

УДК 621.538

Исследование распределения напряженности магнитного поля и магнитных потоков в магнитожидкостном герметизаторе классической конструкции

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

Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время отсутствуют сведения о детальном распределении магнитного поля в магнитожидкостных герметизаторах. В связи с этим необходимо исследование распределения напряженности магнитного поля и магнитных потоков в магнитожидкостном герметизаторе классической конструкции.

Материалы и методы: Исследование выполнено на основе моделирования магнитного поля методом конечных элементов. Используется дифференцированная конечно-элементная сетка из 1080000 треугольных элементов.

Результаты: Исследованы основные закономерности распределения магнитного поля магнитожидкостного герметизатора: в рабочем зазоре, на поверхности магнитной системы, в полости под магнитом. Найдено распределение напряженности магнитного поля в рабочем зазоре, в пространстве около магнитной системы магнитожидкостного герметизатора. Определены основные магнитные потоки магнитной системы и их соотношения. Показано, что крайние зубцы полюсной приставки способны воспринимать перепад давлений на 9,5% выше, чем средние. В результате моделирования найдено подробное распределение напряженности магнитного поля магнитожидкостного герметизатора.

Выводы: Полученные результаты позволяют на более высоком уровне производить проектирование, заправку, испытание и эксплуатацию магнитожидкостного герметизатора.

Ключевые слова: магнитожидкостный герметизатор, магнитное поле, распределение напряженности поля, магнитные потоки.

Research of Distribution of Magnetic Field Strength and Magnetic Flows in Classical Magneto-Liquid Sealer

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

Abstract

Background: Nowadays there are no data about detailed distribution of magnetic field in magneto-liquid sealers. As a result, it is important to carry out the research devoted to the distribution of the magnetic field strength and magnetic flows in classical magneto-liquid sealers.

Materials and methods: The research is performed on the basis of modeling the magnetic field by means of the method of finite elements. The author uses the differentiated finite element scheme of 1080000 triangular elements.

Results: The author considers the main regularities of the distribution of magnetic field in magneto-liquid sealers: in the gap, on the magnetic system surface, in the cavity under the magnet. The author defines the distribution of the magnetic field strength in the gap, in the space near the magnetic system of the magneto-liquid sealer. The main magnetic flows of the magnetic system and their correlations are described. It is shown that the ends of the teeth of the pole attachments are able to perceive the pressure drop by 9.5% higher than the average. As a result of the simulation the author determines the detailed distribution of magnetic field strength of the magneto-liquid sealer.

Conclusions: The given results allow to design, test, operate, and fill the the magneto-liquid sealer.

Key words: magneto-liquid sealer, magnetic field, distribution of magnetic field strength, magnetic flows.

При создании магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ) исследователи столкнулись с проблемой определения магнитного поля в рабочем зазоре. Величина зазора, как правило, не превышает 0,1 мм, поле резко неоднородное, поэтому известные методы и средства измерения параметров поля оказались бесполезными при решении стоящей задачи [1]. Для расчета и анализа поля системы использовались методы, основанные на целом ряде допущений, соответственно, дающие результаты с высокой погрешностью [2]. Использовались также числен-

ные методы расчета: метод конечных разностей [3] и метод конечных элементов [4]. Но их применение сдерживалось уровнем развития вычислительной техники и отсутствием универсальных программ с развитым интерфейсом, позволяющих с малыми временными и трудовыми затратами вводить исходные данные и обрабатывать результаты расчетов. На решение одного варианта расчета требовались недели. Кроме этого, был ограничен объем массива элементов расчетной сетки, что не позволяло с достаточной точностью рассмотреть

магнитное поле МЖГ в целом, каждый элемент магнитной системы МЖГ приходилось исследовать по-отдельности. Сведение результатов исследований отдельных элементов в целостную картину затруднено тем, что в системе используется несколько нелинейных сред. Общая картина, сотканная из кусочков, получалась приближенной. В настоящее время в России и за рубежом созданы универсальные программные комплексы, позволяющие численными методами рассчитывать различные физические поля с высокой степенью точности и разумными затратами времени на ввод исходных данных, обработку результатов расчета. Расчет поля с помощью этих программ позволяет получить развернутое представление картины распределения поля как в целом, так и по выделенным зонам исследуемого устройства. Ниже рассчитывается магнитное поле МЖГ с высокой степенью разбивки исследуемого пространства для получения подробной и достоверной информации о распределении магнитного поля. Для расчета использовалась программа ELCUT, распространяемая фирмой «Тор» из Санкт-Петербурга [5].

Исходные данные. На рис. 1 показана магнитная система исследуемого герметизатора с диаметром уплотняемого вала 20 мм. Она состоит из постоянного магнита 1, являющегося источником магнитного поля, полюсных приставок 2, на поверхностях которых, обращенных к валу 3, расположены зубцы 4 – концентраторы поля. В зазорах между зубцами и валом размещена магнитная жидкость 5. Постоянный магнит выполнен из магнитотвердого материала самарий-кобальт КС37 в виде кольца длиной 4 мм и высотой сечения 5 мм. Внутренний диаметр магнита равен диаметру основания зубцов. Зубцы на полюсной приставке шириной 2 мм имеют площадку на острие зубца 0,2 мм, угол между боковыми образующими зубца и поверхностью вала равен 60° . Рабочий зазор между валом и зубцами составляет 0,1 мм. Полюсные приставки и вал выполнены из стали Ст.3.

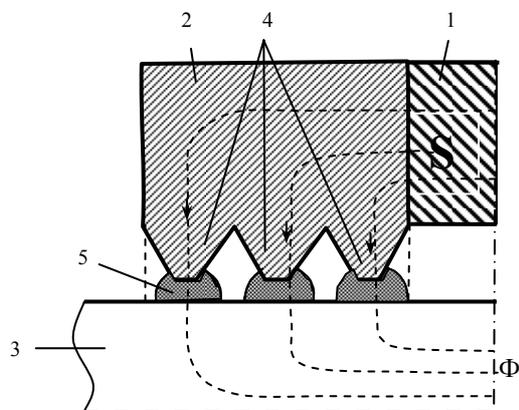


Рис. 1. Схема конструкции магнитожидкостного герметизатора

Принято, что МЖГ заправлен магнитной жидкостью МК 2-40 [6], магнитные характеристики которой сняты способом и устройством, описанными в [7], и представлены в [8] в виде нелинейных зависимостей $B = f(H)$.

Область исследования, расчетная сетка и граничные условия. Магнитная система МЖГ симметрична относительно ее нейтральной плоскости, поэтому расчет выполнялся одной из симметричных частей магнитной системы (рис. 2).

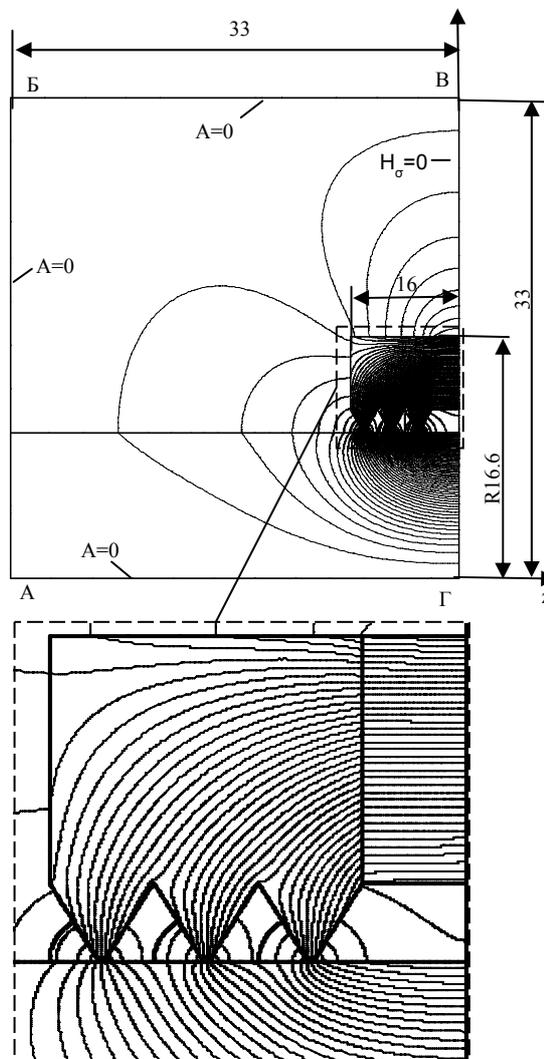


Рис. 2. Картина распределения линий векторного магнитного потенциала МЖГ

Одна из границ расчетной области совпадает с осью вала, вторая – с осью симметрии магнитной системы, две другие границы удалены на расстояния, где магнитное поле герметизатора можно считать нулевым. Габариты магнитной системы и расчетной области показаны на рис. 2. Граничные условия заданы следующим образом: на границе, совпадающей с осью вала АГ, и на двух удаленных от магнитной системы границах АВ и БВ векторный магнитный потенциал равен нулю, на границе, совпадающей с плоскостью симметрии магнитной системы ВГ,

касательная составляющая напряженности магнитного поля равна нулю.

Расчетная сетка выполнялась из треугольных элементов с переменной густотой, наиболее крупные элементы задавались на удаленных границах области, и их максимальные размеры составляли 0,5 мм, наиболее мелкие – в рабочем зазоре со стороны элемента 0,002 мм. Вся сетка содержала около 108000 узлов.

Результаты расчета. Расчет магнитного поля проводился на ПК и занимал около шести минут времени. На рис. 2 показана полученная картина распределения линий векторного магнитного потенциала. Магнитный поток любой магнитной системы принято разбивать на две основные составляющие: рабочий магнитный поток Φ_r и поток рассеяния Φ_σ . В МЖГ за рабочий поток принят поток, проходящий через рабочий зазор между полюсными приставками и валом. На рис. 1 рабочий поток заключен между пунктирными линиями, лежащими в плоскостях боковых образующих полюсных приставок, остальной поток магнитной системы является потоком рассеяния. В рассматриваемой магнитной системе общий магнитный поток, проходящий через нейтральное сечение постоянного магнита, равен $3,52 \cdot 10^{-4}$ Вб. Рабочий магнитный поток, входящий в поверхность вала в пределах границ рабочего зазора, равен $2,61 \cdot 10^{-4}$ Вб. Поток рассеяния составил $0,91 \cdot 10^{-4}$ Вб. Коэффициент рассеяния данной магнитной системы равен $k_\sigma = 0,35$. Под коэффициентом рассеяния понимается отношение потока рассеяния к рабочему потоку. Рабочий поток между зубцами распределяется практически равномерно, и соотношение потоков выглядит как 1,000:1,016:0,993. Потоки крайних зубцов чуть меньше, чем поток среднего зубца. Поток рассеяния можно разбить на две составляющие: магнитный поток рассеяния, выходящий с наружной поверхности магнитной системы, – $\Phi_{\sigma\text{нар}}$; и поток рассеяния, выходящий с внутренней поверхности и замыкающийся в пространстве, ограниченном магнитом, валом и полюсными приставками, – $\Phi_{\sigma\text{внут}}$. Соотношение потоков рассеяния наружного и внутреннего $\Phi_{\sigma\text{нар}}/\Phi_{\sigma\text{внут}}$ составляет 4,79, т.е. основной поток рассеяния приходится на наружную поверхность.

Распределение напряженности магнитного поля в рабочем зазоре. На рис. 3 показано распределение напряженности магнитного поля в зазоре вдоль поверхности вала ($\Delta = 0,01\delta$ – расстояние до прямой, на которой представлено распределение напряженности поля, до поверхности вала). Кривая распределения напряженности магнитного поля имеет волнообразный характер. При одинаковой форме зубцов на полюсной приставке кривые распределения напряженности поля под зубцами имеют практически одинаковый характер. Небольшое отличие в распределении напряженности поля наблюдается только под край-

ними зубцами. Закономерности распределения напряженности поля в рабочем зазоре следующие. В зонах минимального зазора между зубцами и валом напряженность поля максимальна, в области канавок, т.е. на границах зубцов, – минимальна. Чем дальше зубец расположен от постоянного магнита, тем ниже напряженность поля в зазоре. Это объясняется падением магнитодвижущей силы магнита на пути потока зубца через полюсную приставку и вал. Но это снижение напряженности поля в магнитной системе с магнитопроводящим валом в рассматриваемом случае незначительно и не превышает 1 %. С увеличением числа зубцов на полюсной приставке эффект снижения напряженности возрастает.

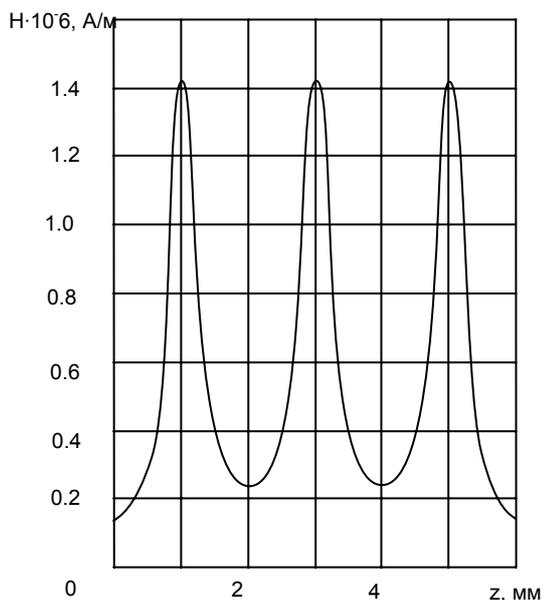


Рис. 3. Распределение напряженности магнитного поля в рабочем зазоре

На внешних границах крайних зубцов напряженность магнитного поля ниже, чем на границах средних зубцов. Это объясняется тем, что на границах между зубцами магнитные поля соседних зубцов накладываются друг на друга, что приводит к увеличению напряженности поля. Разница напряженности поля на границах крайнего зубца в рассматриваемом случае составляет около 40 %. Она зависит от геометрии зубцов и ряда других факторов. Разница напряженности поля на границах зубца приводит к тому, что крайний зубец воспринимает больший перепад давлений, чем средний, прибавка по перепаду давления у крайнего зубца составляет около 9,5 %.

Напряженность магнитного поля в рабочем зазоре меняется как в аксиальном направлении, так и в радиальном. Изменение напряженности поля в зазоре от вала к полюсной приставке обусловлено двумя факторами: осесимметричным исполнением магнитной системы и концентрирующим эффектом зубцов.

Первый фактор зависит от кривизны поверхности вала, т.е. от радиуса вала. Чем меньше радиус, тем больше разница напряженностей на поверхности вала и на кромке зубца. Разницу напряженностей поля, обусловленную кривизной вала, можно найти из соотношения

$$H_e/H_t = r_e/(r_e + \delta),$$

где H_e – напряженность поля на поверхности вала; H_t – напряженность поля на поверхности полюсной приставки.

Концентрирующий эффект зубца зависит от его геометрии, уровня насыщения зубца, и, как правило, по величине он превышает эффект от изменения радиуса.

При расположении зубцов на полюсной приставке эффекты перераспределения поля действуют в противоположных направлениях и частично компенсируют друг друга. При расположении зубцов на валу эффект от обоих механизмов суммируется.

На рис. 4 показано изменение напряженности магнитного поля на оси зубца в направлении от поверхности вала к зубцу (пунктирной линией выделено влияние радиуса вала на изменение напряженности поля).

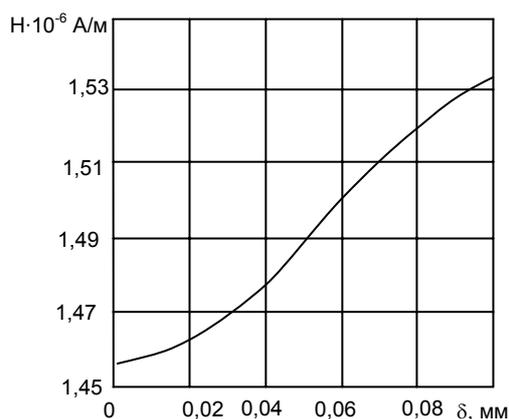


Рис. 4. Изменение напряженности поля в рабочем зазоре в направлении от вала к зубцу (на оси зубца)

На межзубцовых границах напряженность поля максимальна на поверхности вала и снижается при движении к полюсу (рис. 5). У полюса в канавке, образованной соседними зубцами, напряженность поля практически равна нулю. Это объясняется эффектом шунтирования данного пространства магнитопроводящей средой с высокой магнитной проницаемостью – сталью соседних зубцов.

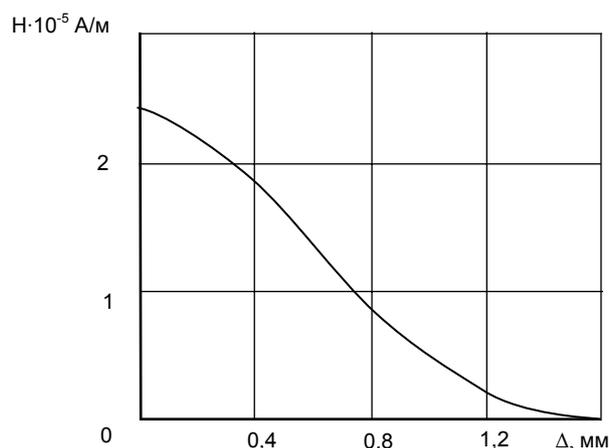


Рис. 5. Изменение напряженности поля в рабочем зазоре на границе между зубцами в направлении от вала к зубцу

Распределение напряженности поля около наружной поверхности магнитной системы. На рис. 6 представлено распределение напряженности магнитного поля вдоль наружной поверхности магнитной системы.

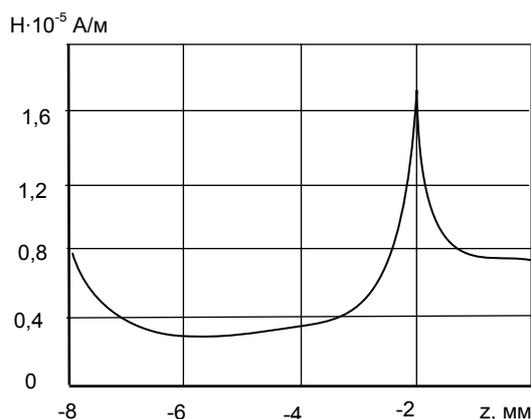


Рис. 6. Распределение напряженности магнитного поля вдоль наружной поверхности магнитной системы

Пик напряженности наблюдается на стыке магнита и полюсной приставки и является результатом действия трех эффектов. В данной точке на поверхности магнитной системы существует максимальный магнитный потенциал, а точка на поверхности имеет наименьшее расстояние до линии нулевого потенциала – оси симметрии системы. Кроме этого, здесь накладывается действие кромочных эффектов полюсной приставки и магнита [9]. На краю полюсной приставки наблюдается резкое увеличение напряженности поля, что объясняется кромочным эффектом магнитного поля на ребре.

На рис. 7 показано распределение напряженности магнитного поля вдоль торцевой поверхности полюсной приставки.

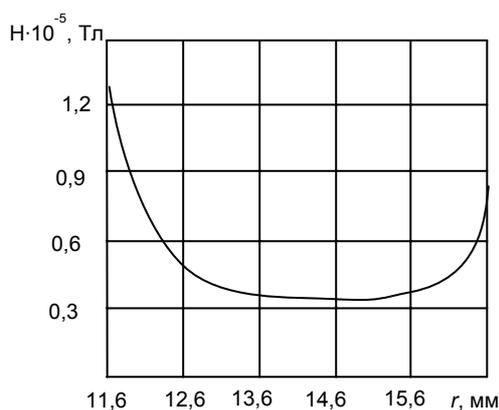


Рис. 7. Распределение напряженности магнитного поля вдоль торцевой поверхности полюсной приставки

При движении от наружной кромки полюса к валу напряженность поля первоначально снижается, что обусловлено снижением действия кромочного эффекта, затем, пройдя минимум, начинает расти. Напряженность поля на торцевой поверхности полюсной приставки определяется разностью магнитных потенциалов полюсной приставки и вала, а также расстоянием между рассматриваемой точкой на поверхности полюсной приставки и поверхностью вала. Разность магнитных потенциалов рассматриваемых поверхностей практически постоянна, поэтому напряженность на поверхности растет обратно пропорционально расстоянию рассматриваемой точки до поверхности вала.

Распределение напряженности магнитного поля в полости под магнитом. Информация о распределении напряженности поля в данной области важна по двум причинам. Во-первых, при заправке герметизатора в сборе требуется правильно рассчитать вводимый объем магнитной жидкости. Распределение поля в полости под магнитом определяет объем магнитной жидкости, который дополнительно требуется ввести, прежде чем жидкость при заправке начнет перетекать от одной полюсной приставки ко второй. Во-вторых, данную полость можно использовать для хранения запаса магнитной жидкости, подпитывающего зубцы полюса в период длительной эксплуатации уплотнения.

На рис. 8 показано распределение напряженности поля вдоль поверхности вала и вдоль магнита. Анализ полученных кривых позволяет сделать вывод, что магнитная жидкость в полости будет удерживаться полем около полюсной приставки и на поверхности магнита, перетекание жидкости от одной полюсной приставки ко второй будет происходить по внутренней поверхности магнита.

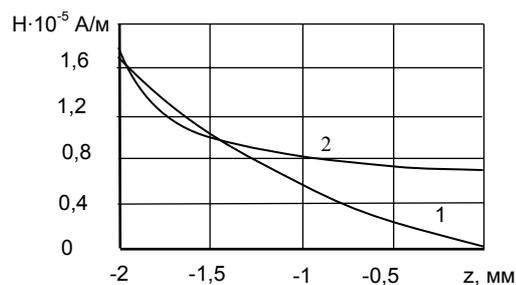


Рис. 8. Распределение напряженности поля в полости под магнитом: 1 – у поверхности вала; 2 – у поверхности магнита

Заключение

Таким образом, проведенное исследование с применением метода конечных элементов позволило получить подробную и достаточно точную картину распределения магнитного поля МЖГ, выявить основные особенности распределения напряженности поля в рабочем зазоре и окружающем магнитную систему пространстве. Полученные результаты позволяют на более высоком уровне производить проектирование, заправку, испытание и эксплуатацию МЖГ.

Список литературы

1. **Большакова И.А., Перминов С.М., Русакова Н.Н.** Измерительное оборудование для магнитожидкостных систем герметизации на основе миниатюрных датчиков Холла // XIV Междунар. конф. по магнитной гидродинамике. Латвия. – Саласпилс, 1995.
2. **Страдомский Ю.И., Перминов С.М., Борисов С.С.** Проверочный расчет магнитожидкостного герметизатора // Мат-лы III Всесоюз. школы-семинара по магнитным жидкостям. – М.: ИГУ, 1983. – С. 241–242.
3. **Конечно-разностное** моделирование магнитожидкостного герметизатора / Ю.И. Страдомский, С.М. Перминов, С.С. Борисов, Н.Н. Русакова // Труды ИГЭУ. Магнитные жидкости в ИГЭУ. Иваново, Россия, 2004 / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2004. – С. 149–169.
4. **Перминов С.М., Казаков Ю.Б.** Влияние насыщения стали полюсов и вала на магнитное поле и удерживающую способность рабочего зазора магнитожидкостного герметизатора // Тезисы докладов на IV Всесоюз. конф. по магнитным жидкостям. – М., 1985. – Т. 2. – С. 31–32.
5. **Сайт ООО «Тор»** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.elcut.ru.
6. **Магнитные жидкости**, www/ispu.ru – Сайт Проблемной научно-исследовательской лаборатории прикладной феррогидродинамики ИГЭУ.
7. **Патент** на изобретение РФ №2402032. Способ и устройство для измерения намагниченности жидкого вещества, в частности магнитной жидкости / Перминов С.М., Перминова А.С. Оpubл. в Б.И. №29, 20.10.2010, МПК G 01R 33/12.
8. **Перминов С.М.** Разработка способа, устройства и методики измерения намагниченности нанодисперсной магнитной жидкости // Вестник ИГЭУ. – 2009. – № 3.
9. **Перминов С.М.** Исследование кромочных эффектов магнитного поля с учетом нелинейных свойств магнитных материалов методом математического моделирования // Вестник ИГЭУ. – 2011. – № 5. – С. 30–32.

References

1. Bol'shakova, I.A., Perminov, S.M., Rusakova, N.N. Izmeritel'noe oborudovanie dlya magnitnozhidkostnykh sistem germetizatsii na osnove miniatyurnykh datchikov Kholla [Measuring equipment for sealing magneto systems based on miniaturized Hall sensors]. *XIV Mezhdunarodnaya konferentsiya po magnitnoy gidrodinamike* [Measuring Equipment for Magneto-Liquid Sealing Systems based on Tiny Hall Sensors]. Latviya, Salaspils, 1995.
2. Stradomskiy, Yu.I., Perminov, S.M., Borisov, S.S. Poverochnyy raschet magnitnozhidkostnogo germetizatora [Checking Calculation of Magneto-Liquid Sealer]. *Materialy III Vsesoyuznoy shkoly-seminara po magnitnym zhidkostyam*. Moscow, IGU, 1983, pp. 241–242.
3. Stradomskiy, Yu.I., Perminov, S.M., Borisov, S.S., Rusakova, N.N. Konechno-raznostnoe modelirovanie magnitnozhidkostnogo germetizatora [Finite-difference Simulation of Magneto-Liquid Sealer]. *Trudy IGEU. Magnitnye zhidkosti v IGEU* [Works of the IIIrd All-unity School – Seminar of Magnetic Liquids]. Ivanovo, 2004, pp. 149–169.
4. Perminov, S.M., Kazakov, Yu.B. Vliyaniye nasyshcheniya stali polyusov i vala na magnitnoye pole i uderzhivayushchuyu sposobnost' rabocheho zazora magnitnozhidkostnogo germetizatora [Influence of Steel Saturation of poles and shaft on magnetic field and Retention of working gap of Magneto-Liquid Sealer]. *Tezisy dokladov na IV Vsesoyuznoy konferentsii po magnitnym zhidkostyam* [Reports' Points of the IVth All-Unity Conference of Magnetic Liquids]. Moscow, 1985, vol. 2, pp. 31–32.
5. Sayt OOO «Tor» [LLC "Tor" Website]. Available at: www.elcut.ru.
6. *Magnitnye zhidkosti* [Magnetic Liquids]. Available at: [www/ispu.ru](http://www.ispu.ru)
7. Perminov, S.M., Perminova, A.S. *Sposob i ustroystvo dlya izmereniya namagnichennosti zhidkogo veshchestva, v chastno-sti, magnitnoy zhidkosti* [Ways and Tools for Measurement of Liquid Magnetization, for example, Magnetic Liquid]. Patent FR, no. 2402032, 2010.
8. Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2009, issue 3, pp. 33–36.
9. Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 5, pp. 30–32.

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) 38-57-98,
e-mail: psm@upm.ispu.ru