисс. по моделированию и расчету магнитных систем с учетом строения рабочего зазора в них в зависимости от величины шероховатости и волнистости внутренних поверхностей магнитных полюсов и наружных поверхностей валов из различных материалов, контактирующих с магнитной жидкостью разных марок, а также свойств и особенностей поведения магнитных жидкостей в различных условиях, влияющих на изменение моментов трения.

ПАХОЛКОВА Татьяна Александровна, доцент каф. конструирования и графики. Дипл. инженер-механик (ИГЭУ, 1988). Иссл. в обл. упрочнения металлов, трения и износа.

METADATA

Title: Setup for studying the operational characteristics of the magnetic liquid dock.

Authors: V. A. Poletaev¹, A. M. Vlasov², T. A. Paholkova³

Affiliation: Ivanovo State Power University (ISPU), Russia.

Email: ¹poletaev@tam.ispu.ru, ²leshka.vlasov@gmail.com, ³tanyapah@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 21, no. 2 (76), pp. 17-23, 2017. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The described experimental setup to study the temperature and moment of friction in the working gaps of the magnetic liquid of the dock, depending on the surface roughness and waviness of the surfaces of the poles and sleeves of different materials, contacting with magnetic fluid of different types.

Key words: Roughness; waviness; magnetic field; ferromagnetic fluid; temperature.

About authors:

POLETAEV, Vladimir Alekseevich, Professor of the department of mechanical engineering technology. Graduate mechanical engineer (Ivanovo State Power University, 1976). Doctor of technical science in mechanical engineering (SPSTU, 1998).

VLASOV, Alexey Mikhailovich, assistant of the department of mechanical engineering technology. Chartered process engineer (Ivanovo State Power University, 2012).

PAKHOLKOVA, Tatiana Aleksandrovna, associate Professor of Design and graphics. Graduate mechanical engineer (Ivanovo State Power University, 1988).