

Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №5 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-5>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/41TVN516.pdf>

Статья опубликована 21.10.2016.

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Покровский А.А., Пучков П.В., Легкова И.А. Использование расчета магнитных полей методом конечных элементов при создании конструкций комбинированных магнитоожидкостных уплотнений // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №5 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/41TVN516.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**УДК 621.318**

**Покровский Аркадий Алексеевич**

ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России», Россия, Иваново<sup>1</sup>

Кандидат технических наук, Доцент

E-mail: [aapokrovsky@mail.ru](mailto:aapokrovsky@mail.ru)

РИНЦ: [http://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=411351](http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=411351)

**Пучков Павел Владимирович**

ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России», Россия, Иваново

Старший преподаватель

Кандидат технических наук

E-mail: [palpuch@mail.ru](mailto:palpuch@mail.ru)

**Легкова Ирина Анатольевна**

ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России», Россия, Иваново

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: [legkovai@mail.ru](mailto:legkovai@mail.ru)

РИНЦ: [http://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=366562](http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=366562)

## **Использование расчета магнитных полей методом конечных элементов при создании конструкций комбинированных магнитоожидкостных уплотнений**

**Аннотация.** Комбинированные уплотнения позволяют добиться рационального сочетания рабочих характеристик контактных и магнитоожидкостных уплотнений и взаимно скомпенсировать их недостатки. В комбинированных уплотнениях магнитная жидкость может применяться не только как уплотнительная среда, но и в качестве смазочного материала, для смазки трущихся частей уплотнительных устройств. Для удержания магнитной жидкости в рабочей области уплотнения используется магнитная система. Расчет магнитных полей в комбинированных магнитоожидкостных уплотнениях является актуальной задачей.

Метод конечных элементов позволяет более корректно описать расчетную область, что приводит к уменьшению погрешности вычислений. Поэтому, применение этого метода при исследовании магнитных полей в электромагнитных устройствах наиболее предпочтительно.

Критериями оценки в этом случае являются:

---

<sup>1</sup> 153045, г. Иваново, ул. 2-я Продольная, д. 5

1. Максимальная величина магнитной индукции в рабочей области уплотнения;
2. Распределение магнитного поля в рабочей зоне уплотнения.

Использование метода конечных элементов для расчета магнитных цепей комбинированных магнитожидкостных уплотнений позволило оптимизировать их конструкции. Применение нетрадиционных источников магнитного поля, таких как магнитоэластомерный материал позволяет упростить конструкцию уплотнений и технологию их изготовления. Другой особенностью представленных уплотнений является обеспечение постоянного рабочего зазора при работе.

Рассмотрены новые конструкции комбинированных магнитожидкостных уплотнений, позволят решить задачу повышения работоспособности техники, продления ее срока службы и снижения эксплуатационных расходов.

**Ключевые слова:** контактные уплотнения; бесконтактные уплотнения; магнитная индукция; комбинированное уплотнение; магнитная жидкость; магнит

**Текст статьи.** При разделении нескольких сред в различных технических устройствах возникает проблема герметизации подвижных соединений. В подвижных соединениях кинематических пар герметизация может быть достигнута только путем применения специальных уплотнительных устройств [5, 7]. Уплотнениями называются устройства для разделения пространств с различными давлениями, рабочими средами и температурами. Они предотвращают проникновение посторонних частиц в рабочую среду и исключают утечку уплотняемой среды из корпуса уплотняемого узла [5].

Основная задача динамического уплотнительного устройства состоит в том, что бы каким либо образом заполнить пространство или зазор между подвижной и неподвижной частями механизма, тем самым обеспечивая выполнение его функций. Уплотнительные устройства применяются в различных отраслях техники, поэтому номенклатура уплотнений исключительно широка, а требования и условия эксплуатации разнообразны [5, 7, 8, 11].

Часто работоспособность целого агрегата зависит от работоспособности уплотнительного устройства, поэтому повышение эксплуатационных параметров уплотнений, их безотказность и долговечность – один из путей повышения надежности и долговечности технических систем.

В настоящее время для герметизации вращающихся валов применяется целый ряд уплотнительных устройств, имеющих свои достоинства и недостатки [5, 6]. Например, к недостаткам контактных уплотнений относятся: высокие потери на трение, высокий момент сопротивления, наличие утечек [5]. Использование смазочного материала не всегда позволяет решить проблемы связанные с трением, поскольку встает вопрос об удержании смазки в зоне контакта рабочих частей уплотнения с валом. Бесконтактные уплотнения имеют низкий момент трения, малый износ рабочих элементов, однако им присущи некоторые недостатки: малый удерживаемый перепад давлений, а в некоторых случаях принципиальная негерметичность (щелевые, лабиринтные уплотнения), повышенные требования к точности изготовления, необходимость обеспечения постоянства рабочего зазора, (магнитожидкостные уплотнения) что требует установки дополнительных опорных подшипников и приводит к увеличению габаритов узла [1].

Комбинированные уплотнения позволяют добиться рационального сочетания рабочих характеристик контактных и магнитожидкостных уплотнений и взаимно скомпенсировать их недостатки. В комбинированных уплотнениях магнитная жидкость может применяться не

только как уплотнительная среда, но и в качестве смазочного материала, для смазки трущихся частей уплотнительных устройств [2, 8].

Таким образом, актуальной задачей является разработка новых конструкций комбинированных уплотнительных устройств.

Среди применяемых в настоящее время контактных уплотнений широко распространены торцевые уплотнения. Торцевое уплотнение состоит в основном из трех элементов: двух колец (вращающегося и неподвижного) образующих плоскую пару трения и упругого элемента обеспечивающего контакт в паре трения. Обеспечение смазывания колец таких уплотнений является актуальной задачей.

Смазка трущихся частей торцевого уплотнения [7] может осуществляться при помощи магнитной жидкости [2]. В этом случае магнитная жидкость удерживается в области трения магнитными силами, возникающими при наложении магнитного поля. Для создания магнитного поля в уплотнение должна устанавливаться магнитная система.

Выбрать наиболее рациональную конструкцию магнитной системы можно лишь на основании ее магнитного расчета.

Существует несколько методов расчета магнитных систем, из которых наиболее распространенными являются метод вероятных путей магнитного потока, метод конечных разностей и метод конечных элементов. Метод вероятных путей магнитного потока больше всего пригоден для инженерных расчетов. Погрешности, возникающие при применении этого метода могут достигать 20 – 30% и в значительной степени зависят от опыта инженера. Наиболее точными являются реализованные на вычислительной технике метод конечных разностей и метод конечных элементов. Однако, метод конечных элементов позволяет более корректно описать расчетную область, что приводит к уменьшению погрешности вычислений [9, 10, 11]. Поэтому применение этого метода при исследовании магнитных полей в электромагнитных устройствах наиболее предпочтительно.

Основными результатами расчета магнитного поля являются распределение магнитной индукции и картина магнитного поля [2, 11]. По этим параметрам возможно провести оценку магнитной системы уплотнения.

Критериями оценки в этом случае являются:

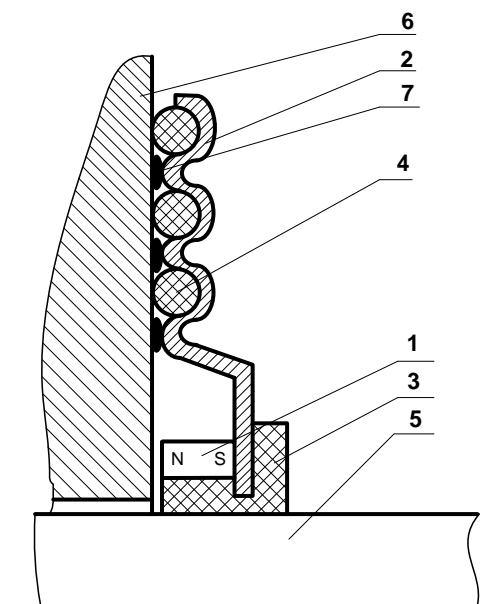
1. Максимальная величина магнитной индукции в рабочей области уплотнения;
2. Распределение магнитного поля в рабочей зоне уплотнения.

Применительно к комбинированным уплотнениям наиболее важным для достижения результата является именно удержание магнитной жидкости в области трения (второй критерий). По опыту конструирования комбинированных магнитожидкостных уплотнений максимальная величина магнитной индукции в рабочей области, достаточная для удержания магнитной жидкости, должна составлять 0,05 – 0,1 Тл [2].

Для герметизации объемов с низким и средним давлением предложена новая конструкция комбинированного торцевого магнитожидкостного уплотнения [3] (рис. 1)<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Рисунки в статье авторские. Изображения являются скриншотами из программы для расчета магнитных полей, расчеты выполнялись в рамках проведения научных исследований авторским коллективом. Схемы уплотнений заимствованы из патентов опубликованных авторами.



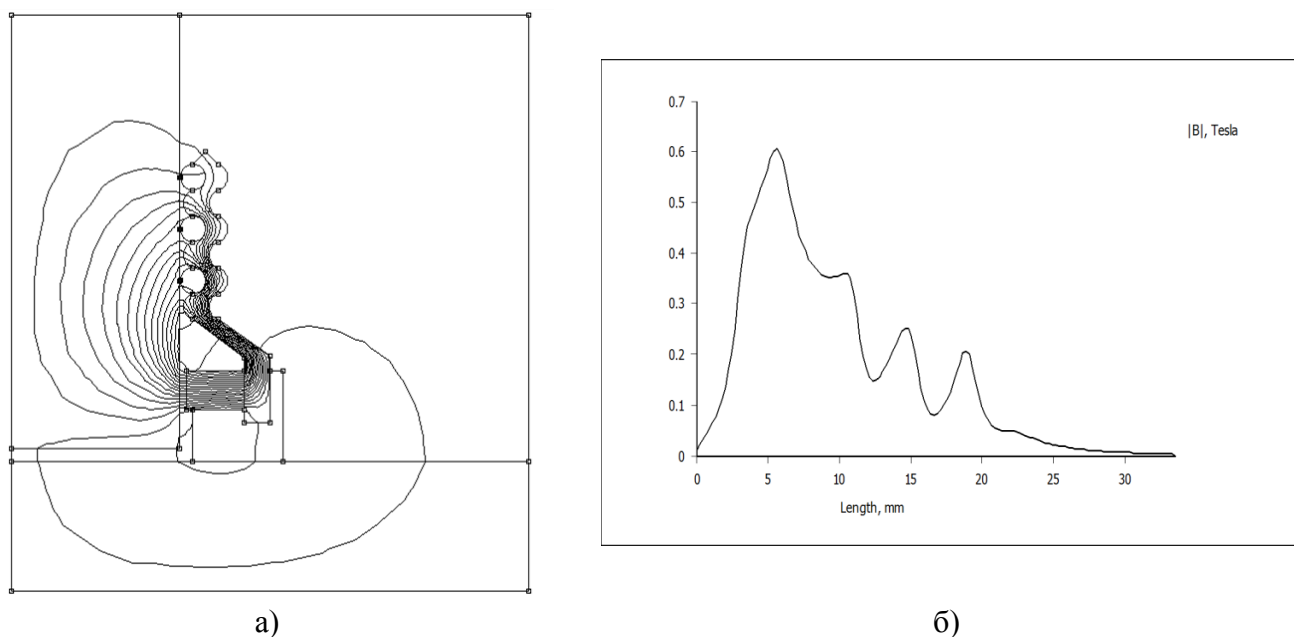
**Рисунок 1.** Комбинированное торцовое магнитожидкостное уплотнение: 1 – кольцевой постоянный магнит; 2 – подвижный магнитопровод волнообразной формы; 3 – втулка; 4 – кольца из немагнитного материала; 5 – вал уплотняемого устройства; 6 – неподвижный магнитопровод; 7 – магнитная жидкость (разработано автором)

Уплотнение состоит из кольцевого постоянного магнита 1, подвижного магнитопровода волнообразной формы 2, примыкающего к постоянному магниту 1. Кольцевой постоянный магнит 1 и подвижный магнитопровод волнообразной формы 2 закрепляются на втулке из эластомерного материала 3. Во впадины подвижного магнитопровода волнообразной формы 2 устанавливаются кольца из немагнитного материала с низким коэффициентом трения 4. Втулка из эластомерного материала 3 устанавливается на валу уплотняемого устройства 5. В качестве неподвижного магнитопровода 6 используется деталь корпуса уплотняемого устройства. Магнитная жидкость 7 помещается в зазор между выступами подвижного магнитопровода волновой формы 2 и неподвижным магнитопроводом 6.

В представленном уплотнении кольца из немагнитного материала с низким коэффициентом трения препятствуют изменению зазора между корпусом уплотняемого устройства и выступами подвижного магнитопровода под действием магнитных сил, чем обеспечивается необходимая величина рабочего зазора уплотнения. В тоже время возникающие магнитные силы препятствуют перемещению подвижного магнитопровода в направлении корпуса.

Результаты расчета магнитного уплотнения представлены на рис. 2. Магнитный расчет производился с использованием программного комплекса, реализующего метод конечных элементов для расчета магнитных задач. Линии магнитного потока (рис. 2а) концентрируются в рабочей области уплотнения. Максимальная величина магнитной индукции (рис. 2б) достигает 0,2 Тл, что достаточно для удержания магнитной жидкости в рабочей зоне уплотнения.

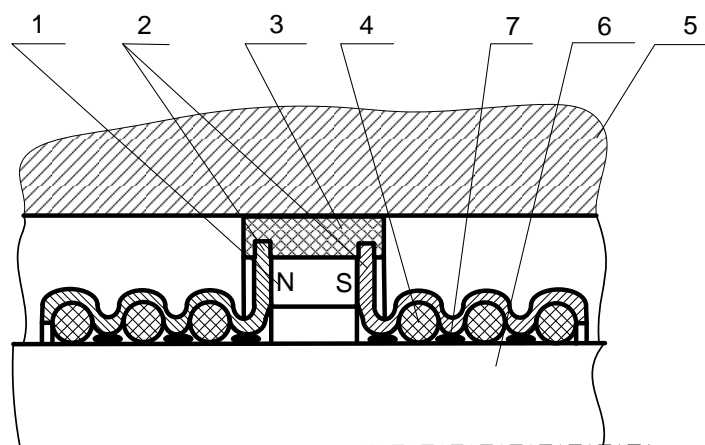
Несмотря на решение проблемы удержания магнитной жидкости в зоне трения и обеспечение постоянства рабочего зазора такое уплотнение не может применяться для герметизации радиальных зазоров.



**Рисунок 2.** Результаты расчета магнитного уплотнения: а – картина магнитного поля; б – график распределения магнитной индукции в рабочей области уплотнения (разработано автором)

Несмотря на решение проблемы удержания магнитной жидкости в зоне трения и обеспечение постоянства рабочего зазора такое уплотнение не может применяться для герметизации радиальных зазоров.

На рис. 3 представлена схема радиального комбинированного магнитожидкостного уплотнения вала [4].



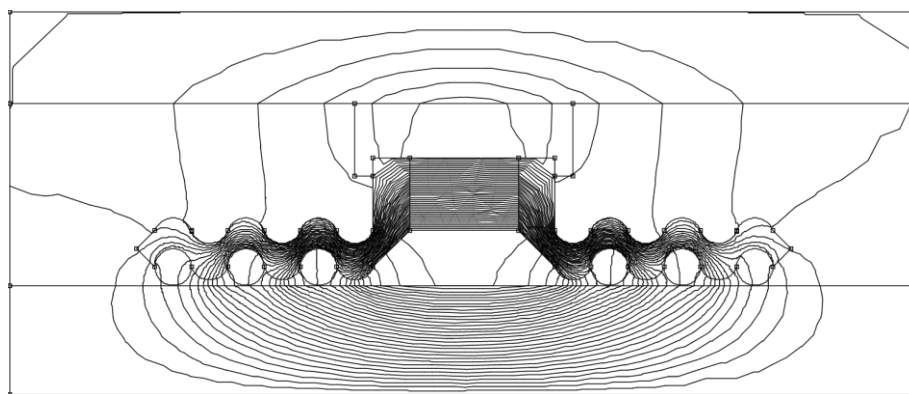
**Рисунок 3.** Комбинированное торцовое магнитожидкостное уплотнение: 1 – кольцевой постоянный магнит; 2 – магнитопровод волнообразной формы; 3 – втулка; 4 – кольца из немагнитного материала; 5 – корпус уплотняемого устройства; 6 – вал уплотняемого устройства; 7 – магнитная жидкость (разработано автором)

Уплотнение состоит из кольцевого постоянного магнита 1, магнитопроводов волнообразной формы 2, примыкающих к постоянному магниту 1. Кольцевой постоянный магнит 1 и магнитопроводы волнообразной формы 2 закрепляются во втулке из эластомерного материала 3. Во впадины магнитопроводов волнообразной формы 2 устанавливаются кольца из немагнитного материала с низким коэффициентом трения 4. Втулка из эластомерного материала 3 устанавливается в корпус уплотняемого устройства 5. В

качестве подвижного магнитопровода 6 используется вал уплотняемого устройства. Магнитная жидкость 7 помещается в зазор между выступами магнитопроводов волновой формы 2 и валом 6.

Аналогично предыдущей конструкции, кольца из немагнитного материала с низким коэффициентом трения препятствуют изменению зазора между валом и выступами магнитопроводов возникающим в результате несоосности вала, вибраций и по другим причинам. При этом перемещения магнитопроводов компенсируются за счет упругих свойств втулки из эластомерного материала.

Результаты магнитного расчета уплотнения представлены на рис.4. Как видно из картины магнитного поля, линии магнитного потока в рабочем зазоре концентрируются на волнообразных выступах магнитопроводов волнообразной формы, обращенных к валу. Величина магнитной индукции в рабочем зазоре составляет 0,25 Тл. На основании приведенных данных можно утверждать, что уплотнение будет обеспечивать удержание определенного перепада давлений, зависящего от количества волнообразных выступов и параметров магнитной системы. Удерживаемая в рабочей области уплотнения магнитная жидкость так же будет выступать в качестве смазки колец из немагнитного материала.

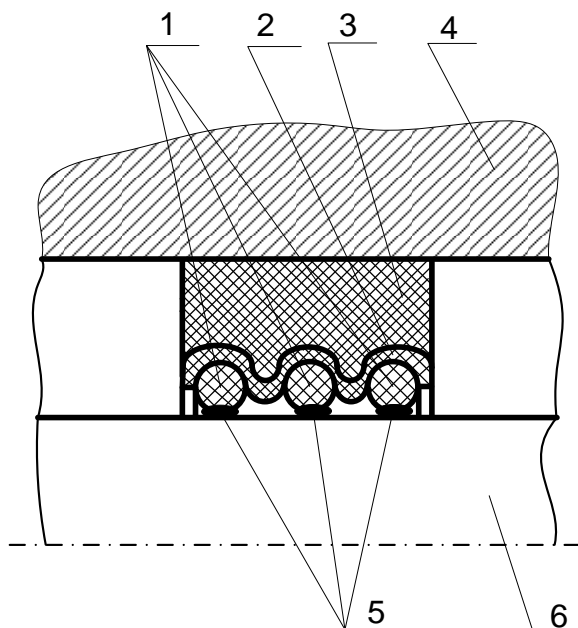


*Рисунок 4. Картина магнитного поля (разработано автором)*

Особенностью предложенных конструкций комбинированных магнитожидкостных уплотнений является необходимость использования постоянного магнита в качестве источника магнитного поля и магнитопроводов для создания магнитного поля в рабочей области уплотнения.

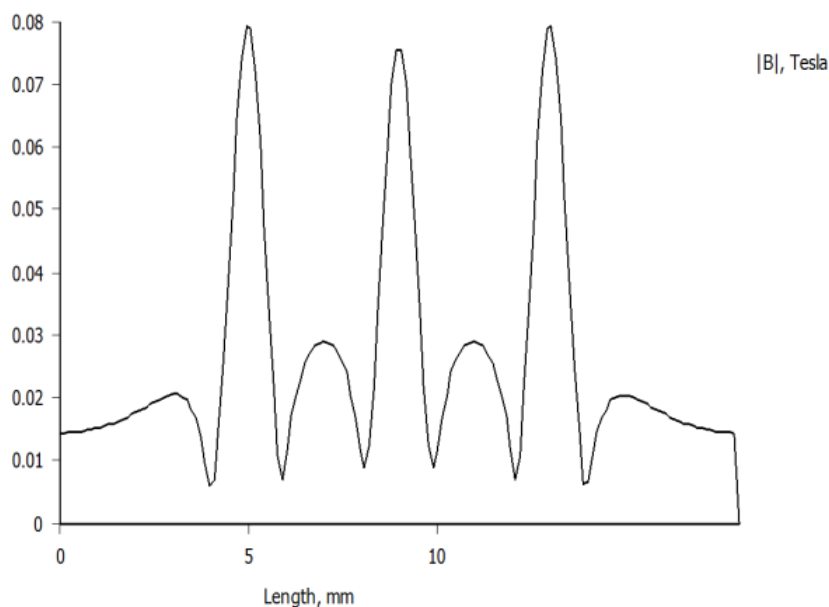
Исключение постоянного магнита и магнитопроводов из конструкции уплотнения позволит значительно уменьшить его габариты при сохранении основных рабочих характеристик.

На рис. 5 представлена конструкция комбинированного магнитожидкостного уплотнения в сборе. Уплотнение содержит кольца из магнитоэластомерного материала 1, сепаратор 2, изготовленный из пластмассы и имеющий кольцевые волнообразные изгибы круглого профиля, установлен во втулку 3 изготовленную из эластомерного материала, помещенной в корпус 4 уплотняемого устройства. Магнитная жидкость 5 помещается между валом 6 и кольцами из магнитоэластомерного материала 1 и удерживается там магнитными силами.



**Рисунок 5.** Комбинированное магнитоэластомерное уплотнение в сборе: 1 – кольца магнитного эластомерного материала; 2 – сепаратор; 3 – втулка; 4 – корпус уплотняемого устройства; 5 – магнитная жидкость; 6 – вал (разработано автором)

Возникающие перемещения сепаратора, как и в предыдущем случае, компенсируются за счет упругих свойств эластомерного материала втулки. Магнитная жидкость концентрируется в зоне контакта колец из магнитоэластомерного материала с валом, где величина магнитной индукции составляет 0,08 Тл (рис. 6), образуя герметичные кольцевые пробки.



**Рисунок 6.** Кривая распределения магнитной индукции в рабочей области (разработано автором)

Перепад давлений, удерживаемый уплотнением, определяется суммой перепадов всех магнитоэластомерных пробок. Так же магнитная жидкость выступает в качестве смазки при трении между кольцами из магнитоэластомерного материала и валом.

Разработанное комбинированное магнитожидкостное уплотнение будет иметь меньшие габаритные размеры, по сравнению с представленными выше конструкциями. Представленные конструкции комбинированных магнитожидкостных уплотнений позволят решить задачу повышения работоспособности техники, продлить срок службы, снизить эксплуатационные расходы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов, Д.В. Магнитные жидкости в машиностроении [Текст]: Д.В. Орлов, Ю.О. Михалёв, Н.К. Мышкин, В.В. Подгорков; под общ. ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. - М.: Машиностроение, 1993. – 272 с.
2. Топоров А.В. Разработка комбинированных магнитожидкостных уплотнений и исследование их трибологических характеристик: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Иваново, 2000. – 175 с.
3. Топоров А.В., Топорова Е.А., Пучков П.В. Комбинированное торцовое магнитожидкостное уплотнение // Патент на полезную модель RU 88407 U1 22.05.2009.
4. Топоров А.В., Малый И.А., Потемкина О.В., Никитина С.А., Пучков П.В., Топорова Е.А., Покровский А.А. Комбинированное магнитожидкостное уплотнение вала // Патент на полезную модель RU 135048 U1 20.06.2013.
5. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник [Текст]: А.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер; под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.
6. Киселев В.В., Топоров А.В., Пучков П.В. Перспективы применения магнито-жидкостных устройств в пожарной и аварийно-спасательной технике // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2010. – №2. – С. 63–64.
7. Мельник, В.А. Торцовые уплотнения валов: справочник [Текст]: В.А. Мельник. - М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
8. Сайкин М.С., Морозова Д.Ю., Фёдорова О.Е. Магнитожидкостное уплотнение // Патент на полезную модель, Российская Федерация N 113325, МКИ F16J 15/54, Приоритет от 12.10.2011, опубл. 10.02.2012, Бюл. N 4.
9. Сайкин М.С. Особенности выбора постоянных магнитов для магнитожидкостных герметизаторов технологического оборудования // Вестник научно-промышленного общества, М: Изд-во «АЛЕВ-В», Вып. 7, 2004, С. 15–19.
10. Сайкин М.С. Особенности конечно-элементного моделирования электромеханических магнитожидкостных герметизаторов // Сборник докладов научного семинара, посвящённого 200-летию открытия электрической дуги В.В. Петровым и 160-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса «Электротехника и прикладная математика». – Иваново, 2003. – С. 42–44.
11. Сайкин М.С., Топоров А.В., Топорова Е.А. Повышение пожарной безопасности химических производств применением магнитожидкостных герметизаторов валов мешалок // Научно-технический журнал «Пожаровзрывобезопасность», Том 24, Вып. №1, 2015 г., стр. 55–60.



**Pokrovskiy Arkadiy Alekseevich**

IFRA of SFS of EMERCOM of Russia, Russia, Ivanovo  
E-mail: aapokrovsky@mail.ru

**Puchkov Pavel Vladimirovich**

IFRA of SFS of EMERCOM of Russia, Russia, Ivanovo  
E-mail: palpuch@mail.ru

**Legkova Irina Anatol'evna**

IFRA of SFS of EMERCOM of Russia, Russia, Ivanovo  
E-mail: legkovai@mail.ru

## **Use of calculation of magnetic fields by method of final elements during creation of designs of the combined magnetoliquid consolidations**

**Abstract.** Combined seals can achieve a rational combination of operating performances of magnetic seals and contact seals, and their disadvantages mutually compensate.

At the combined seals magnetic fluid can be used not only as a sealing medium but also as a lubricant, to lubricate friction parts of the sealing devices. To keep the magnetic fluid in the working area of the seal magnetic system used. Calculation of magnetic fields in a combined magnetic-seals is an urgent task.

Finite element method allows describe the region more accurately, which reduces computational errors. Therefore, application of this method in the study of magnetic fields in electromagnetic devices most preferred.

The criteria for evaluation in this case are:

1. The maximum value of the magnetic induction in the working area of the seal;
2. The distribution of the magnetic field in the working area of the seal.

By using of the finite element method to calculating the magnetic circuits of the combined magnetic-seal it possible to optimize their designs.

The use of non-conventional sources of magnetic field, such as magnetic elastomeric material allows to simplify the design and manufacturing technology of the seal. Another feature provided by the seals is a constant working gap during operation.

Described new construction of combined magnetic-seal can solve the problem of increasing efficiency technology, the extension of its service life and reduce operating costs.

**Keywords:** seals; non-contact seal; the magnetic induction; the combined seal; magnetic fluid; a magnet