

УДК 621.538

Разработка нового способа формирования высокоградиентных магнитных полей в рабочих зазорах магнитожидкостных герметизаторов

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: Повышение эффективности магнитожидкостных герметизаторов и снижение их массогабаритных показателей является актуальной задачей. Одним из возможных способов достижения поставленной цели является разработка и совершенствование новых способов формирования высокоградиентных магнитных полей в рабочих зазорах данных устройств.

Материалы и методы: Исследование магнитного поля разрабатываемого магнитожидкостного герметизатора проведено с помощью метода конечных элементов. Математическое моделирование осуществлялось с использованием дифференцированной конечно-элементной сетки из четырехсот тысяч треугольных элементов с учетом нелинейности свойств магнитных материалов от напряженности магнитного поля.

Результаты: Предлагается новый способ формирования высокоградиентных магнитных полей в рабочих зазорах герметизаторов, заключающийся в максимальном ограничении площади сечений участков, примыкающих к рабочему зазору. Рассмотрен принцип действия предлагаемого способа. Найдено распределение параметров магнитного поля в магнитной системе магнитожидкостного герметизатора с немагнитным и магнитным валами. Показано, что, изменяя расстояние между постоянными магнитами со встречной намагниченностью, можно регулировать градиент и величину индукции в рабочем зазоре герметизаторов в широком диапазоне. Рассчитаны зависимости максимальной индукции в рабочем зазоре герметизаторов от величины расстояния между магнитами.

Выводы: С помощью метода математического моделирования доказана эффективность предложенного способа создания высокоградиентных магнитных полей в рабочих зазорах магнитожидкостных герметизаторов как немагнитных, так и магнитных валов.

Ключевые слова: магнитожидкостный герметизатор, магнитный и немагнитный вал, высокоградиентное магнитное поле, математическое моделирование.

Development of a new method of forming high-gradient magnetic fields in working gaps of magnetic fluid sealers

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

Abstract

Background: Improving the efficiency of magnetic fluid sealers and reducing their weight and size is an urgent task. One possible way to achieve this goal is development and improvement of new methods of forming high gradient magnetic fields in working gaps of these devices.

Materials and Methods: By using the finite element method we studied the magnetic field of the magnetic fluid sealer under consideration. The mathematical modeling was conducted based on a differentiated finite-element mesh containing four hundred thousand triangular elements with the non-linear dependence of magnetic materials on magnetic field strength taken into account.

Results: We propose a new method of forming high gradient magnetic fields in sealer working gaps by minimizing the cross section area of the parts adjacent to the working gap. The paper describes how the proposed method works. We have determined the distribution parameters of magnetic field in the magnetic system of magnetic fluid sealer with non-magnetic and magnetic rollers. It was shown that by changing the distance between the oppositely magnetized permanent magnets we can adjust both the gradient and induction value in the sealer working gap within a wide range. We also calculated the dependences of the maximum induction in the sealer working gap on the distance between the magnets.

Conclusions: The efficiency of the proposed method of producing high-gradient magnetic fields in the working gaps of magnetic fluid sealers of both nonmagnetic and magnetic rollers has been proved by mathematical modeling techniques.

Key words: magnetic fluid sealer, magnetic and non-magnetic rollers, high-gradient magnetic field, mathematical modeling.

Принцип работы магнитожидкостного герметизатора (МЖГ) основан на создании в рабочем зазоре высокоградиентного магнитного поля. В магнитных системах с магнитопроводящим валом неоднородность поля в зазоре достигается изменением геометрии образующих рабочих

зазор магнитопроводящих поверхностей. На поверхностях полюсных приставок или вала, образующих зазор, выполняют концентраторы, которые перераспределяют магнитный поток в зазоре [1–8]. Под остриями концентраторов, где зазор минимальный, создается

поле повышенной напряженности, напротив канавок, где зазор максимальный, – поле пониженной напряженности. Чем выше градиент напряженности поля, тем значительнее разница между экстремальными значениями напряженности поля в зазоре. Зоны повышенной и пониженной напряженности чередуются и замкнутыми кольцами охватывают вал. Магнитная жидкость (МЖ), введенная в зазор, занимает области с повышенной напряженностью поля, образуя вокруг вала герметичные магнитоэлектрические кольца с повышенным внутренним давлением. Чем больше разница между максимальной и минимальной напряженностями поля в зазоре на границах магнитоэлектрической пробки, тем выше удерживающая способность каждого магнитоэлектрического кольца [6, 8]. Перепад давлений, удерживаемый уплотнением, определяется суммой перепадов давлений всех магнитоэлектрических пробок под зубцами.

В случае, когда одна из деталей, образующих рабочий зазор, является немагнитной, данный принцип перераспределения поля не работает. Известен способ, когда магнитный поток концентрируется в зазоре между двумя разноименными полюсными приставками и зона зазора с повышенной напряженностью поля располагается около немагнитной поверхности (рис. 1) [9–12].

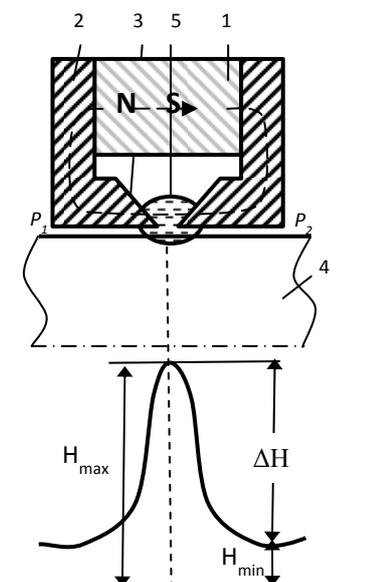


Рис. 1. МЖГ немагнитного вала: 1 – магнит, 2 – полюсные приставки, 3 – концентраторы, 4 – вал, 5 – МЖ

В этом случае вектор напряженности поля направлен вдоль немагнитной поверхности. Максимальная напряженность поля в такой системе наблюдается непосредственно в зазоре между разноименными концентраторами, а при удалении от зазора быстро снижается. Магнитная жидкость занимает пространство между полюсными приставками, перекрывая рабочий зазор между полюсными приставками и немагнитным валом. Эффективность такого способа гер-

метизации ниже, чем с магнитным валом, и зависит от того, насколько малым может быть выполнен зазор между полюсными приставками и поверхностью немагнитного вала. Герметизатор имеет одну магнитоэлектрическую пробку. Для удержания требуемого перепада на валу последовательно устанавливаются ряд таких магнитных систем.

Ниже предлагается новый способ создания высокоградиентных магнитных полей в рабочих зазорах магнитоэлектрических герметизаторов. Способ работоспособен в герметизаторах как с магнитными, так и немагнитными валами, т. е. является универсальным. Магнитная система герметизатора, по данному способу, состоит как минимум из двух одинаковых кольцевых постоянных магнитов, расположенных на одной оси и обращенных друг к другу одноименными полюсами. Картина прохождения магнитных потоков рядом расположенных магнитов показана на рис. 2.

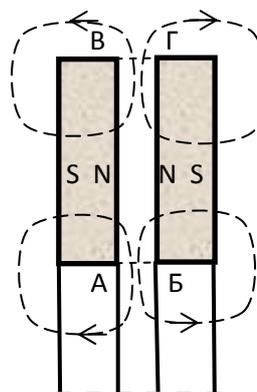


Рис. 2. Принцип действия МЖГ

Магнитные потоки, выходящие из одноименных полюсов соседних магнитов, проходят через ограниченные по размерам концентрические поверхности АБ и ВГ, совпадающие с наружными и внутренними поверхностями магнитов. На этих поверхностях наблюдается максимальная концентрация линий потока и, соответственно, максимальная напряженность магнитного поля в магнитной системе. При сближении магнитов площадь концентрических поверхностей АБ и ВГ уменьшается, что позволяет регулировать градиент и максимальную напряженность поля. Выходя из межполюсного пространства, магнитные потоки магнитов рассредоточиваются в окружающем пространстве, а напряженность поля быстро снижается. Если поверхность вала герметизатора расположена близко от внутренней поверхности магнитов, то на поверхности вала наблюдается поле высокой напряженности, так как линии потока на малом расстоянии от поверхности

АБ еще не успевают рассредоточиться. Максимальная напряженность поля в рабочем зазоре будет определяться величиной рабочего зазора герметизатора, расстоянием между магнитами, размерами магнитов и свойствами магнитотвердого материала, используемого в магните.

Численная оценка эффективности способа. Для определения эффективности предлагаемого способа был проведен эксперимент на основе математического моделирования магнитного поля магнитной системы. Использовался метод конечных элементов. На начальном этапе исследований важно подтвердить работоспособность способа повышения градиента напряженности и максимальной напряженности поля, поэтому было рассмотрено, каким образом величина расстояния между постоянными магнитами t влияет на величину индукции на поверхностях немагнитного и магнитного валов. В эксперименте величина рабочего зазора δ между поверхностью вала и внутренней поверхностью магнитов была задана 0,05 мм, использовались постоянные магниты из закритического самарий-кобальтового магнитотвердого материала КС-37. Применение закритического магнитотвердого материала в магнитах данной системы обязательно, что исключает их взаимное размагничивание при сближении. Размеры магнитов выбраны следующими: наружный диаметр $\Phi_n = 30$ мм, внутренний $\Phi_{вн} = 20$ мм, длина магнитов $L = 4$ мм.

Результаты расчета. На рис. 3 показана полученная в результате расчета картина распределения линий векторного магнитного потенциала магнитной системы, которая соответствует принципам распределения магнитного поля в пространстве и заданным граничным условиям.

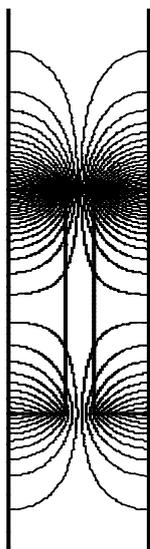


Рис. 3. Картина распределения линий векторного магнитного потенциала магнитной системы

На рис. 4 показана зависимость максимальной индукции поля в рабочем зазоре герметизатора около поверхности немагнитного вала

напротив участка АБ от расстояния между магнитами t . Напряженность поля в зазоре устойчиво растет при уменьшении расстояния между магнитами. Наиболее ощутимые изменения индукции происходят при расстоянии между магнитами менее 1 мм. Максимально достигнутое значение индукции в зазоре на поверхности немагнитного вала составляет 1,08 Тл. Для сравнения, средняя индукция около торцевой поверхности уединенного постоянного магнита составляет 0,31 Тл. Очевидно, что максимум индукции в зазоре данной системы будет меняться с изменением размеров используемых магнитов и выбранного магнитотвердого материала.

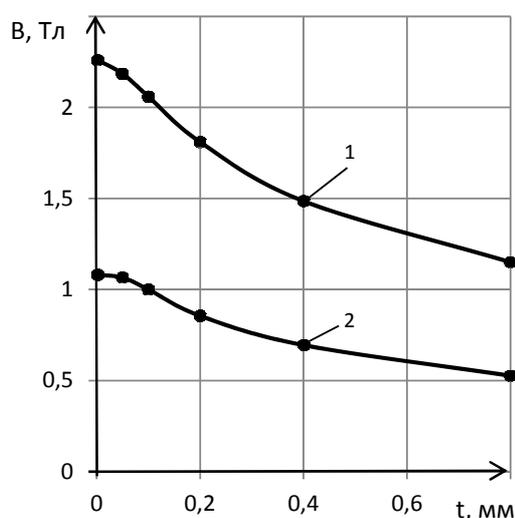


Рис. 4. Изменение индукции на поверхности вала от межполюсного расстояния при $\delta = 0,05$ мм: 1 – вал магнитный; 2 – вал немагнитный

Данный способ может успешно использоваться для герметизации магнитопроводящих валов. На рис. 4 приведена зависимость максимальной индукции в зазоре МЖГ с магнитопроводящим валом от межполюсного расстояния. Значения индукции значительно выше, чем в системе с немагнитным валом и достигают 2,26 Тл.

Абсолютный перепад давлений, удерживаемый герметизатором, зависит от достигнутого перепада индукции на границах магнитожидкостной пробки, намагниченности насыщения магнитной жидкости, заправляемой в рабочий зазор, и количества создаваемых магнитожидкостных пробок. Чем выше намагниченность жидкости, тем больше удерживаемый пробкой перепад давлений. При заправке рассматриваемого герметизатора с магнитопроводящим валом жидкостью с намагниченностью насыщения 40 кА/м одна магнитожидкостная пробка будет восприни-

мать максимальный перепад давлений около 0,88 атм.

Таким образом, предлагаемый способ формирования высоко градиентных магнитных полей в рабочих зазорах является универсальным, пригодным для герметизации магнитных и немагнитных валов, по эффективности сопоставим с известным способом герметизации немагнитного вала, в то же время значительно упрощает конструкцию герметизаторов.

Заключение

Предложенный новый способ формирования высоко градиентных магнитных полей в рабочих зазорах магнитожидкостных герметизаторов позволяет создавать универсальные герметизаторы, работающие как с магнитными, так и с немагнитными валами, обеспечивает конструктивную простоту и технологичность изготовления герметизаторов. Математическое моделирование магнитного поля герметизатора новой конструкции подтвердило эффективность предложенного способа и герметизатора на его основе.

Список литературы

1. **Магнитные жидкости** в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин и др.; под ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. – М.: Машиностроение, 1993. – 272 с.
2. **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.
3. **Перминов С.М.** Исследование распределения напряженности магнитного поля и магнитных потоков в магнитожидкостном герметизаторе классической конструкции // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 32–36.
4. **Казаков Ю.Б., Перминов С.М.** Усовершенствованные наноманитожидкостные герметизаторы // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 3. – С. 31–32.
5. **Перминов С.М.** Исследование распределения параметров магнитного поля в элементах магнитной системы магнитожидкостного герметизатора классической конструкции // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 3. – С. 32–35.
6. **Исследование** магнитного поля рабочего зазора магнитожидкостного герметизатора классической конструкции / В.А. Полетаев, С.М. Перминов, Т.А. Пахолкова, А.С. Перминова // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 5. – С. 42–45.
7. **Перминов С.М.** Исследование торцевого магнитожидкостного герметизатора методом математического моделирования // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 5. – С. 36–39.

Перминов Сергей Михайлович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

кандидат технических наук, зав. проблемной научно-исследовательской лабораторией прикладной феррогидродинамики,

телефон (4932) 38-57-98,

e-mail: psm@upm.ispu.ru

Перминова Анастасия Сергеевна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

магистрант,

телефон (4932) 38-49-01.

8. **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. – Вып. 5. – С. 32–34.

9. **Фертман В.Е.** Магнитные жидкости – естественная конвекция и теплообмен. – Минск: Наука и техника, 1978. – 207 с.

10. **Пат.** 2407936 Российская Федерация, МПК F 16 J 15/53. Магнитожидкостное уплотнение немагнитного вала / Перминов С.М., Перминова А.С., Казаков Ю.Б.; опубл. 20.08.2010, Бюл. №23.

11. **Пат.** 2458271 Российская Федерация, МПК F 16 J 15/40. Магнитожидкостное уплотнение немагнитного вала / Перминов С.М., Перминова А.С.; опубл. 12.08.2012, Бюл. №23.

12. **Перминов С.М.** Исследование кромочных эффектов магнитного поля с учетом нелинейных свойств магнитных материалов методом математического моделирования // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 4. – С. 30–32.

References

1. Orlov, D.V., Mikhalev, Yu.O., Myshkin, N.K. *Magnitnye zhidkosti v mashinostroenii* [Magnetic fluids in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie, 1993. 272 p.
2. Kazakov, Yu.B., Morozov, N.A., Stradomskiy, Yu.I., Perminov, S.M. *Germetizatory na osnove nanodispersnykh magnitnykh zhidkostey i ikh modelirovanie* [Nanodispersed magnetic fluid sealers and their modelling]. Ivanovo, 2010. 184 p.
3. Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 6, pp. 32–36.
4. Kazakov, Yu.B., Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2006, issue 3, pp. 31–32.
5. Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 3, pp. 32–36.
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 5, pp. 36–39.
8. Poletaev, V.A., Perminov, S.M., Pakholkova, T.A. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 5, pp. 42–45.
9. Fertman, V.E. *Magnitnye zhidkosti – estestvennaya konveksiya i teploobmen* [Magnetic fluids – natural convection and heat transfer]. Minsk, Nauka i tekhnika, 1978. 207 p.
10. Perminov, S.M., Perminova, A.S., Kazakov, Yu.B. *Magnitozhidkostnoe uplotnenie nemagnitnogo vala* [Magnetic fluid seal of nonmagnetic rollers]. Patent FR, no. 2407936, 2010.
11. Perminov, S.M., Perminova, A.S. *Magnitozhidkostnoe uplotnenie nemagnitnogo vala* [Magnetic fluid seal of nonmagnetic rollers]. Patent FR, no. 2458271, 2012.
12. Perminov, S.M. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 4, pp. 30–32.