

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.538

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ГЕРМЕТИЗАТОРОВ ВАЛОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

А.М. ВЛАСОВ, Ю.Б. КАЗАКОВ, В.А. ПОЛЕТАЕВ

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская федерация

E-mail: elmash@em.ispu.ru; leshka.vlasov@gmail.com

Авторское резюме

Состояние вопроса. Магнитожидкостные герметизаторы начинают применяться для уплотнения вращающихся валов в электродвигателях, работающих при повышенной влажности, запыленности и загрязненности. Момент трения и нагрев – важнейшие эксплуатационные показатели магнитожидкостных герметизаторов, на которые влияют конструктивные и режимные параметры: частота вращения; время работы; температура; зазор с учетом шероховатости и волнистости. Актуальным является исследование влияния конструктивных и режимных параметров на эксплуатационные показатели магнитожидкостных герметизаторов валов таких электродвигателей.

Материалы и методы. Моделирование шероховатых поверхностей произведено при помощи ортогональных преобразований векторов матрицы высот микронеровностей с визуализацией. Площадь контакта магнитной жидкости с шероховатыми поверхностями определялась математическим моделированием. Экспериментальные исследования выполнены на опытном стенде. Применены сменные втулки и полюсы из разных сталей с разными шероховатостями.

Результаты. Получены модели зазоров магнитожидкостных герметизаторов, образованных поверхностями с разной шероховатостью. Определены площади контакта магнитной жидкости с поверхностями магнитожидкостных герметизаторов при разных шероховатостях. Получены нелинейные зависимости и пределы изменения момента трения и температуры магнитожидкостных герметизаторов от величины шероховатостей поверхностей полюсов и втулок, частот вращения электродвигателя, внешней температуры.

Выводы. Модели зазоров позволяют оценить шероховатость поверхностей магнитожидкостных герметизаторов. Разработанная экспериментальная установка позволяет проводить исследования влияния изменения конструктивных и режимных параметров на эксплуатационные показатели магнитожидкостных герметизаторов. При повышении частоты вращения в 5,21 раза (с 556 до 2897 об/мин) температура магнитожидкостных герметизаторов может повыситься до 2 раз, момент трения – до 2,2 раз. При повышении температуры на 50 °С момент трения может снизиться до 3 раз. При повышении шероховатости поверхности с 0,357 до 7,21 мкм температура магнитожидкостных герметизаторов может повыситься на 20 %, а момент трения – на 55 %.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитожидкостный герметизатор, электродвигатель, экспериментальный стенд, частота вращения, момент трения

INFLUENCE OF DESIGN PARAMETERS AND OPERATING CONDITIONS ON PERFORMANCE INDICATORS OF MAGNETIC FLUID SEALS OF ELECTRIC MOTOR SHAFTS

A.M. VLASOV, Yu.B. KAZAKOV, V.A. POLETAEV
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: elmash@em.ispu.ru; leshka.vlasov@gmail.com

Abstract

Background. Magnetic fluid seals (MFS) are beginning to be used to seal rotating shafts in electric motors operating in conditions of high humidity, dust and pollution. Friction torque and heating are the most important operational indicators of MFS depending on the design parameters and operation conditions: rotation frequency, operation time, temperature and clearance (taking into account roughness and waviness). An urgent task is to study the influence of design parameters and operating conditions on the performance indicators of MFS of such electric motor shafts.

Materials and methods. The modeling of rough surfaces was performed using orthogonal transformations of roughness matrix vectors and a visual representation. The contact area of the magnetic fluid with rough surfaces was determined by mathematical modeling. The experimental studies were performed on a test bench. Wear sleeves and poles made of various steels with different roughness parameters were used.

Results. Models of MFS clearances formed by surfaces with different roughness have been obtained. The contact areas of the magnetic fluid with the surfaces of MFS at different roughness values have been determined. Nonlinear dependences and variation limits of the friction torque and MFS temperature on the surface roughness of the poles and sleeves, rotation frequencies of the electric motor, and the external temperature have been obtained.

Conclusions. Clearance models allow determining the roughness of MFS surfaces. The developed experimental unit allows carrying out studies on the effect of changes of design parameters and operating conditions on the performance indicators of MFS. At a 5,21 time higher rotation frequency (from 556 to 2897 rpm), the MFS temperature can increase by up to 2 times, the friction torque – by up to 2,2 times. If the temperature rises by 50 °C, the friction torque can drop by up to 3 times. With an increase in the surface roughness from 0,357 to 7,21 μm, the temperature of the MFS can rise by 20 %, and the friction torque by 55 %.

Key words: magnetic fluid, magnetic fluid seal, electric motor, test bench, rotation frequency, friction torque

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.5.040-047

Введение. Магнитожидкостные герметизаторы (МЖГ) с использованием магнитных жидкостей (МЖ) [1] обеспечивают эффективное уплотнение вращающихся валов и начинают применяться в электродвигателях, работающих в ответственных и/или тяжелых условиях, при повышенной влажности, запыленности и загрязненности твердыми абразивными частицами, например, во взрывозащищенных электродвигателях, электродвигателях шахтных комбайнов, центробежных насосов [2–4]. В процессе работы может происходить изнашивание поверхностей валов и полюсов инородными частицами, изменение шероховатости, что может влиять на работоспособность и ресурс МЖГ.

Момент трения $M_{\text{ТР}}$ – один из важнейших показателей МЖГ, определяющий момент страгивания, потерю мощности, внутренние тепловыделения и разогрев МЖГ. На $M_{\text{ТР}}$ и ресурс работы МЖГ влияют конструктивные и режимные параметры: градиент

скорости сдвига МЖ в зазоре; время работы; вязкость МЖ; диффузия магнитных частиц; температура T [5, 6]; напряженность магнитного поля; величина зазора, учитывающая волнистости и шероховатости поверхностей полюсов и втулки, контактирующих с МЖ; частота вращения вала. В приповерхностном слое шероховатых поверхностей вала и полюсных приставок МЖГ происходит перераспределение магнитного потока, изменение эксплуатационных показателей. Неявные, многофункциональные и нелинейные характеристики МЖГ могут анализироваться опытно [7]. Но теоретически обоснованное исследование зависимостей момента трения и разогрева МЖГ от шероховатости поверхностей, внешней температуры, напряженности магнитного поля, вязкости МЖ, частоты вращения электродвигателей, работающих в ответственных и/или тяжелых условиях, до настоящего времени не проводилось. В связи с этим такое расчетно-экспериментальное исследование является актуальным.

Теоретическое обоснование. Зазор между уплотняемым валом с радиусом r и полюсом с радиусом R в МЖГ, заполненный МЖ, рассчитывается как

$$\delta = R - r. \quad (1)$$

Толщина слоя МЖ h больше δ на величину суммы микронеровностей полюса R_{z1} и вала (втулки) R_{z2} , (рис. 1). Из-за микронеровностей зазор в каждой точке окружности будет разным. По усредненным суммам микронеровностей R_z определяются шероховатости поверхностей Ra .

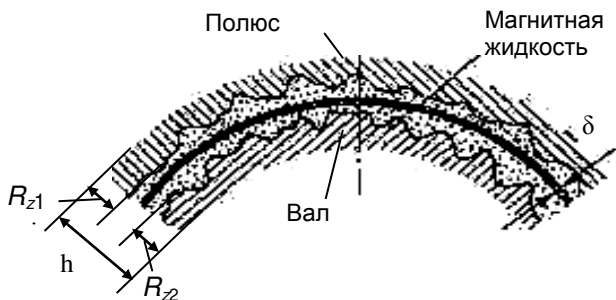


Рис. 1. Слой магнитной жидкости в зазоре

Для определения $M_{тр}$, обусловленного вязкостным трением МЖ с поверхностями, может использоваться соотношение Н.П. Петрова [1], справедливое при ламинарном течении жидкости между соосными цилиндрами с малым зазором, один из которых вращается:

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

где η – динамическая вязкость жидкости; v – окружная скорость вала; S – площадь соприкосновения МЖ с деталями.

Фактическая площадь контакта МЖ с деталями в зазоре МЖГ определяется суммой площадей контакта внутренней поверхности полюса и наружной поверхности втулки с МЖ. Площадь контакта с МЖ возрастает с увеличением шероховатости герметизируемых поверхностей. Поверхности полюса и вала могут иметь волнистости, что увеличивает площадь контакта и, соответственно, момент трения.

Расчет фактической площади S контакта внутренней шероховатой поверхности полюса и наружной шероховатой поверхности втулки с МЖ осуществляется по соотношению [8, 9]

$$S = \frac{1}{2} b K^{\frac{2V}{2V+1}} \left(\frac{1}{D_1} \right)^{\frac{2V}{2V+1}}, \quad (3)$$

где

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

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

$$K_0 = \frac{a_1^2 (b_1^2 - c_1^2)}{b_1^2 (a_1^2 - c_1^2)}; \quad \lambda = \arcsin \sqrt{\frac{a_1^2 - c_1^2}{a_1}},$$

где $F(\lambda, K_0)$ и $E(\lambda, K_0)$ – эллиптические интегралы первого и второго рода; b и V – константы, характеризующие опорную кривую поверхности; r_z – радиус закругления выступов шероховатости; R_{zmax} – максимальная высота выступов шероховатости; μ – коэффициент Пуассона; $\ell_{пр}$ и $\ell_{поп}$ – длины волн для поверхностей полюса и втулки в продольном и поперечном направлениях; $a_1 > b_1 > c_1$ – полуоси эллипсоида, описывающие кривую волнистости.

Вязкость МЖ нелинейно зависит от скорости сдвига слоев, определяемой частотой вращения и величиной зазора, и от магнитной индукции. С повышением скорости сдвига слоев вязкость МЖ нелинейно снижается, при повышении магнитной индукции – возрастает.

МЖ работоспособны в температурном диапазоне $T_{внеш}$ от -60 до $+180$ °С (для разных основ). Внутри МЖ при движении за счет вязкого трения имеются зоны тепловыделения, разогревающие МЖГ. При повышении частоты вращения вязкостные потери возрастают. Вследствие невысокой теплопроводности в МЖ могут возникать области, где из-за повышенных температур $T_{внут}$ она находится на грани потери свойств. Изменение температуры влияет на коэффициент теплопроводности и вязкость МЖ. С ростом температуры вязкость МЖ нелинейно снижается [1], что сказывается на моменте трения. Таким образом, вязкость МЖ и момент трения нелинейно зависят от частоты вращения, температуры и магнитной индукции. Поэтому с изменением конструктивных (δ , R_{z1} , η) и режимных (v , $T_{внеш}$) параметров будут нелинейно изменяться эксплуатационные показатели МЖГ – момент трения ($M_{тр}$) и нагрев ($T_{внут}$).

Методы и модели. Моделирование шероховатых поверхностей втулок и полюсов производилось с использованием методов, основанных на ортогональных преоб-

разованиях векторов матрицы высот микронеровностей фрагмента поверхности, а также с использованием 3D и имитационного моделирования [10, 11].

Для определения влияния вязкости МЖ, температуры, напряженности магнитного поля, частоты вращения вала, шероховатости и волнистости поверхностей втулок и полюсов на момент трения и разогрев МЖГ была модернизирована установка [12], представленная на рис. 2. МЖ размещается в зазоре с магнитным полем между сменными полюсами и сменной втулкой. Источником магнитного поля являются цилиндрические постоянные магниты, равномерно размещенные по окружности между полюсными приставками. Вал приводится в движение электродвигателем с регулируемой скоростью вращения. Момент трения, создаваемый МЖ и опорными подшипниками, через рычаг измеряется с помощью электронных весов. Температура на поверхности сменной втулки измеряется через отверстие при помощи тепловизора Testo 882 с размером матрицы 320×240 пикселей и температурной чувствительностью <math>< 50 \text{ мК}</math>.

Использовались постоянные магниты на основе феррита стронция диаметром 20 мм с индукцией $B_r = 0,3 \text{ Тл}$ и коэрцитивной силой $H_j = 185 \text{ кА/м}$. Сменные втулки изготовлены из стали 3 с разными величинами шероховатостей поверхностей $Ra = 0,354; 1,220 \text{ и } 7,210 \text{ мкм}$, и из стали 40X13 с $Ra = 0,362; 0,945 \text{ и } 8,028 \text{ мкм}$.

МЖ могут быть синтезированы на разных основах, с разной концентрацией магнитной фазы, с разными поверхностно-

активными веществами, что определяет вязкость МЖ. Исследования проводились с МЖ МКУ 030-40 с пластической вязкостью 0,1–0,5 Па·с [13].

Результаты. На рис. 3 представлены результаты моделирования и визуализация зазоров МЖГ, образованных поверхностями с разной величиной шероховатости. В таблице приведены результаты расчета увеличения фактических площадей контакта ΔS внутренней поверхности полюса или наружной поверхности втулки с МЖ в зависимости от шероховатостей поверхностей для разных сталей.

Анализ результатов расчета показал, что при увеличении шероховатости Ra с 0,354 до 9,477 мкм величина фактической площади контакта повышается: с 102,5 до 105,8 % при использовании втулок из стали 3; с 102,7 до 106,2 % при использовании втулок из стали 40X13; с 104,0 до 106,8 % для полюса из стали 3.

В экспериментах использовались втулки из стали 3 с разными Ra и полюс из стали 3 с $Ra = 3,301 \text{ мкм}$. На рис. 4–6 представлены графики зависимостей температуры в МЖГ от времени работы и зависимости момента трения от температуры при зазоре, образованном втулкой из стали 3 и полюсом из стали 3 при частотах вращения вала 556, 1146, 1793, 2331 и 2897 об/мин. На рис. 7 представлены графики изменения температуры в МЖГ и момента трения в зависимости от шероховатости поверхности втулки при том же полюсе и тех же частотах вращения.

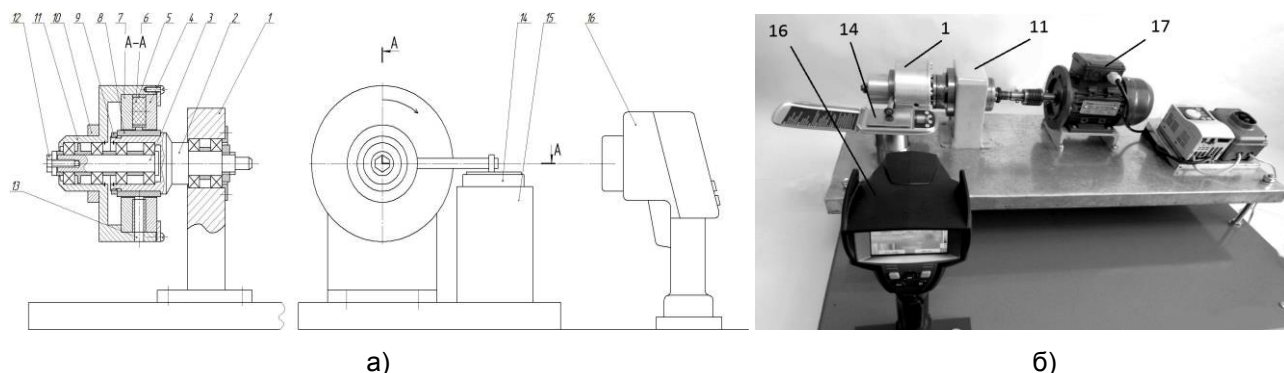
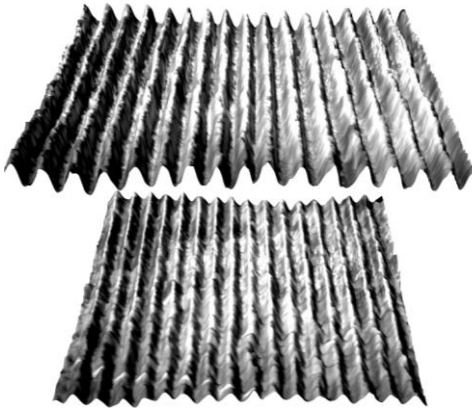


Рис. 2. Схема (а) и фото (б) экспериментальной установки: 1 – стойка; 2 – подвижный вал; 3 – неподвижный вал; 4 – съемный полюс; 5 – диск (обойма); 6 – магнит; 7 – съемный полюс; 8 – сменная втулка; 9 – гайка; 10 – хомут; 11 – корпус; 12 – болт; 13 – отверстие для измерения температуры; 14 – весы; 15 – стойка; 16 – тепловизор; 17 – двигатель

Полюс
(сталь 3, $Rz_{max} = 3,875$ мкм, $Ra = 0,808$ мкм)



Втулка

(сталь 40X13, $Rz_{max} = 4,026$ мкм, $Ra = 0,945$ мкм)

Полюс
(сталь 3, $Rz_{max} = 14,333$ мкм, $Ra = 3,301$ мкм)



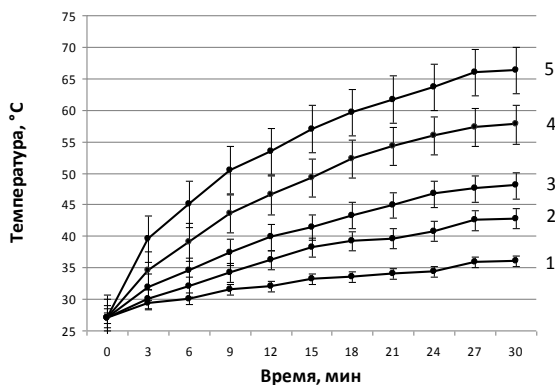
Втулка

(сталь 40X13, $Rz_{max} = 4,026$ мкм, $Ra = 0,945$ мкм)

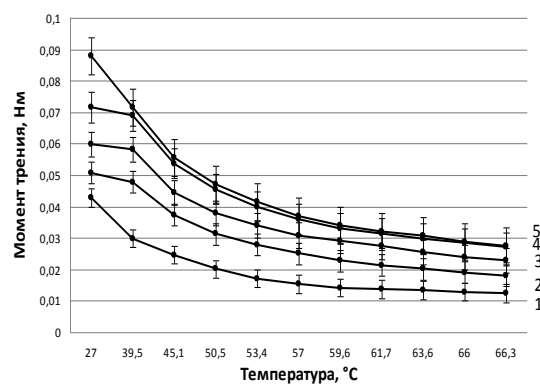
Рис. 3. Результаты моделирования и визуализация зазоров, образованных поверхностями втулки и полюсов разной шероховатости

Результаты расчета фактической площади контакта внутренней поверхности полюса или наружной поверхности втулки с магнитной жидкостью в магнитожидкостных герметизаторах

Элемент, материал	Втулка, сталь 3			Втулка, сталь 40X13			Полюс, сталь 3		
Шероховатость Ra , мкм	0,354	1,220	7,210	0,362	0,945	8,028	0,808	3,301	9,477
Увеличение площади контакта ΔS , %	102,5	104,2	105,8	102,7	103,6	106,2	104,0	104,8	106,8

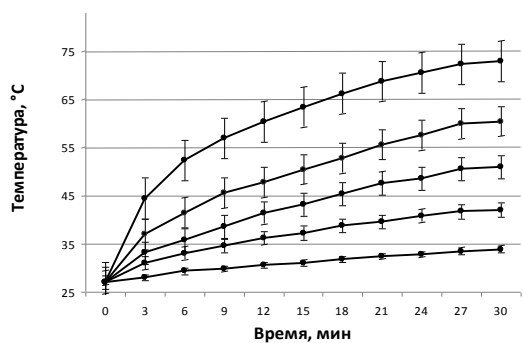


а)

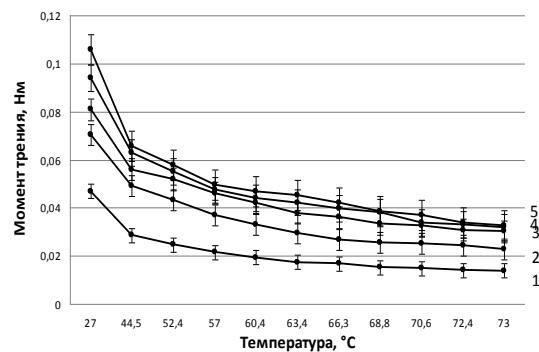


б)

Рис. 4. Зависимости температуры в МЖГ от времени работы (а) и момента трения от температуры (б) при зазоре, образованном втулкой (сталь 3, $Ra = 0,354$ мкм) и полюсом (сталь 3, $Ra = 3,301$ мкм), при частоте вращения вала: 1 – 556 об/мин; 2 – 1146 об/мин; 3 – 1793 об/мин; 4 – 2331 об/мин; 5 – 2897 об/мин



а)



б)

Рис. 5. Зависимости температуры в МЖГ от времени работы (а) и момента трения от температуры (б) при зазоре, образованном втулкой (сталь 3, $Ra = 1,220$ мкм) и полюсом (сталь 3, $Ra = 3,301$ мкм), при частоте вращения вала: 1 – 556 об/мин; 2 – 1146 об/мин; 3 – 1793 об/мин; 4 – 2331 об/мин; 5 – 2897 об/мин

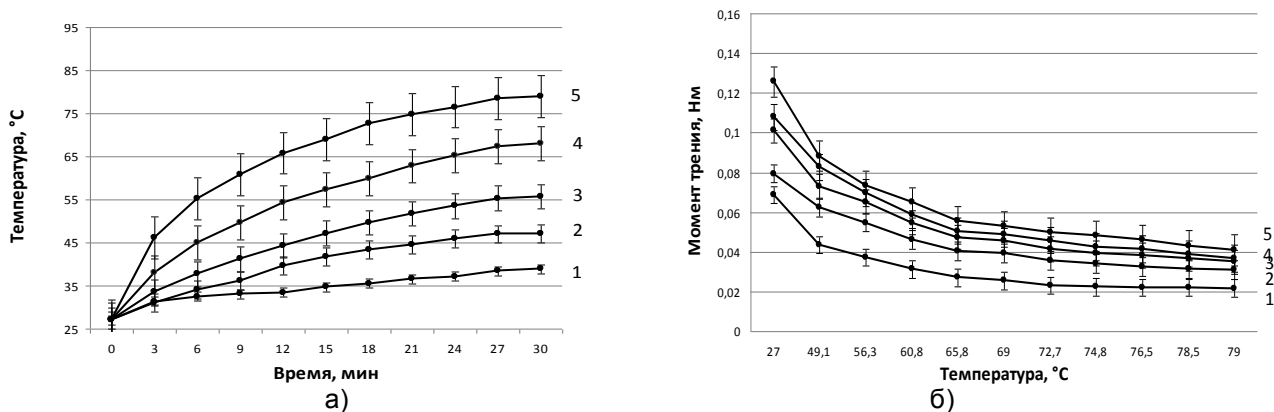


Рис. 6. Зависимости температуры в МЖГ от времени работы (а) и момента трения от температуры (б) при зазоре, образованном втулкой (сталь 3, $Ra = 7,210$ мкм) и полюсом (сталь 3, $Ra = 3,301$ мкм), при частоте вращения вала: 1 – 556 об/мин; 2 – 1146 об/мин; 3 – 1793 об/мин; 4 – 2331 об/мин; 5 – 2897 об/мин

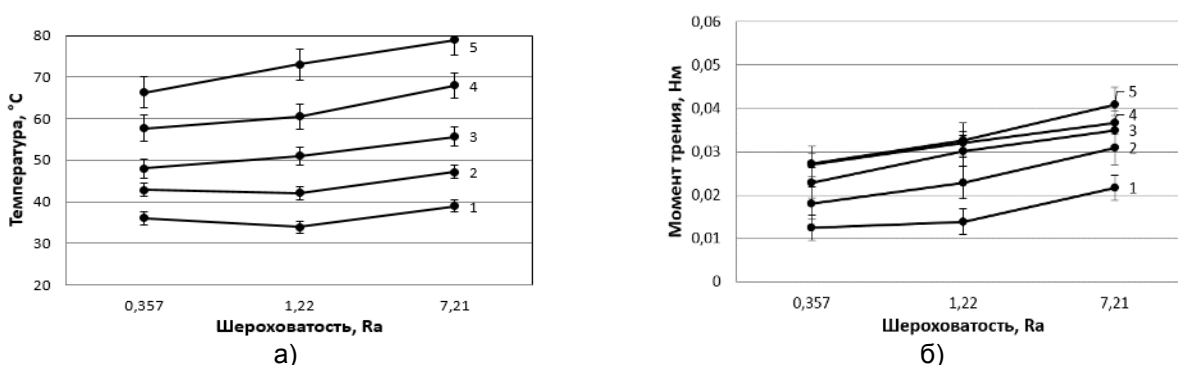


Рис. 7. Зависимости температуры в МЖГ (а) и момента трения (б) от шероховатости поверхности втулки при использовании полюса (сталь 3; $Ra = 3,301$ мкм) и частоте вращения вала: 1 – 556 об/мин; 2 – 1146 об/мин; 3 – 1793 об/мин; 4 – 2331 об/мин; 5 – 2897 об/мин (на 30-й минуте работы)

С увеличением времени работы уплотнения происходит вязкостный разогрев МЖ, температура повышается. Чем выше частота вращения, тем сильнее разогрев. Так, при повышении частоты вращения с 556 до 2897 об/мин, т.е. в 5,21 раза, температура МЖГ повышается более, чем в 2 раза (с 33–38 до 67–78 °С). Чем выше температура, тем меньше вязкость и момент трения. Так, при повышении температуры на 50 °С момент трения может снизиться до 3 раз. При повышении частоты вращения в 5,21 раза (с 556 до 2897 об/мин) момент трения повышается в 1,85–2,2 раза. Так как вязкость МЖ с изменением частоты вращения и температуры меняется нелинейно, разогрев во времени тоже меняется нелинейно. Зависимости момента трения от температуры и частоты вращения нелинейные. Использование контактирующих поверхностей с разной шероховатостью вызывает изменение температуры и момента трения в разной степени. Например, при повышении шероховатости поверхности с 0,357 до 7,21 мкм темпе-

ратура МЖГ может повыситься до 20 %, а момент трения – до 55 %.

Новизна полученных результатов заключается в установлении нелинейных зависимостей возрастания момента трения и разогрева МЖГ от шероховатости поверхностей вала и полюса, частот вращения вала электродвигателя, внешней температуры. Практическая ценность заключается в созданной экспериментальной установке, которая позволяет проводить исследования влияния изменения конструктивных и режимных параметров на эксплуатационные показатели МЖГ, а также в установлении пределов возрастания момента трения и разогрева МЖГ от шероховатости поверхностей.

Выводы. Полученные виртуальные модели зазоров МЖГ позволяют визуально оценить шероховатость поверхностей. Определены увеличения площади контакта МЖ с поверхностями вала и полюсов МЖГ при разных шероховатостях поверхностей.

Разработанная экспериментальная установка позволяет проводить исследования влияния изменения конструктивных (за-

зора, шероховатости и волнистости поверхностей, напряженности магнитного поля, вязкости МЖ) и режимных (частоты вращения вала, температуры) параметров на эксплуатационные показатели (момент трения и разогрев) МЖГ.

Полученные нелинейные зависимости и пределы изменения момента трения и температуры МЖГ в зависимости от величины шероховатости поверхностей полюсов и втулок из разных материалов, контактирующих с МЖ, частот вращения вала электродвигателя, внешней температуры могут быть полезны специалистам при разработке МЖГ валов электродвигателей, работающих в тяжелых и ответственных условиях.

Список литературы

1. **Герметизаторы** на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, Ю.И. Страдомский, С.М. Перминов. – Иваново, 2010. – 184 с.

2. **Радионон А.В., Виноградов Н., Казакуца А.В.** Магнитоожидкостные герметизаторы подшипниковых узлов электродвигателей ВАО // XVI Междунар. Плесская конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям: сб. науч. тр. – Иваново, 2014. – С. 335–339.

3. **Радионон А.В., Виноградов Н., Казакуца А.В.** Магнитоожидкостные герметизаторы подшипниковых узлов центробежных насосов // XV Междунар. Плесская конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям: сб. науч. тр. – Иваново, 2012. – С. 243–249.

4. **Магнитоожидкостные** герметизаторы для подшипниковых узлов электродвигателей шахтных комбайнов / А.В. Радионон, А.Н. Виноградов, А.В. Казакуца и др. // XIV Междунар. Плесская конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям: сб. науч. тр. – Иваново, 2010. – С. 354–360.

5. **Krakov M.S., Nikiforov I.V.** Effect of diffusion of magnetic particles on the parameters of the magnetic fluid seal // *Magnetohydrodynamics*. – 2014. – Vol. 50, no 1. – P. 35–44.

6. **Краков М.С., Никифоров И.В.** Влияние неоднородного нагрева на стабильность параметров и ресурс магнитоожидкостных уплотнений // XVI Междунар. Плесская конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям: сб. науч. тр. – Иваново, 2014. – С. 330–335.

7. **Zhang H.N., Li D.C.** Analysis and Experimental Study on Magnetic Fluid Seal Mechanism // *Key Engineering Materials*. – 2012. – Vol. 492. – P. 273–276.

8. **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.

9. **Лазарев В.Е., Грамм М.И., Лазарев Е.А.** Математическая модель шероховатой поверхности контактного трибосопротивления // *Вестник ЮУрГУ*. – 2006. – № 11. – С. 54–58.

10. **Войнов К.Н., Хоодаковский В.А., Шварц М.А.** Математическое моделирование шероховатых поверхностей // Трение, износ, смазка. – 2009. – № 41. – С. 1–9.

11. **Грязев В.М.** Моделирование реальной поверхности деталей // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2013. – Вып. 1. – С. 192–200.

12. **Власов А.М., Полетаев В.А., Пахолкова Т.А.** Установка для исследования эксплуатационных характеристик магнитоожидкостных герметизаторов // *Вестник УГАТУ*. – 2017. – Т. 21, № 2. – С. 17–23.

13. **Магнитные жидкости**, выпускаемые в ПНИЛ ПФГД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ispu.ru/node/5799>.

References

1. Kazakov, Yu.B., Morozov, N.A., Stradomskiy, Yu.I., Perminov, S.M. *Germetizatory na osnove nanodispersnykh magnitnykh zhidkostey i ikh modelirovanie* [Seals based on nanodispersed magnetic fluids and their modelling]. Ivanovo, 2010. 184 p.

2. Radionov, A.V., Vinogradov, N., Kazakutsa, A.V. Magnitozhidkostnye germetizatory podshpnikovoykh uzlov elektrodvigatelay VAO [Magnetic fluid seals of the bearing units of BAO electric motors]. *Sbornik nauchnykh trudov XVI Mezhdunarodnoy Plesskoy konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam* [Collected works of the XVI International Plyos conference on nanodispersed magnetic fluids]. Ivanovo, 2014, pp. 335–339.

3. Radionov, A.V., Vinogradov, N., Kazakutsa, A.V. Magnitozhidkostnye germetizatory podshpnikovoykh uzlov tsentrobezhnykh nasosov [Magnetic fluid seals of the bearing units of centrifugal pumps]. *Sbornik nauchnykh trudov XV Mezhdunarodnoy Plesskoy konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam* [Collected works of the XV International Plyos conference on nanodispersed magnetic fluids]. Ivanovo, 2012, pp. 243–249.

4. Radionov, A.V., Vinogradov, A.N., Kazakutsa, A.V., Solovey, O.V., Gasyuk, A.A. Magnitozhidkostnye germetizatory dlya podshpnikovoykh uzlov elektrodvigatelay shakhtnykh kombaynov [Magnetic fluid seals of the bearing units of road-heading machine electric motors]. *Sbornik nauchnykh trudov XIV Mezhdunarodnoy Plesskoy konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam* [Collected works of the XIV International Plyos conference on nanodispersed magnetic fluids]. Ivanovo, 2010, pp. 354–360.

5. Krakov, M.S., Nikiforov, I.V. Effect of diffusion of magnetic particles on the parameters of the

magnetic fluid seal. *Magnetohydrodynamics*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 35–44.

6. Krakov, M.S., Nikiforov, I.V. Vliyanie neodnorodnogo nagreva na stabil'nost' parametrov i resurs magnitozhidkostnykh uplotneniy [Effects of non-uniform heating on the magnetic fluid seal parameters stability and life]. *Sbornik nauchnykh trudov XVI Mezhdunarodnoy Plesskoy konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam* [Collected works of the XVI International Plyos conference on nanodispersed magnetic fluids]. Ivanovo, 2014, pp. 330–335.

7. Zhang, H.N., Li, D.C. Analysis and Experimental Study on Magnetic Fluid Seal Mechanism. *Key Engineering Materials*, 2012, vol. 492, pp. 273–276.

8. Poletaev, V.A., Vlasov, A.M., Pakholkova, T.A. Raschet fakticheskoy ploshchadi kontakta v podshipnikakh skol'zheniya pri gidrodinamicheskoy (zhidkostnoy) smazke [Calculation of the actual contact area in plain bearings for hydrodynamic (fluid film) lubrication]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmkh*, 2014, no. 11, pp. 26–31.

9. Lazarev, V.E., Gramm, M.I., Lazarev, E.A. Matematicheskaya model' sherokhovatoy poverkh-

nosti kontaktnogo tribosoprotivleniya [A mathematical model of the rough surface contact tribo-resistance]. *Vestnik YuUrGU*, 2006, no. 11, pp. 54–58.

10. Voynov, K.N., Khodakovskiy, V.A., Shvarts, M.A. Matematicheskoe modelirovanie sherokhovatykh poverkhnostey [Mathematical modelling of rough surfaces]. *Trenie, iznos, smazka*, 2009, no. 41, pp. 1–9.

11. Gryazev, V.M. Modelirovanie real'noy poverkhnosti detaley [Modelling of the real surface]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2013, issue 1, pp. 192–200.

12. Vlasov, A.M., Poletaev, V.A., Pakholkova, T.A. Ustanovka dlya issledovaniya ekspluatatsionnykh kharakteristik magnitozhidkostnykh germetizatorov [A unit for studying operation characteristics of magnetic fluid seals]. *Vestnik UGATU*, 2017, vol. 21, no. 2, pp. 17–23.

13. Magnitnye zhidkosti, vypuskaemye v PNIL PFGD [Magnetic fluids produced at PNIL PFGD]. Available at: <http://ispu.ru/node/5799>.

Власов Алексей Михайлович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, телефон (4932) 26-97-73.

Vlasov Aleksei Mikhailovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of the Machine-Building Technology Department, telephone (4932) 26-97-73.

Казаков Юрий Борисович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электромеханики, телефон (4932) 26-97-06.

Kazakov Yuri Borisovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (post-doctoral degree), Professor, Head of the Electromechanics Department, telephone (4932) 26-97-06.

Поletaев Владимир Алексеевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, телефон (4932) 26-97-73.

Poletaev Vladimir Alekseyevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (post-doctoral degree), Professor of the Machine-Building Technology Department, telephone (4932) 26-97-73.