

## РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ГЕРМЕТИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ НАНОЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

© 2010 М.С. Сайкин

Ивановский государственный энергетический университет

Поступила в редакцию 23.03.2010

Предлагаются новые конструкции герметизаторов на основе магнитных наножидкостей, предназначенных для уплотнения вращающихся валов вакуумного, химического, биологического и электротехнологического оборудования. Даны их технические характеристики.

Ключевые слова: *герметизатор, магнитная наножидкость, технологическое оборудование*

Нарушение герметичности вращающихся валов технологического оборудования приводит к нарушению технологических режимов работы, браку продукции, а в некоторых случаях к аварии оборудования. Поэтому к уплотнениям вращающихся валов предъявляются высокие требования по надёжности работы, степени герметичности, отсутствию утечек герметизируемой среды или перемешиванию сред друг с другом. Применение традиционных типов уплотнений [1, 2] не позволяет решить ряд технических задач, таких как: герметизация вращающихся валов вакуумного оборудования до  $10^{-6}$ - $10^{-7}$  Па, валов химических и биологических реакторов и электротехнологического оборудования. Наиболее целесообразным является применение герметизаторов на основе магнитных наножидкостей (МНЖГ). Принцип действия МНЖГ (рис. 1) основан на удержании магнитной наножидкости (МНЖ) 1 в рабочем зазоре  $\delta$  под действием силы, которая возникает при взаимодействии магнитного момента единичного объёма магнитной наножидкости (МНЖ) с неоднородным магнитным полем.

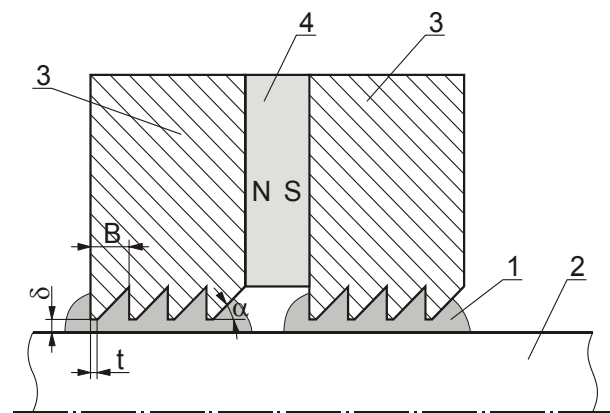
$$\vec{F} = \mu_0 \vec{M} \nabla \vec{H} \quad (1)$$

где:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;

$\vec{M}$  – намагниченность насыщения магнетита

(А/м);  $\nabla \vec{H}$  – градиент напряжённости магнитного поля (А/м<sup>2</sup>). Величина этой силы зависит от неоднородности магнитного поля, действующего на МНЖ и от свойств самой наножидкости.

*Сайкин Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий. E-mail: Saikin@eef.ispu.ru*



**Рис. 1.** Принцип действия магнитной наножидкости

С целью создания неоднородного магнитного поля в рабочем зазоре  $\delta$ , на обращённых к валу 2 цилиндрических полюсных приставках 3 выполнены зубцы. Зубцы могут быть расположены и на втулке, изготовленной из магнитопроводного материала и посаженной на вал. Они обычно имеют форму равнобедренных или прямоугольных трапеций с углом при основании  $45^\circ$  или  $60^\circ$ . В качестве источника магнитного поля используются постоянные магниты 4, изготовленные на основе сплавов самарий-кобальт или неодим-железо-бор [3, 4]. Максимальный критический перепад давлений единичного зубца МНЖГ в статическом режиме работы определяется из уравнения Бернулли:

$$\Delta p_{cm1} = \mu_0 \int_{H_{MIN}}^{H_{MAX}} M dH \quad (2)$$

где:  $M$  – намагниченность насыщения МНЖ,  $H_{MIN}$  и  $H_{MAX}$  – напряжённости магнитного поля на поверхностях МНЖ, обращённых к областям с меньшим и большим давлениями при критическом положении МНЖ.

Величина критического перепада давлений многозубцового МНЖГ в статическом режиме будет зависеть от числа зубцов на полюсных приставках:

$$\Delta P_{cn} = \sum_{i=1}^N \Delta p_{cm_i} \quad (3)$$

где  $N$  – число зубцов на полюсных приставках.

Точность определения перепада давлений зависит от точности расчёта магнитного поля с учётом нелинейностей магнитных характеристик МНЖ, постоянных магнитов и стале магнитопровода [5, 6].

При увеличении скорости вращения уплотняемого вала критический перепад давлений снижается. Это связано со значительным действием центробежных сил на МНЖ в рабочем зазоре герметизатора. Поэтому при проектировании МНЖГ необходимо учитывать коэффициент запаса, величина которого обычно задаётся в пределах от 1,5 до 3,0. Таким образом, величина рабочего перепада давлений должна быть меньше критического перепада давлений на величину коэффициента запаса.

Основными преимуществами МНЖГ перед традиционными уплотнениями являются: практически абсолютная герметичность, малый собственный момент трения, отсутствие износа, высокая долговечность и простота технического обслуживания. МНЖ представляет собой коллоидный раствор частиц магнетита в жидкости носителя. Жидкость-носитель должна быть инертна по отношению к герметизируемой среде, и не разрушаться под её воздействием. МНЖ находится в неоднородном магнитном поле герметизатора, что вызывает её перераспределение более, чем в 3 раза. Время расслоения МНЖ зависит от её свойств и параметров магнитного поля, поэтому условием сохранения работоспособности МНЖ в рабочем зазоре МНЖГ является допустимая величина магнитной индукции и её градиента, действующих на магнитную наножидкость.

Время расслоения магнитной жидкости определяется следующим образом:

$$t = \frac{g \cdot \eta \cdot h}{2 \cdot a^2 \cdot M \cdot \Delta B} \quad (4)$$

где:  $g$  - ускорение свободного падения;  $\eta$  – динамическая вязкость дисперсионной фазы МЖ;  $h$  – половина величины зазора;  $a$  – радиус магнитной частицы в жидкости;  $M$  - намагниченность магнитной жидкости;  $B$  - индукция магнитного поля.

Оборудование, в котором применяются МНЖГ, эксплуатируется в различных режимах, обусловленных технологическим процессом, поэтому величина перепада давлений может меняться в широком диапазоне. Если по технологического регламенту величина рабочего перепада давлений уменьшается, то можно снизить величину магнитной индукции в рабочем зазоре герметизатора и тем самым уменьшить расслоение МНЖ. Это приводит к увеличению её ресурса работы, а значит и МНЖГ в целом. Поэтому для технологического оборудования различного назначения разработаны конструкции МНЖГ с регулированием параметров магнитного поля в рабочем зазоре.

На рис. 2 представлена конструкция МНЖГ [7], предназначенного для герметизации валов диаметром до 100 мм и скоростью вращения до 5 м/с. МНЖГ включает в себя неподвижный магнитопровод 1, установленный в корпус 2, который изготовлен из немагнитопроводного материала. Подвижный магнитный узел состоит из постоянного магнита 3 и полюсной приставки 4, причём на обращённых друг к другу цилиндрических поверхностях неподвижного магнитопровода 1 и полюсной приставки 4 выполнена резьба. Рабочий зазор  $\delta$ , образованный между обращёнными друг к другу поверхностями неподвижного магнитопровода 1 и магнитопроводной втулки 5, расположенной на валу 6, заполнен МНЖ 7, которая удерживается в нём пондеромоторной силой, создаваемой полем постоянного магнита 3. Статические уплотнения 8 предназначены для предотвращения утечек уплотняемой среды между неподвижными сопрягаемыми деталями. Толщина "Δ" неподвижного магнитопровода выбирается из условия его насыщения. Она зависит от материалов стали магнитопровода и магнита, а также от величины рабочего зазора  $\delta$ . Эти параметры могут изменяться в достаточно широких пределах.

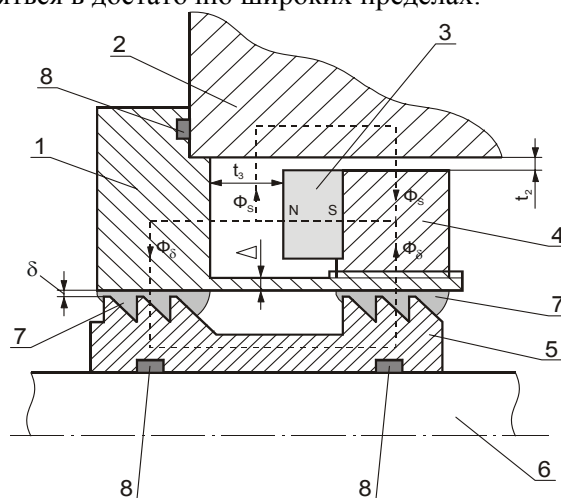


Рис. 2. МНЖГ, предназначенная для герметизации валов диаметром до 100 мм и скоростью вращения до 5 м/с

МНЖГ работает следующим образом. При отсутствии перепада давлений между герметизируемым объёмом и внешней средой, значение магнитной индукции в рабочем зазоре минимальное. Магнитное поле необходимо лишь для удержания МНЖ в рабочем зазоре. В этом случае подвижный магнитный узел занимает такое положение, при котором величина зазора  $t_3$  максимальна, а значит сопротивление магнитному потоку также максимально. Большая часть магнитного потока рассеивается. Значение потока  $\Phi_\delta$  в рабочем зазоре, а значит, магнитная индукция  $B_\delta$  и её градиент имеют минимальные значения. При повышении перепада давлений необходимо увеличить магнитную индукцию  $B_\delta$  в рабочем зазоре МНЖГ. Для этого уменьшают зазор  $t_3$ , что приводит к снижению потока рассеяния  $\Phi_s$ , увеличению рабочего потока  $\Phi_\delta$  и магнитной индукции  $B_\delta$  в рабочем зазоре МНЖГ. Уменьшение зазора  $t_3$  осуществляется за счёт вращения подвижного магнитного узла по резьбе, выполненной на внутренней цилиндрической поверхности неподвижного магнитопровода. При использовании такой конструкции можно подобрать величину магнитной индукции необходимую для обеспечения рабочего перепада давлений, что важно для повторно-кратковременного и кратковременного режимов работы герметизируемого узла технологического оборудования.

Предлагаемую конструкцию МНЖГ целесообразно использовать для герметизации валов химических и биологических реакторов. По условиям технологического цикла повышение давления до максимальной величины внутри реактора или откачка до вакуума происходит кратковременно, поэтому целесообразно производить регулирование магнитной индукции в рабочем зазоре. Кроме того, неподвижный магнитопровод всегда находится со стороны герметизируемого объёма и изготавливается из стали с повышенной коррозионной стойкостью, например, стали 20Х13, что позволяет защитить подвижный магнитопровод с постоянным магнитом от возможного воздействия герметизируемой среды и также расширяет функциональные возможности герметизатора.

На рис. 3 представлена конструкция МНЖГ имеющая основной и дополнительный магнитный узлы. Основной магнитный узел состоит из постоянного магнита 1, намагниченного в осевом направлении, полюсов 2 и 3, соединённых немагнитной втулкой 4 посредством сварки. Магнитный узел устанавливается в корпус 5. На обращённых друг к другу цилиндрических поверхностях корпуса 5 и полюса 2 выполнена резьба. Длина резьбы «L» выбирается из конструктивных соображений для каждого конкретного случая. Остальные части поверхностей полюса 2 и корпуса 5 изготовлены по посадке, что

гарантирует выполнение установочных размеров. Для предотвращения утечек среды между корпусом 5 и полюсом 2 установлено статическое уплотнение 6.

Рабочий магнитный поток  $\Phi_\delta$  основного узла замыкается по пути: постоянный магнит 1, полюс 2, рабочий зазор  $\delta$ , вал 7, рабочий зазор  $\delta$ , полюс 3, постоянный магнит 1 и образует замкнутую магнитную цепь. МНЖ 8 взаимодействует с полем постоянного магнита и удерживается в рабочем зазоре пондеромоторной силой, образуя препятствие для прохождения герметизируемой среды. Дополнительный магнитный узел состоит из постоянного магнита 9 и полюсных приставок 10 и 11, примыкающих к его торцевым поверхностям. При его установке увеличивается величина магнитного потока  $\Phi_\delta$ , проходящего через рабочий зазор  $\delta$ , а значит и величина пондеромоторной силы, удерживающей МНЖ в рабочем зазоре МНЖГ. При этом возрастает рабочий перепад давлений МНЖГ. Наличие дополнительного узла позволяет регулировать магнитный поток в рабочем зазоре  $\delta$ . При снятом дополнительном узле уменьшается расслоение МНЖ и тем самым увеличивается ресурс работы МНЖГ. Перед началом эксплуатации производят монтаж дополнительного магнитного узла. При этом магнитный поток  $\Phi_\delta$  в рабочем зазоре МНЖГ увеличивается, что позволяет получить требуемые эксплуатационные характеристики.

При использовании набора дополнительных магнитных узлов появляется возможность производить настройку МНЖГ на перепад давлений в зависимости от требуемых условий эксплуатации. Основной и дополнительный магнитные узлы выполнены таким образом, что наружный диаметр основного узла соответствует размеру  $D-\Delta$ , а внутренний диаметр дополнительного узла размеру  $D+\Delta$ . Это позволяет осуществлять быстрый монтаж и демонтаж дополнительного магнитного узла. Такую конструкцию МНЖГ целесообразно применять для герметизации вращающихся валов вакуумного оборудования, когда возникает необходимость в длительном хранении технологического узла перед началом его эксплуатации.

На рис. 4 представлена серия вакуумных МНЖГ на диаметры уплотняемых валов от 20 до 150 мм и скоростью вращения вала до 10 м/с.

На рис. 5 представлена конструкция МНЖГ для уплотнения вращающихся валов для случая, когда в герметизируемом объёме находится среда, содержащая магнитные включения [9]. МНЖГ состоит из кольцевой магнитной системы, включающей в себя постоянный магнит 1, намагниченный в осевом направлении, к торцевым поверхностям которого примыкают полюсные приставки 2 и 3, образующие рабочий зазор  $\delta$  с вращающимся валом 4, который заполнен

МНЖ 5. Для исключения попадания в рабочий зазор  $\delta$  магнитных включений со стороны герметизируемой среды предусмотрено средство защиты. Оно выполнено в виде магнитопроводной втулки  $б$  с зубцом, обращённым к валу и образующим с ним зазор  $\Delta$ . Величина этого зазора может отличаться от величины рабочего зазора

$\delta$ . На обращённых друг к другу цилиндрических поверхностях полюсной приставки  $3$  и магнитопроводной втулки  $б$  выполнена резьба. Особенность предлагаемой конструкции МНЖГ состоит в том, что в нём предусмотрено средство защиты в виде магнитопроводной втулки  $б$  с зубцом, обращённым к валу и образующим с ним зазор  $\Delta$ .

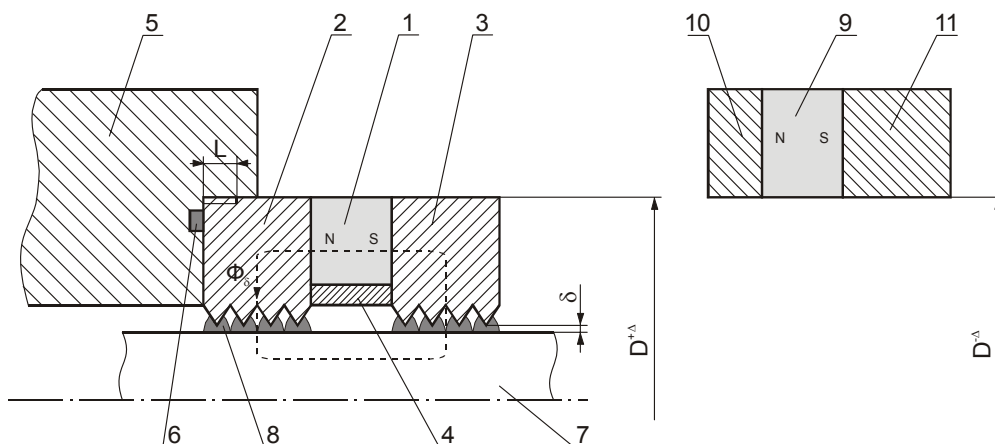


Рис. 3. МНЖГ имеющая основной и дополнительный магнитный узлы



Рис. 4. Серия вакуумных МНЖГ на диаметры уплотняемых валов от 20 до 150 мм и скоростью вращения вала до 10 м/с

Магнитный поток  $\Phi_{\Delta}$  проходит по пути: постоянный магнит  $1$ , полюсная приставка  $3$ , магнитопроводная втулка  $б$ , зазор  $\Delta$ , вал  $4$ , рабочий зазор  $\delta$ , полюсная приставка  $2$ , постоянный магнит  $1$ . Магнитные включения, попадая в зазор  $\Delta$ , удерживаются в нём пондеромоторной силой, что исключает их попадание в рабочий зазор  $\delta$  и контакт с МНЖ.

Величина магнитного потока  $\Phi_{\Delta}$ , а значит и пондеромоторной силы может регулироваться за счёт изменения величины зазора  $\alpha$ , что достигается за счёт выполнения резьбы на обращённых друг к другу цилиндрических поверхностях магнитопроводной втулки  $б$  и выступа полюсной приставки  $3$ . При увеличении зазора  $\alpha$  возрастает сопротивление для прохождения магнитного

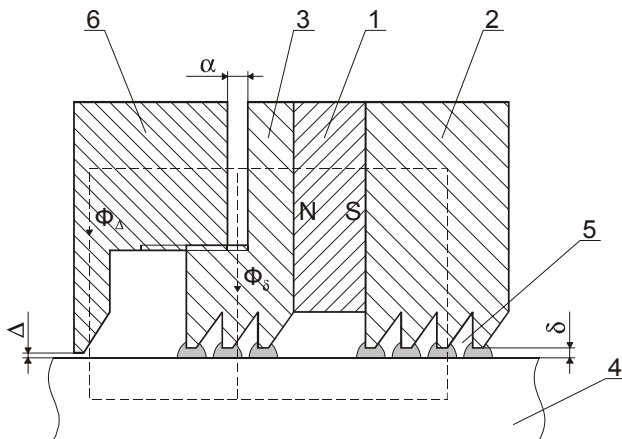
потока  $\Phi_{\Delta}$ , что приводит к уменьшению величины пондеромоторной силы. При наполнении зазора  $\Delta$  магнитными включениями производится демонтаж магнитопроводной втулки  $б$ . После очистки зазора  $\Delta$  от магнитных включений магнитопроводная втулка  $б$  устанавливается на прежнее место. Такая конструкция позволяет повысить надёжность работы МНЖГ при герметизации сред, содержащих магнитные включения.

Разработанные МНЖГ имеют следующие эксплуатационные характеристики:

- линейная скорость на поверхности вала в длительном режиме, м/с: от 0 до 15;
- критический перепад давлений, МПа: от 0,05 до 0,50;



- диаметры герметизируемых валов, мм: от 12 до 1500;
- наработка на отказ, тыс. час.: от 5 до 70;
- срок службы, тыс. час.: 120.



**Рис. 5.** МНЖГ для уплотнения валов, когда в герметизируемом объёме находится среда, содержащая магнитные включения

Разработанные конструкции МНЖГ обладают следующими преимуществами:

- обеспечивают увеличение ресурса работы, что особенно проявляется при кратковременном и повторно-кратковременном действии перепада давлений;
- позволяют настраивать рабочие характеристики в зависимости от требований технологического процесса, что даёт возможность использовать их при различных условиях;
- допускают длительное хранение герметизаторов перед эксплуатацией при сохранении их рабочих характеристик.

**Вывод:** большое разнообразие МНЖ [10] позволяет использовать МНЖГ для герметизации валов вакуумной арматуры и узлов специального назначения, химических и биологических реакторов, электротехнологического и энергетического оборудования. МНЖГ обладают высокой надёжностью, просты в обслуживании

и эксплуатации, не опасны для персонала и не наносят вред окружающей среде.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кондаков, Л.А. Уплотнения и уплотнительная техника. Справочник / Л.А.Кондаков, А.И.Голубев, В.В.Овандер и др. – М: Машиностроение, 1986. – 464 с.
2. Мельник, В.А. Торцовые уплотнения валов. Справочник. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
3. Пятин, Ю.М. Постоянные магниты. Справочник.– М.: Энергия, 1980.– 176 с.
4. Сайкин, М.С. Особенности выбора постоянных магнитов для магнитоожидкостных герметизаторов технологического оборудования // Вестник научно-промышленного общества. – М.: «АЛЕВ-В». – 2004. – Вып. 7 – С. 15-19.
5. Казаков, Ю.Б. Учёт перераспределения магнитных частиц в магнитной жидкости, находящейся в неоднородном магнитном поле герметизатора / Ю.Б. Казаков, М.С. Сайкин, Ю.Я. Щелькалов // Электротехника. – 2003. - №12 – С. 20-24.
6. Сайкин, М.С. Особенности конечно-элементного моделирования электромеханических магнитоожидкостных 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.
7. Сайкин, М.С. Магнитоожидкостное уплотнение. Свидетельство на полезную модель, РФ N 17961, МКИ F16J 15/40, Приоритет от 04.12.2000, опубл. 10.05.2001, Бюл. N 13.
8. Сайкин, М.С. Магнитоожидкостное уплотнение. Патент на полезную модель, РФ N 56531, МКИ F16J 15/54, Приоритет от 16.01.2006, опубл. 10.09.2006, Бюл. N 25.
9. Сайкин, М.С. Магнитоожидкостное уплотнение вала для сред с магнитными включениями. Патент на полезную модель, РФ N 83819, МКИ F16J 15/00, Приоритет от 29.01.2009, опубл. 20.06.2009, Бюл. N 17.
10. Курченко, А.Г. Магнитные жидкости – новый эффективный материал // Механизация и автоматизация. – 1990. - №4. – С. 34-35.

## DESIGN AND ANALYSIS OF SEALER CONSTRUCTIONS ON THE BASIS OF MAGNETIC NANOLIQUIDS FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

© 2010 M.S. Saykin

Ivanovo State Power University

New sealer designs on the basis of magnetic nanoliquids, intended for rotating shafts in vacuum, chemical, biological and the electtechnical equipment are offered. Their technical characteristics are given.

Key words: *sealer, magnetic nanoliquid, technological equipment*

Mikhail Saykin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Theoretical Bases of Electrotechnics and Electrotechnologies. E-mail: Saikin@eef.ispu.ru