

Исследование магнитожидкостного уплотнения немагнитного вала классического типа

С.М. Перминов, А.С. Перминова
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская федерация
E-mail: psm@upm.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время магнитожидкостные уплотнения немагнитного вала практически не используются из-за низкой удерживающей способности. Повышение эффективности таких уплотнений является актуальной задачей, так как объем применения немагнитных титановых и алюминиевых сплавов в авиационной и космической технике постоянно расширяется.

Материалы и методы: Удерживающая способность магнитожидкостного уплотнения определяется параметрами магнитного поля в рабочем зазоре. Исследование магнитного поля магнитожидкостного уплотнения немагнитного вала выполняется с помощью метода конечных элементов. При моделировании используется дифференцированная конечно-элементная сетка из полумиллиона треугольных элементов, учитывается зависимость нелинейности свойств магнитных материалов от напряженности магнитного поля.

Результаты: Найдено распределение параметров магнитного поля магнитной системы магнитожидкостного уплотнения немагнитного вала классической конструкции. По распределению напряженности магнитного поля в рабочем зазоре уплотнения определена удерживающая способность уплотнения, найдено положение магнитной жидкости в рабочем зазоре. Показано, что увеличение величины рабочего зазора приводит к существенному снижению максимальной напряженности поля и удерживающей способности уплотнения, к изменению характера распределения напряженности поля на поверхности вала, и как следствие, к образованию дополнительного магнитожидкостного кольца. Установлено, что максимальную напряженность поля в рабочем зазоре можно регулировать изменением зазора между концентраторами полюсных приставок. Найдено, что объем магнитной жидкости, необходимый для заправки одного кольца магнитожидкостного уплотнения немагнитного вала, на порядок выше, чем для заправки одного кольца уплотнения магнитного вала.

Выводы: Моделирование выявило основные закономерности распределения параметров магнитного поля магнитной системы магнитожидкостного уплотнения немагнитного вала классической конструкции, что позволило определить удерживающую способность уплотнения, положение и объем магнитной жидкости в рабочем зазоре, влияние величин рабочего и межполюсного зазоров на свойства уплотнения.

Ключевые слова: магнитожидкостное уплотнение, немагнитный вал, магнитное поле, максимально удерживаемый перепад давлений.

Studying of Magnetic Fluid Seal of Nonmagnetic Shaft of Classical Type

S.M. Perminov, A.S. Perminova
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: psm@upm.ispu.ru

Abstract

Background: At present nonmagnetic shaft magnetic fluid seals are not used due to their low retention. Improving the effectiveness of such seals is an important task, as the range of using non-magnetic titanium and aluminum alloys in aviation and space technology is constantly expanding.

Materials and Methods: Retention of magnetic fluid seals is determined by the parameters of the magnetic field in a machining gap. The magnetic field of nonmagnetic shaft magnetic fluid seals is studied by using the finite element method. The simulation employs a differential finite element mesh, consisting of half a million triangular elements, and takes into account the dependence of nonlinearity of magnetic material properties on magnetic field.

Results: The distribution of magnetic field parameters of a magnetic system of a classical nonmagnetic shaft magnetic fluid seal has been found. The seal retention and magnetic fluid position in the machining gap have been determined by the magnetic field distribution in the sealing gap. It has been shown that increasing the machining gap leads to a significant reduction in the maximum field strength and seal retention, as well as to changing magnetic field distribution on the shaft surface, and, as a result, to formation of an additional magnetic fluid ring. It has been found that the maximum magnetic field in the machining gap can be adjusted by changing the gap between the polar attachment hubs, and the volume of magnetic fluid required to fill one magnetic fluid seal of nonmagnetic shaft is much higher than that necessary to fill one ring of a magnetic shaft.

Conclusions: The simulation has revealed the basic characteristics of the distribution of magnetic field parameters of a magnetic system of classical nonmagnetic shaft magnetic fluid seal, which made it possible to determine the sealing retention, position and volume of magnetic fluid in the gap, the influence of the machining gap and the gap between the poles on the seal properties.

Key words: non-magnetic shaft, magnetic fluid seal, magnetic field, maximum retained pressure differential.

Введение. Магнитожидкостные уплотнения (МЖУ) представляют новый самостоятельный класс уплотнений, отличительной особенностью которого является высокий уровень герметичности. По данному параметру они вне конкуренции при решении задач передачи вращательного движения в газовые и вакуумные среды.

МЖУ делятся на два основных типа: для магнитных и немагнитных валов [1]. В МЖУ с магнитным валом вал выполняется из материала с высокой магнитной проницаемостью, магнитный поток уплотнения замыкается через вал, что позволяет сосредоточить в герметизируемом магнитной жидкостью зазоре высокую энергию магнитного поля [2–8]. В МЖУ с немагнитным валом, относительная магнитная проницаемость материала вала равна 1, поэтому существует проблема концентрации магнитной энергии в уплотняемом зазоре между валом и магнитной системой [9–11]. Эксперименты показали, что удерживающая способность МЖУ с немагнитным валом существенно ниже, чем МЖУ с магнитным валом.

В классической конструкции МЖУ немагнитного вала [12] магнитное поле концентрируется между разноименными полюсными приставками у поверхности немагнитного вала (рис. 1). В настоящее время отсутствуют данные о свойствах и технических характеристиках уплотнения.

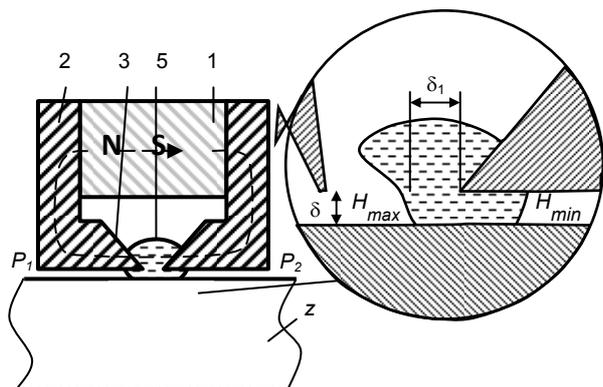


Рис. 1. Магнитожидкостное уплотнение немагнитного вала классической конструкции: 1 – магнит; 2 – полюсные приставки; 3 – концентраторы; 4 – немагнитный вал; 5 – магнитная жидкость

Ниже исследуется распределение магнитного поля в рабочей зоне МЖУ немагнитного вала классического типа, его максимальная удерживающая способность, определены факторы, влияющие на магнитное поле и удерживающую способность уплотнения.

Предмет исследования. Уплотнение немагнитного вала устроено следующим образом. Кольцевой, аксиально намагниченный постоянный магнит 1 служит источником магнитного поля. К торцевым поверхностям магнита примыкают полюсные приставки 2. Полюсные приставки на обращенных друг к другу поверхностях имеют выступы-концентраторы 3, которые сосредотачивают магнитный поток системы около поверхности немагнитного вала 4. В зону повышенной напряженности поля вводится магнитная жидкость 5.

Магнитная жидкость под воздействием магнитного поля создает вокруг немагнитного вала магнитожидкостное кольцо, которое удерживается при любом положении уплотнения в пространстве, при вращении вала, при наличии перепада давлений с противоположных сторон уплотнения. В магнитожидкостном кольце существует повышенное внутреннее давление, обусловленное силами взаимодействия магнитного поля системы с магнитной жидкостью. Внутреннее давление, превышающее давление окружающей среды, в любой точке магнитожидкостного кольца находится по формуле

$$\Delta p = \mu_0 \int_{H_1}^{H_i} M dH, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; M – намагниченность магнитной жидкости; H_1 – напряженность магнитного поля на свободной поверхности магнитожидкостного кольца; H_i – напряженность магнитного поля в рассматриваемой точке внутри магнитожидкостного кольца.

Магнитожидкостное кольцо в рабочем зазоре уплотнения способно удерживать перепад давлений

$$\Delta p = p_1 - p_2, \quad (2)$$

где p_1 и p_2 – давление среды с противоположных сторон магнитожидкостного кольца (рис. 1).

Перепад давлений, при котором происходит пробой кольца, называется максимально удерживаемым или критическим перепадом Δp_{max} . Пробой магнитожидкостного кольца наступает в момент, когда давление среды с одной стороны кольца превышает максимальное давление внутри жидкости, расположенной в зоне зазора:

$$p_1 \geq p_2 + \mu_0 \int_{H_{min}}^{H_{max}} M dH, \quad (3)$$

где H_{min} – напряженность поля на свободной поверхности магнитожидкостного кольца со стороны низкого давления; H_{max} – максимальная напряженность поля внутри магнитожидкостного кольца.

Таким образом, для определения максимальной удерживающей способности магнитожидкостного уплотнения немагнитного вала необходимо знать распределение магнитного поля в области рабочего зазора, магнитные свойства магнитной жидкости и положение границ магнитной жидкости при критическом перепаде давлений.

Магнитное поле в рабочем зазоре уплотнения определяется многими факторами: геометрией магнитной системы и ее отдельных элементов; магнитными свойствами используемых материалов (магнита, полюсных приставок, магнитной жидкости), которые имеют нелинейный характер; величиной рабочего зазора и т.д.

Метод исследования. Исследование магнитного поля МЖУ немагнитного вала проводилось методом математического моделирования магнит-

ных полей. Рассматриваемая конструкция магнитной системы уплотнения показана на рис. 2. В качестве источника магнитного поля используется кольцевой, аксиально намагниченный самарий-кобальтовый магнит КС-37 четвертой группы: длина – 4 мм, наружный диаметр – 34 мм, внутренний – 24 мм. Диаметр уплотняемого вала – 20 мм, рабочий зазор между валом и полюсными приставками – $\delta = 0,05$ мм, зазор между концентраторами полюсных приставок – $\delta_1 = 0,2$ мм (рис. 1). Магнитное поле рассчитывалось методом конечных элементов, расчетная сетка выполнялась из треугольных элементов, что позволило точно воспроизвести границы деталей с различными магнитными свойствами. Использовалась расчетная сетка с переменной плотностью элементов. Размеры элементов сетки менялись в 10^3 раз при переходе от области минимального зазора между концентраторами полюсных приставок к границам расчетной области. Свойства материала постоянного магнита задавались в виде кривой размагничивания (для КС-37 это прямая линия), свойства материала полюсных приставок – в виде кривой намагничивания стали (Ст.3). Магнитные свойства жидкости при расчете магнитного поля не учитывались. Магнитная жидкость в полях высокой напряженности входит в состояние магнитного насыщения, и ее относительная магнитная проницаемость близка к единице. На рис. 2 показаны размеры расчетной области, заданные граничные условия, а также общая картина распределения линий потока магнитного поля, полученная в результате расчета.

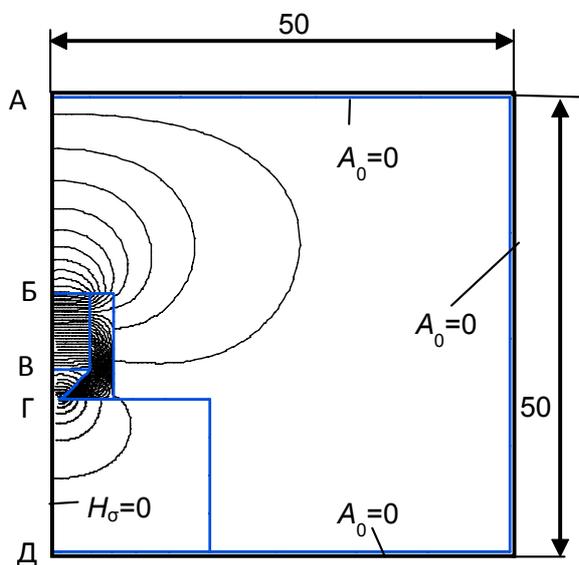


Рис. 2. Расчетная область (A – векторный магнитный потенциал; H_0 – тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля)

Распределение магнитных потоков магнитной системы МЖУ. Картина магнитного поля, представленная на рис. 2, соответствует принципам распространения магнитного поля в пространстве, что подтверждает правильность заложенных исходных данных. Магнитный поток

системы можно разбить на три составляющие: 1 – поток, замыкающийся снаружи магнитной системы (через сечение АБ), он составляет 38 % общего потока; 2 – поток, замыкающийся под магнитом между обращенными друг к другу поверхностями концентраторов полюсных приставок (сечение ВГ), составляет 38 %; 3 – поток, замыкающийся через толщу вала (сечение ГД), составляет 24 %. Поток 3 проходит через зазор между валом и полюсными приставками, его можно считать рабочим, так как он определяет удерживающую способность уплотнения.

Распределение напряженности поля в рабочем зазоре уплотнения. Удерживающая способность МЖУ, согласно формуле 3, определяется распределением напряженности магнитного поля в рабочем зазоре уплотнения между полюсными приставками и валом. На рис. 3 показано распределение напряженности поля на поверхности немагнитного вала.

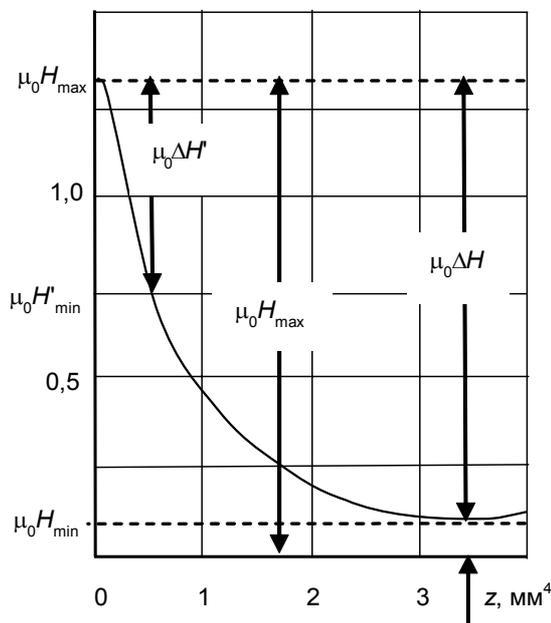


Рис. 3. Распределение напряженности магнитного поля по поверхности вала

Напряженность имеет максимум в области зазора между концентраторами полюсных приставок δ_1 и плавно уменьшается при удалении от центра магнитной системы. В зазоре уплотнения образуется одно магнитожидкостное кольцо. Его удерживающая способность определяется разностью экстремальных значений напряженности на свободных поверхностях магнитожидкостного кольца в зазоре – ΔH . При критическом перепаде давления одна из свободных поверхностей магнитожидкостного кольца совпадает с зоной максимальной напряженности магнитного поля, положение второй свободной поверхности зависит от объема магнитной жидкости в зазоре. При оптимальном объеме заправки вторая свободная поверхность магнитожидкостного кольца совпадает с зоной расположения H_{min} . При меньшем объеме жидкости вторая свободная поверхность кольца

смещается влево, допустим, в точку H_{\min}^* , перепад напряженности уменьшается до ΔH^* , соответственно уменьшается и максимально удерживаемый перепад давлений.

Влияние величины рабочего зазора δ на максимальную напряженность поля на поверхности вала и удерживающую способность МЖУ. При увеличении зазора между валом и полюсными приставками магнитной системы уменьшается напряженность поля на поверхности вала. Наиболее ощутимо снижается максимальная напряженность поля H_{\max} (рис. 4). Так, в диапазоне изменения δ от 0,05 до 0,2 мм максимальная напряженность поля снижается на 46 %, тогда как минимальная – только на 3 %. В результате падения ΔH снижается критический перепад давлений. Следовательно, при создании МЖУ в целях повышения удерживаемого перепада давлений необходимо стремиться к уменьшению величины рабочего зазора.

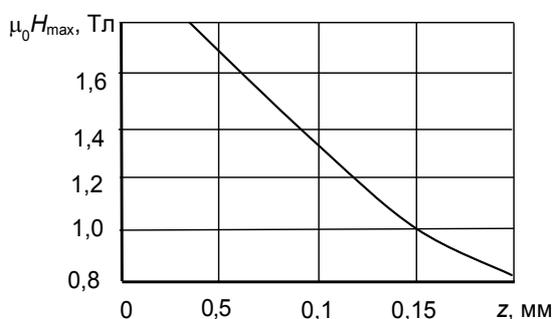


Рис. 4. Зависимости максимальной напряженности поля от величины рабочего зазора

Исследование магнитного поля в рабочем зазоре показало также, что величина δ влияет не только на абсолютную величину максимальной напряженности поля, но и на характер распределения напряженности на поверхности вала. Наибольшие отличия наблюдаются в области зазора между концентраторами полюсных приставок. На рис. 5 показаны кривые распределения напряженности поля на поверхности вала при рабочем зазоре $\delta = 0,01, 0,03, 0,05, 0,1$ мм. При зазорах менее 0,05 мм на кривых напряженности поля проявляются горбы, лежащие напротив острых кромок концентраторов полюсных приставок. Величина каждого горба растет с уменьшением рабочего зазора. Указанные кривые распределения напряженности поля в зазоре, имеющие значительные отличия в области острых кромок концентраторов полюсных приставок, практически сливаются по краям магнитной системы в области H_{\min} . Появление горбов на кривой распределения напряженности в зазоре приводит к появлению второго дополнительного магнитожидкостного кольца в режиме критического перепада давлений. Дополнительное кольцо значительно меньше по размерам основного кольца, воспринимает определенный перепад давлений, но значительно меньший, чем основное кольцо. В рассматриваемом уплотнении при рабочем

зазоре 0,01 мм дополнительное кольцо дает прибавку к основному кольцу около 19 % пробивного давления.

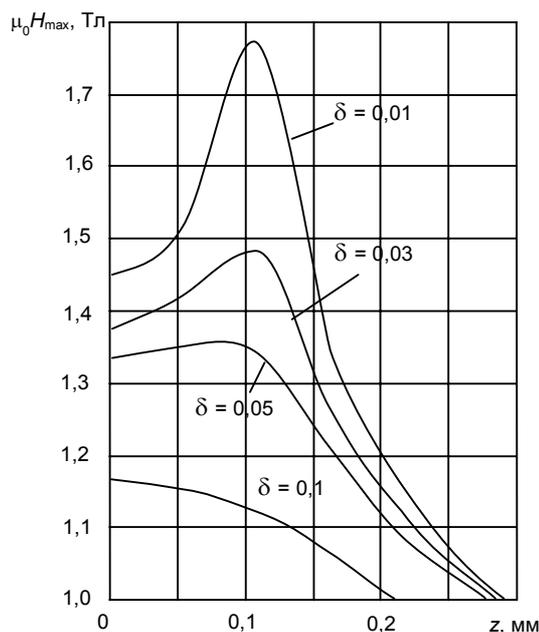


Рис. 5. Распределение напряженности поля на поверхности вала при различной величине рабочего зазора

Влияние величины зазора между концентраторами полюсных приставок на максимальную напряженность поля в рабочем зазоре. На рис. 6 приведены зависимости максимальной напряженности поля на поверхности вала от величины рабочего зазора при разных зазорах между концентраторами полюсных приставок. Анализ зависимостей показывает, что максимальную напряженность поля в рабочем зазоре можно регулировать изменением зазора между концентраторами полюсных приставок δ_1 . Можно также предположить, что для каждой величины рабочего зазора δ существует оптимальное значение зазора между полюсными наконечниками δ_1 , при котором H_{\max} достигает максимума.

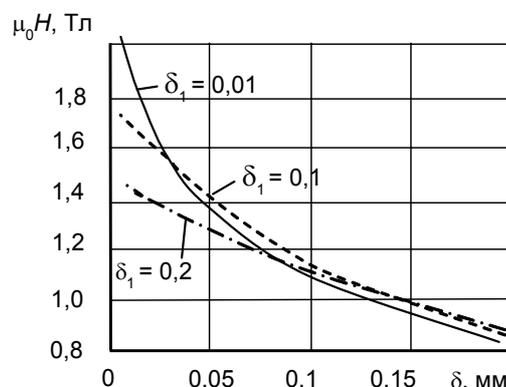


Рис. 6. Зависимости максимальной напряженности поля от величины зазора между концентраторами

Роль объема магнитной жидкости в рабочем зазоре. МЖУ немагнитного вала имеет, как правило, всего одно магнитожидкостное

кольцо. Объем жидкости, заправляемый в это кольцо для удержания максимального критического перепада давлений значительный. Если сравнивать объем кольца МЖУ немагнитного вала с объемом кольца МЖУ магнитного вала, то первый примерно в 10 раз больше. Это объясняется тем, что жидкость расходуется не только на заполнение зазора между полюсными приставками и валом, но и на заполнение пространства между концентраторами полюсных приставок, где напряженность магнитного поля высокая. Вводимая в уплотнение магнитная жидкость в первую очередь заполняет зону высокой напряженности поля между концентраторами полюсных приставок и только после этого рабочий зазор. Присутствие в МЖУ немагнитного вала свободного объема между концентраторами полюсных приставок обуславливает наличие скачка в точке А на кривой зависимости удерживаемого перепада давлений от объема магнитной жидкости (рис. 7). Скачок в точке А соответствует моменту полного заполнения пространства между концентраторами полюсных приставок, после чего вводимая в уплотнение жидкость идет только на заполнение рабочего зазора.

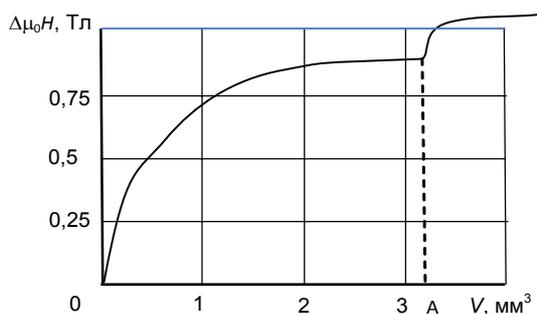


Рис. 7. Зависимость максимально удерживаемого давления от объема магнитной жидкости

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. МЖУ немагнитного вала классической конструкции имеет одно магнитожидкостное кольцо, по удерживающей способности сравнимое с магнитожидкостным кольцом МЖУ магнитного вала.

2. Наиболее эффективный способ повышения критического перепада давлений кольца – уменьшение величины зазора между немагнитным валом и магнитной системой.

3. При заданной величине рабочего зазора повысить критический перепад давлений магнитожидкостного кольца возможно путем изменения зазора между концентраторами полюсных приставок.

4. Объем магнитной жидкости, необходимый для заправки одного кольца МЖУ немагнитного вала, на порядок выше, чем объем кольца МЖУ магнитного вала.

Список литературы

1. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование / Ю.Б. Казаков, Н.А. Морозов, Ю.И. Страдомский, С.М. Перминов; Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2010. – 184 с.
2. Казаков Ю.Б., Перминов С.М. Усовершенствованные наноманнитожидкостные герметизаторы // Вестник ИГЭУ. – 2006. – № 3. – С. 31–32.
3. Исследование магнитного поля рабочего зазора магнитожидкостного герметизатора классической конструкции / В.А. Полетаев, С.М. Перминов, Т.А. Пахолкова, А.С. Перминова // Вестник ИГЭУ. – 2011. – № 5. – С. 42–45.
4. Перминов С.М. Исследование торцевого магнитожидкостного герметизатора методом математического моделирования // Вестник ИГЭУ. – 2012. – № 5. – С. 36–39.
5. Перминов С.М. Исследование кромочных эффектов магнитного поля с учетом нелинейных свойств магнитных материалов методом математического моделирования // Вестник ИГЭУ. – 2011. – № 4. – С. 30–32.
6. Полетаев В.А., Перминов С.М., Пахолкова Т.А. Роль площадки на острие зубца в формировании магнитного поля и удерживающей способности рабочего зазора магнитожидкостного уплотнения // Вестник ИГЭУ. – 2011. – № 5. – С. 32–34.
7. Перминов С.М. Исследование распределения напряженности магнитного поля и магнитных потоков в магнитожидкостном герметизаторе классической конструкции // Вестник ИГЭУ. – 2012. – № 6. – С. 32–36.
8. Перминов С.М. Использование кромочной энергии магнитного поля для повышения эффективности магнитных систем электромеханических устройств // Вестник ИГЭУ. – 2012. – № 3. – С. 28–31.
9. Перминов С.М., Перминова А.С. Разработка и исследование нового способа герметизации магнитной жидкостью зазоров с поверхностями из немагнитных материалов // Сборник науч. тр. XIV Междунар. Плесской конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям, Россия, Плес, 2010. – Иваново, 2010. – С. 402–404.
10. Пат. 2458271 Российская Федерация МПК F 16 J 15/40. Магнитожидкостное уплотнение немагнитного вала / С.М. Перминов, А.С. Перминова. Оpubл. 10.08.2012, Бюл. №23.
11. Пат. 2407936 Российская Федерация МПК F 16 J 15/53. Магнитожидкостное уплотнение немагнитного вала / С.М. Перминов, А.С. Перминова, Ю.Б. Казаков. Оpubл. 20.08.2010, Бюл. №23.
12. Фертман В.Е. Магнитные жидкости – естественная конвекция и теплообмен. – Минск: Наука и техника, 1978. – 207 с.

References

1. Kazakov, Yu.B., Morozov, N.A., Stradomskiy, Yu.I., Perminov, S.M. *Germetizatory na osnove nanodispersnykh magnitnykh zhidkostey i ikh modelirovanie* [Sealers Based on Nano-Dispersed Magnetic Fluids and Their Simulation]. Ivanovo, 2010. 184 p.
2. Kazakov, Yu.B., Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2006, issue 3, pp. 31–32.
3. Poletaev, V.A., Perminov, S.M., Pakholkova, T.A. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 5, pp. 42–45.
4. Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 5, pp. 36–39.
5. Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 4, pp. 30–32.
6. Poletaev, V.A., Perminov, S.M., Pakholkova, T.A. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 5, pp. 32–34.
7. Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 6, pp. 32–36.
8. Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 3, pp. 28–31.
9. Perminov, S.M., Perminova, A.S. *Razrabotka i issledovanie novogo sposoba germetizatsii magnitnoy zhidkost'yu zazorov s poverkhnostyami iz nemagnitnykh materialov* [Development and study of the new method of magnetic fluid sealing of gaps with non-magnetic surfaces]. *Sbornik nauchnykh trudov XIV Mezhdunarodnoy Pleskoy konferentsii po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam* [Collected Papers of the 14th Plos International Nanodispersed Magnetic Fluid Conference]. Ivanovo, 2010, pp. 402–404.
10. Perminov, S.M., Perminova, A.S. *Magnitozhidkostnoe uplotnenie nemagnitnogo vala* [Nonmagnetic Shaft Magnetic Fluid Sealing]. Patent RF, no. 2458271, 2012.

11. Perminov, S.M., Perminova, A.S., Kazakov, Yu.B. *Magnitnozhidkostnoye uplotnenie nemagnitnogo vala* [Nonmagnetic Shaft Magnetic Fluid Sealing]. Patent RF, no. 2407926, 2010.

12. Fertman, V.E. *Magnitnye zhidkosti – estestvennaya konvektsiya i teploobmen* [Magnetic fluids – natural convection and heat transfer]. Minsk, Nauka i tekhnika, 1978. 207 p.

Перминов Сергей Михайлович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, докторант кафедры электромеханики, заведующий проблемной научно-исследовательской лабораторией прикладной феррогидродинамики,
телефон (4932) 26-99-92,
e-mail: psm@upm.ispu.ru

Перминова Анастасия Сергеевна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
магистрант,
телефон (4932) 26-99-92,
e-mail: psm@upm.ispu.ru