

УДК 621.313

## Определение момента трения магнитожидкостного герметизатора с неоднородным магнитным полем на основе численного моделирования движения магнито реологической жидкости

Ю.Б. Казаков, В.А. Полетаев, доктора техн. наук, Т.А. Пахолкова, соиск.

Выполнено определение собственного момента трения магнитожидкостного герметизатора на основе численного моделирования распределения скоростей течения нанодисперсной магнитной жидкости с нелинейными магнитной и реологической характеристиками в условиях неоднородного магнитного поля в зазоре герметизатора. Представлены алгоритм и результаты расчетов, а также экспериментальная установка для опытного определения собственных моментов трения герметизаторов.

*Ключевые слова:* момент трения, магнитная жидкость, магнитная реология, установка.

## Defining Friction Moment of Magnetic Liquid Sealer with Dissimilar Magnetic Field on basis of Numerical Modeling of Magnetorheological Fluid Motion

Yu. B. Kazakov, Doctor of Engineering, V.A. Poletaev, Doctor of Engineering, T.A. Paholkova, Applicant

The authors determine the friction moment of magnetic liquid sealer on basis of the numerical modeling of the sharing the velocities of the current nano dispersion to magnetic liquid with nonlinear magnetic and rheology feature in condition of the inhomogeneous magnetic field in the sealer clearance. The algorithm and calculation results as well as an experimental unit for detecting friction moments of sealers are considered.

*Keywords:* friction moment, magnetic liquid, magnetic rheology, unit.

В рабочем режиме магнитожидкостного герметизатора (МЖГ) при вращении вала возникает азимутальное вязкое течение магнитной жидкости (МЖ), которое определяет показатели герметизатора: момент страгивания  $M_{СТ}$ , момент трения  $M$  при вращении вала и мощность потерь  $P$ . Для МЖ с нелинейной реологической характеристикой две последние величины нелинейно зависят от частоты вращения вала  $n$ . Кроме того, при вращении вследствие вязкого трения слоев МЖ в ней возникают потери. Локальные тепловыделения определяются динамической вязкостью и градиентом скорости течения МЖ. Чрезмерный разогрев интенсифицирует испарение МЖ, способствует ее разрушению, снижает ресурс работы МЖГ. Таким образом, анализ гидродинамического состояния, определение  $M_{СТ}$ ,  $M$  и  $P$ , их изменений, меры возможного снижения являются важными задачами при разработке МЖГ.

Нахождение распределения поля скоростей течения псевдопластичной МЖ в зазоре МЖГ с вращающимся валом осложняется неравномерностью зазора, наличием зубчатых структур сердечника и вала, вызывающих неоднородное распределение нелинейного магнитного поля в зазоре, заранее неизвестным положением МЖ-пробки, нелинейностями характеристик намагничивания, магнито реологических характеристик МЖ – зависимостью динамической вязкости  $\eta$  от скорости сдвига  $\gamma$  и др.

Проявляющиеся в МЖГ физические поля являются взаимозависимыми, и все они одновременно оказывают влияние на свойства материалов: магнитные, реологические, теплофизические. Например, распределения магнитного и теплового полей зависят от конфигурации

МЖ-пробки, которая, в свою очередь, определяется распределениями магнитного и теплового полей. Магнитные свойства МЖ и постоянных магнитов зависят от температуры, в то время как реологические характеристики, тепловыделения в элементарных объемах и теплофизические свойства МЖ зависят от индукции магнитного поля  $B$  и температуры  $T$ .

Общее соотношение для момента трения имеет вид

$$M = \eta R S v / \delta, \quad (1)$$

где  $\eta$  – динамическая вязкость;  $R$  – радиус вращающегося вала;  $S$  – площадь соприкосновения МЖ с валом;  $v$  – окружная скорость вращения вала;  $\delta$  – зазор.

Площадь соприкосновения  $S$  зависит от формы и положения МЖ-пробки, которые определяются распределением магнитного поля, перепадом давления и температурой. Магнитная проницаемость  $\mu$  зависит от магнито гидродинамического состояния МЖ, которое, в свою очередь, зависит от распределения поля скоростей течения МЖ с нелинейной магнито реологической характеристикой. Желательно иметь для определения момента трения  $M$  и потерь мощности  $P$  в зависимости от частоты вращения вала  $n$  корректный алгоритм, учитывающий изменения магнитного состояния МЖГ, перепад давления, нелинейность магнито реологических характеристик МЖ [1].

Моделирование гидродинамического состояния МЖГ целесообразно осуществлять численными методами на основе полевых моделей, содержащих множество элементов. Расчет распределения поля скоростей течения МЖ в зазоре можно проводить в плоскомеридианном сечении

МЖГ в осях  $r, z$  для функции  $\varphi = r \cdot v$ , где  $v$  – азимутальная (по угловой координате  $\theta$ ) и единственная составляющая вектора скорости течения МЖ  $\vec{v}$ . Выбор функции  $\varphi$  для поля скоростей течения обуславливается тем, что дифференциальное уравнения приобретает симметрию относительно координат  $r$  и  $z$ .

При постановке задачи расчета сдвигового течения вязкой МЖ в зазоре считаем ее несжимаемой жидкостью, течение в зазоре осесимметричным, стационарным и ламинарным. При записи уравнения равновесия сил, действующих на МЖ, для азимутальной составляющей  $v$  учтем, что кинетическая энергия для установившегося течения не изменяется. Вследствие осевой симметрии МЖГ магнитная сила не имеет азимутальной составляющей. Пренебрегаем гравитационными силами. В таком случае сила вязкого трения будет уравновешивать составляющую градиента давления  $p$  в азимутальном направлении. Дифференциальное уравнение течения вязкой МЖ в частных производных принимает вид

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[ \eta \frac{\partial}{\partial r} (\varphi) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \eta \frac{\partial}{\partial z} (\varphi) \right] = - \frac{\partial p}{\partial (r\theta)}. \quad (2)$$

Здесь  $\frac{\partial p}{\partial (r\theta)}$  – составляющая градиента в азимутальном направлении давления в МЖ.

В этом виде уравнение обобщает выше приводимые дифференциальные уравнения. По условиям задачи и в соответствии с принятыми допущениями, имеем  $\frac{\partial v}{\partial \theta} = 0$ . Тогда скорость сдвига

$$\gamma = \sqrt{\left( \frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2}, \quad (3)$$

скорость минимизации

$$Q = \frac{1}{2} \iint_{rz} \left\{ \eta \left( \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 + \eta \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right\} \frac{1}{r} - 2\varphi \frac{\partial p}{\partial (r\theta)} \Bigg\} dz dr. \quad (4)$$

Без наличия источника азимутального напора в МЖ принимаем, что внутреннее давление в азимутальном направлении не изменяется:

$$\frac{\partial p}{\partial (r\theta)} = 0. \quad (5)$$

В этом случае уравнение (2) соответствует уравнению Лапласа.

При низкой объемной концентрации магнитных частиц МЖ ведет себя как ньютоновская жидкость. Вязкость неоднородных систем жидкость – твердое тело, таких как МЖ, увеличивается по сравнению с вязкостью основы из-за взаимодействия на границе раздела сред. При значительных концентрациях магнитных частиц, поскольку МЖ – неоднородная среда с высокой степенью диспергирования твердой фазы, в статическом режиме магнитные частицы образуют структурную сетку, подобную кристаллической решетке в твердом теле. При больших концентрациях магнитных частиц вследствие структу-

рирования МЖ начинает обладать начальным напряжением сдвига  $\tau_0$ . Течение будет происходить при условии, что напряжение сдвига между слоями МЖ больше начального:  $\tau \geq \tau_0$ . В этих условиях МЖ начинает вести себя как псевдопластичное тело с эффективной динамической вязкостью, зависящей от скорости сдвига, определяемой градиентом скорости течения.

Поведение МЖ тем сильнее отличается от поведения ньютоновской жидкости, чем меньше градиент скорости сдвига  $\gamma$ , больше концентрация магнитных частиц и выше индукция магнитного поля  $B$ , в котором происходит течение МЖ (рис. 1). С ростом концентрации магнитных частиц значения величин  $\tau_0, \tau$  и  $\eta$  возрастают с ростом магнитной индукции  $B$ , усиливающей структурное взаимодействие магнитных частиц, и уменьшаются с ростом температуры. Динамическая вязкость в магнитном поле возрастает также вследствие торможения вращения частиц при воздействии на них момента сил в магнитном поле.

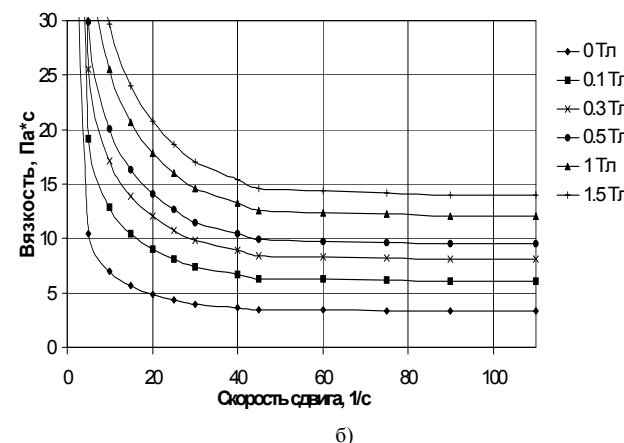
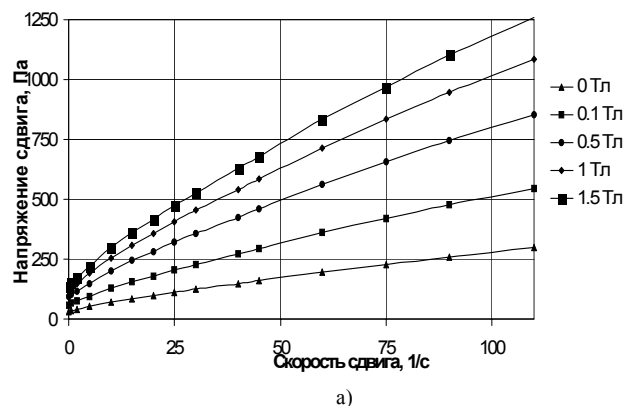


Рис. 1. Характеристики МЖ: а – магнитореологические; б – магнитовязкостные

Исследуем МЖ на основе магнетита и кремнийорганической жидкости при объемной концентрации магнитных частиц 0,06. Нелинейная реологическая характеристика МЖ аппроксимирована кубическими сплайнами. Если известны нелинейные магнитореологические характеристики  $\tau = f(\gamma, B)$  (рис. 1,а), то  $\eta = \tau/\gamma = f(\gamma, B)$ .

Можно принять, что изменения  $\tau_0$ ,  $\tau$  и  $\eta$  пропорциональны изменению квадратного корня из магнитной индукции в МЖ. Для выбранной МЖ влияние индукции магнитного поля учтено в следующем виде:

$$\tau|_{B>0} = \tau|_{B=0} (1 + 2,65\sqrt{B}); \quad (6)$$

$$\eta|_{B>0} = \eta|_{B=0} (1 + 2,65\sqrt{B}); \quad (7)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \gamma}|_{B>0} = (1 + 2,65\sqrt{B}) \frac{\partial \eta}{\partial \gamma}|_{B=0}, \quad (8)$$

где индукция  $B$  задается в Тл.

Увеличение  $\gamma$  приводит к разрушению упорядоченных структур в МЖ и, как следствие, к уменьшению  $\eta$  (рис. 1,б). При больших  $\gamma$  все структуры в МЖ разрушены и  $\eta$  достигает минимума. При увеличении  $\gamma$  до  $100 - 1000 \text{ с}^{-1}$  становится справедливым соотношение  $\tau \sim \gamma^{0,9}$ . При дальнейшем увеличении  $\gamma$  поведение МЖ приближается к поведению ньютоновской жидкости и  $\tau \sim \gamma$ . С увеличением  $\gamma$  выше  $1000 \text{ с}^{-1}$  в присутствии магнитного поля вязкость МЖ несколько уменьшается вследствие превалирования вращения частиц под действием вязких сил над ориентирующим действием магнитного поля.

Потери  $P$  включают в себя затраты энергии на гидродинамические потери и затраты энергии на разрушение структурной сетки. Гидродинамические потери обусловлены вязкостными свойствами МЖ. Они отсутствуют при  $n = 0$ . С увеличением частоты вращения  $n$  гидродинамическая составляющая момента трения  $M$  возрастает. Растут и потери, причем с увеличением  $n$  они возрастают в большей степени, чем гидродинамический момент трения:

$$P = M\omega, \quad (9)$$

где  $\omega$  – угловая частота вращения.

Составляющая  $M$ , идущая на преодоление межчастичного взаимодействия структурной сетки, с увеличением  $\omega$  уменьшается вследствие разрушения структур. Максимальная структурная составляющая момента соответствует моменту страгивания вала  $M_{CT}$  при  $n = 0$ . При достижении определенной частоты вращения  $n$  структура МЖ разрушается полностью и структурная составляющая момента исчезает. Для МЖ на магнетите угловая скорость  $\omega$ , при которой структура МЖ разрушается полностью, не превышает  $1 \text{ рад/с}$ , что соответствует  $9,55 \text{ об/мин}$ . Чем выше индукция  $B$ , тем больше  $n$  и, соответственно,  $\omega$ , при которой структура МЖ разрушается полностью.

Таким образом, момент трения МЖГ с псевдопластичной МЖ как сумма моментов на преодоление структуры МЖ и гидродинамического момента имеет минимум при некоторой частоте вращения вала  $n$ .

Для расчета гидродинамического состояния МЖГ предварительно с использованием адаптивных конечно-элементных сеток по результатам расчета магнитного поля МЖГ должно быть вы-

полнено численное определение положения и формы МЖ-пробки, например, при критическом удерживаемом перепаде давления. Найденная область МЖ-пробки со значениями индукций в элементах вычленяется из общей конечно-элементной модели МЖГ и передается в подсистему расчета поля скоростей течения псевдопластичной МЖ в плоскомеридианном сечении МЖГ (рис. 2). Использовались модели, содержащие десятки тысяч конечных элементов.

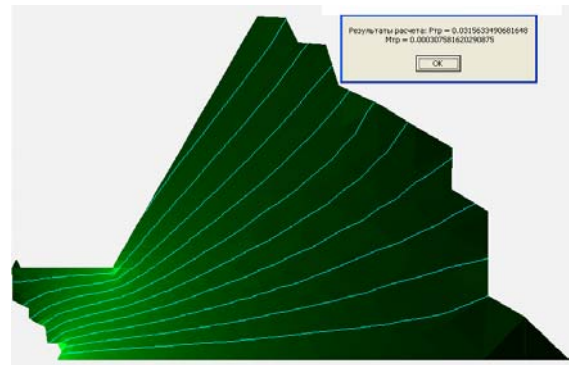


Рис. 2. Линии равных скоростей течения МЖ, мощность потерь на вязкое трение и момент трения

На поверхностях обеих, возможно зубчатых, с изменяемой радиальной координатой, сердечников, формирующих зазор, задаются их скорости вращения  $n_1$  и  $n_2$ . Эти скорости выступают в виде заданных граничных условий области расчета МЖ на границах соприкосновения сердечников с МЖ-пробкой. На свободных поверхностях МЖ-пробки заданы нулевые нормальные производные скорости течения МЖ  $\frac{\partial v}{\partial n} = 0$ , где  $n$  – нормаль к границе свободной поверхности МЖ, а не только по координате.

В результате решения гидродинамической задачи (рис. 3) каждый узел конечно-элементной сетки магнитожидкостной пробки имеет свою скорость течения  $v$ , каждый элемент  $L$  – скорость сдвига  $\gamma_L$  и динамическую вязкость  $\eta_L$ , определяемую своей точкой на магнито-реологической характеристике при заданной индукции  $B_L$ .

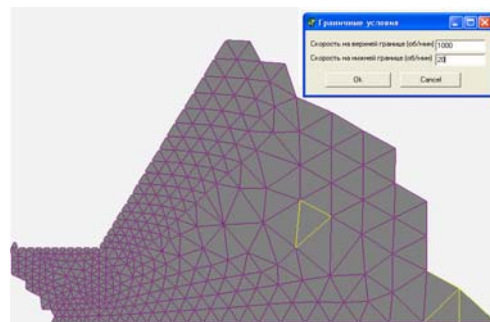


Рис. 3. Гидродинамическая конечно-элементная модель

Мощность тепловых потерь  $P_L$ , выделяемых в единице объема элемента  $L$  МЖ-пробки, рассчитывается по формуле

$$P_L = \frac{\eta_L \gamma_L^2}{2}. \quad (10)$$

Индукция магнитного поля через влияние на вязкость МЖ  $\eta$  определяет, в том числе, выделяемые в жидкости потери. Собственный момент трения МЖГ определяем энергетическим методом. Считаем, что мощность  $P$ , выделяемая при вязком трении слоев в МЖ-пробке, как сумма мощностей во всех  $L = 1, 2, \dots$  конечных элементах МЖ с площадями  $S_L$  покрывается механической мощностью, поступающей от вращающихся частей МЖГ:

$$P = \frac{1}{2} \sum_{L=1}^E S_L 2\pi r_{Lcp} \eta_L \gamma_L^2. \quad (11)$$

Тогда собственный момент трения МЖГ равен  $M_{TP} = P/\omega$ .

Полученная картина распределения поля скоростей течения МЖ соответствует физическим представлениям. Диапазон разброса скоростей сдвига по сечению МЖ пробки для рассмотренной задачи составил от 80 до 40000  $\text{с}^{-1}$ , диапазон разброса значений динамической вязкости элементов МЖ – от 81 до 28 Па·с. В то же время возрастание скорости сдвига в элементах МЖ, расположенных в узкой части зазора, приводящее к снижению динамической вязкости, сопровождается повышением в этих элементах индукции магнитного поля, что, в свою очередь, ведет к увеличению динамической вязкости. Значительный разброс значений скоростей течения по объему МЖ подчеркивает целесообразность конечно-элементного моделирования магнитогидродинамического состояния МЖГ с учетом нелинейности реологической характеристики МЖ и представления герметизатора с МЖ-пробками точной геометрической моделью.

Проведены расчетные исследования на однозубцовом МЖГ с постоянными магнитами разных марок, но одинаковых размеров: 28БА190 ( $B_r = 0,4$  Тл,  $H_{CB} = 182,5$  кА/м), КС37 ( $B_r = 0,77$  Тл,  $H_{CB} = 540$  кА/м), NdFeB ( $B_r = 1,4$  Тл,  $H_{CB} = 720$  кА/м). Полученные картины распределения поля скоростей течения МЖ соответствуют физическим представлениям. Возрастание  $\gamma$  в элементах МЖ, расположенных в узкой части зазора, приводящее к снижению  $\eta$ , сопровождается повышением в этих элементах  $B$ .

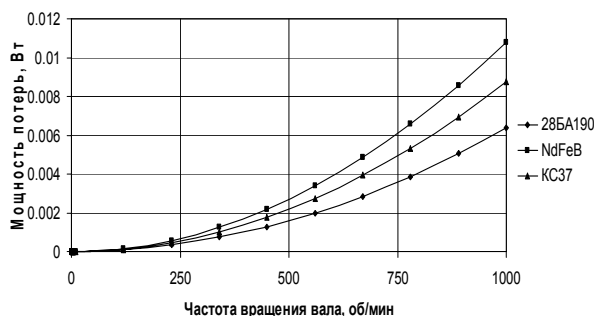


Рис. 4. Зависимость мощности потерь трения от частоты вращения МЖГ

На рис. 4 представлена зависимость  $P$  от  $n$  для разных магнитов.

Очевидно, что магнит NdFeB в силу наиболее сильных магнитных свойств создает большую магнитную индукцию в МЖ, что приводит к возрастанию вязкости МЖ и потерь трения. Сама зависимость  $P = f(n)$  носит параболический характер.

На рис. 5 представлено изменение момента трения  $M_{TP}$  при малых  $n$ . Наблюдается минимальность  $M_{TP}$  при частоте  $n \approx 10$  об/мин, соответствующей полному разрушению структур в МЖ. Корректность этого факта подтверждается

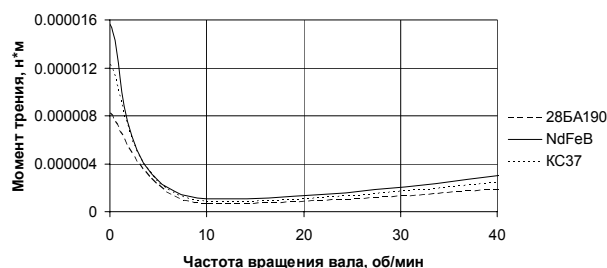


Рис. 5. Изменение момента трения при малой частоте вращения вала МЖГ

опубликованными данными.

На рис. 6 представлено изменение  $M$  при больших  $n$ . Магнит NdFeB, обеспечивающий большую магнитную индукцию в МЖ и, соответ-

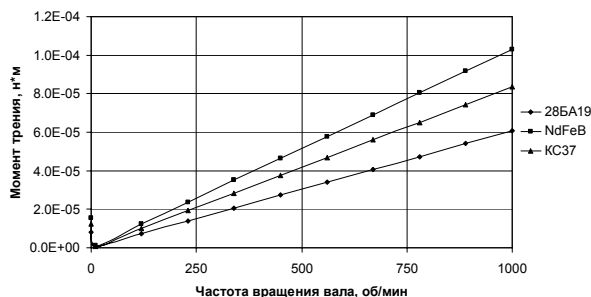


Рис. 6. Зависимость момента трения от частоты вращения вала МЖГ

ственно, большую вязкость, вызывает больший собственный момент трения МЖГ.

В результате выполненных расчетов определен собственный момент трения магнитожидкостного герметизатора на основе численного моделирования распределения скоростей течения нанодисперсной магнитной жидкости с нелинейными магнитной и реологической характеристиками в условиях неоднородного магнитного поля в зазоре герметизатора. В целях исследования влияния размера рабочего зазора на изменение критического перепада давлений и потерь на трение была разработана установка (рис. 7).

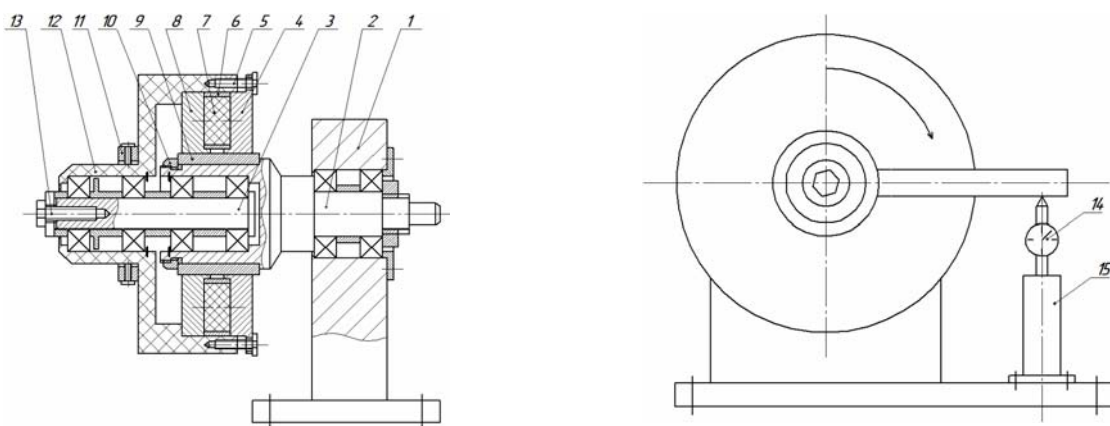


Рис. 7. Схема экспериментальной установки: 1 – стойка; 2 – подвижный вал; 3 – неподвижный вал; 4 – съемный полюс; 5 – болт; 6 – диск; 7 – магнит; 8 – съемный полюс; 9 – сменная втулка; 10 – гайка; 11 – хомут; 12 – корпус; 13 – болт; 14 – индикатор; 15 – опора

На рис. 8 показана фотография экспериментальной установки. Сменные втулки изготовлены из сталей ст. 3, 40Х13, 12Х18Н10Т и при проведении экспериментов приводились во вращение со скоростью 10–5000 об/мин. Сменные полюсы 4 и 8 изготовлены из разных материалов [2].



Рис. 8. Фотография экспериментальной установки

Наружная поверхность сменной втулки 8 обрабатывалась точением, шлифованием и алмазным выглаживанием в целях получения

*Казаков Юрий Борисович,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электромеханики,  
телефон (4932) 26-97-06,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,  
e-mail: elmash@em.ispu.ru

*Полетаев Владимир Алексеевич,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой  
технологии автоматизированного машиностроения,  
телефон (4932) 26-97-72,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,  
e-mail: poletaev@tam.ispu.ru

*Пахолкова Татьяна Александровна,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
соискатель кафедры технологии автоматизированного машиностроения,  
телефон (4932) 26-97-73,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,  
e-mail: tanurah@mail.ru

разной величины шероховатости поверхности, влияющей на величину рабочего зазора между втулкой и полюсами 4 и 8.

Корпус 12 соединяется через хомут 11 с индикатором 14, позволяющим измерять величину момента трения.

На разработанной экспериментальной установке можно проводить исследования: с разной скоростью вращения втулок; магнитами из разных материалов; втулками с разной величиной шероховатости поверхности, позволяющими изменять размер рабочего зазора.

#### Список литературы

1. Казаков Ю.Б., Страдомский Ю.И., Морозов Н.А., Перминов С.М. Герметизаторы на основе нанодispersных магнитных жидкостей и их моделирование / Под общ. ред. Ю.Б. Казакова; ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2010. – 184 с.
2. Полетаев В.А., Малинина Н.В., Казаков Ю.Б. Определение момента трения в магнито-жидкостных уплотнениях: Сб. науч. тр. XIV Междунар. Плесской науч. конф. по нанодispersным магнитным жидкостям. – Плес, 2010. – С. 380–385.