

Т. В. Максимов, М. Ю. Клюкин, В. А. Максимов

## МАГНИТНЫЕ ЖИДКОСТИ: ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В УПЛОТНЕНИЯХ ВАЛОВ КОМПРЕССОРНЫХ МАШИН

*Ключевые слова: магнитная жидкость, уплотнение вала, компрессорная машина.*

*Приводятся модели магнитных жидкостей, конструкции уплотнений валов и перспективы использования в компрессорных машинах, фирмы-производители магнитных жидкостей.*

*Keywords: magnetic liquid, shaft seal, compressor machine.*

*Models of magnetic liquids, designs of shaft seals, and outlooks for their application in compressor machines, as well as manufactures of magnetic liquids have been presented.*

Магнитные жидкости (МЖ) или ферромагнитная жидкость — это уникальный искусственно созданный материал, обладающий одновременно как чисто жидкостными, так и изменяемыми под действием магнитного поля свойствами с широкими перспективами применения в технике, медицине, биологии, экологии.

Встречающиеся в природе жидкости с магнитным полем взаимодействуют слабо. Тем не менее, возможность управления жидкостью при помощи магнитного поля привлекательна для решения различных технических задач. Для этого были созданы искусственные сильномагнитные жидкие среды — магнитные жидкости, представляющие собой коллоидные растворы высокодисперсных ферромагнетиков в жидкостях — носителях, таких как вода, жидкие углеводороды, кремний- и фторорганические жидкости. Это удивительные жидкости, поверхность которых зависит от геометрии магнитного поля и образует в нем что-то вроде ежа. В середине 60-х годов они были практически одновременно синтезированы в США и России. В настоящее время магнитные жидкости активно изучают также и в большинстве развитых стран: Японии, Китае, Франции, Германии, Великобритании, Нидерландах, Израиле.

Магнитные жидкости уникальны тем, что высокая текучесть в них сочетается с высокой намагниченностью. Секрет такой высокой намагниченности заключается в том, что в обычную жидкость, например в керосин (жидкий углеводород), внедряется огромное количество мелких частиц (размер около 6..10 нм), которые представляют собой миниатюрные постоянные магниты. Каждая такая частица покрыта тонким слоем защитной оболочки, что предотвращает слипание частиц, а тепловое движение разбрасывает их по всему объёму жидкости. Поэтому в отличие от обычных суспензий частицы в магнитных жидкостях не оседают на дно, и последние могут сохранять свои рабочие характеристики в течение многих лет.

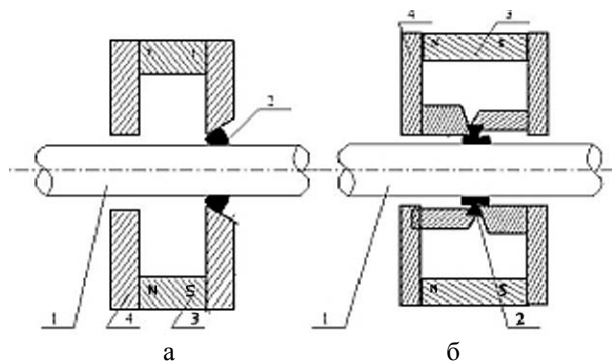
Каждый микроскопический постоянный магнетик хаотически вращается и перемещается в жидкой среде под действием теплового движения. Внешнее магнитное поле ориентирует магнитные моменты частиц, что приводит к изменению магнитных, реологических и оптических свойств

раствора. Высокая чувствительность свойств раствора к внешнему полю позволяет управлять поведением магнитных жидкостей и использовать их в прикладных задачах. Сочетание свойств МЖ позволяет использовать все преимущества жидкого материала (малый коэффициент трения в контакте с твердым телом, возможность проникать в микрообъемы, смачивание практически любых поверхностей и др.), в то же время, удерживая МЖ в нужном месте устройства под действием магнитного поля [1, 2]. Таким образом, магнитоуправляемость МЖ является ключевым свойством, обуславливающим эксплуатационные характеристики жидкостей в различных условиях применения.

Магнитные жидкости, как правило, производят небольшими партиями и используют в высокотехнологичных устройствах и приборах: системах герметизации ввода вращающихся валов, антифрикционных узлах и демпферах, в ультразвуковой дефектоскопии и высококачественных громкоговорителях, магнитных сепараторах редких элементов, датчика наклона и высокочувствительных измерителях ускорений, микроманометрах и исполнительных механизмах роботов.

Изобретение магнитных жидкостей и магнитоожидкостных герметизаторов (принципиальная схема приведена на рис. 1) в начале 60-х годов прошлого века было связано с выполнением космических программ NASA (в частности, для контроля за движением топлива в ракетном двигателе в условиях невесомости), поэтому магнитные жидкости и магнитоожидкостные герметизаторы сразу же нашли применение в космической и вакуумной технике. Пионером и мировым лидером в области технического и коммерческого использования магнитоожидкостных технологий, в том числе и вакуумных, является основанная в 1968 г. американская корпорация «Ferrofluidics Corporation» [3]. Изделия этой фирмы широко используются для герметизации вводов вращательного и более сложных видов движения в технологических процессах, где требуется поддержание глубокого вакуума — в производстве полупроводников, при напылении, металлизации, вакуумной сушке, в рентген-аппаратах, электронных

микроскопах, вакуумных печах, маховичных двигателях, масс-спектрометрах и т.п. В США существует постоянный и устойчивый промышленный спрос на магнитные жидкости и магнитожидкостные устройства.



**Рис. 1 - Принципиальная схема магнитожидкостного уплотнения: а) вал из магнитного материала, б) вал из немагнитного материала; 1 - вал, 2 – МЖ, 3 – кольцевой магнит, 4 – полюсные наконечники**

В странах СНГ исследования и разработки магнитожидкостных герметизаторов начались в конце 60-х – начале 70-х годов [3]. Магнитожидкостные герметизаторы достаточно широко применяются в космической технике, однако вплоть до настоящего времени их промышленное использование весьма ограничено, несмотря на явные технические преимущества по сравнению с традиционными уплотнениями. К таким преимуществам относятся:

- практически нулевые утечки герметизируемой среды при заданных условиях работы;
- отсутствие износа вала и низкие потери мощности двигателя вследствие чисто жидкостного трения в зазоре между подвижными и неподвижными элементами;
- отсутствие необходимости в смазке;
- простота технического обслуживания;
- незначительные эксплуатационные расходы.

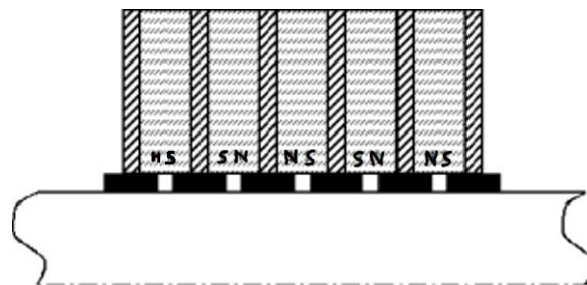
Магнитожидкостные герметизаторы сохраняют работоспособность в любом пространственном положении, в стояночном и динамическом режимах, в условиях переменных и знакопеременных давлений и вибрационных воздействий. К достоинствам можно отнести также такие уникальные свойства, как способность магнитной жидкости выталкивать наружу попадающие в рабочий зазор герметизатора немагнитные частицы пыли или влаги (магнитолевитационный эффект) и способность к самовосстановлению.

Традиционное магнитожидкостное уплотнение представляет собой кольцевой постоянный магнит с двумя магнитопроводящими кольцевыми полюсами. Заполнение зазора между валом и полюсами герметизирующим веществом (магнитной жидкостью) производится шприцом из-за проблемы доступа к зазору.

В самозаправляющемся уплотнении полюса на внутренней поверхности имеют кольцевые выступы, в зазоре между которыми в нерабочем состоянии удерживается магнитная жидкость. Этот зазор значительно шире радиального рабочего зазора между полюсами и валом, который нужно уплотнять. Введение вала в магнитную систему перераспределяет магнитный поток, и магнитная жидкость перемещается в рабочий зазор.

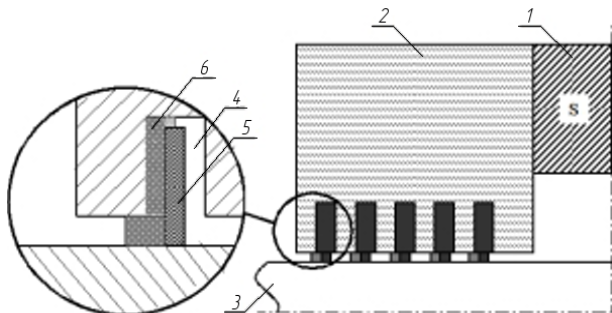
Магнитожидкостные герметизаторы в своем развитии прошли уже несколько поколений. Обычное магнитожидкостное уплотнение 1-го поколения состоит из кольцевого аксиально намагниченного постоянного магнита, охватывающего вал, к торцам которого примыкают полюсные приставки [4]. Обращенные друг к другу поверхности полюсных приставок и вала образуют зазор, в который вводится магнитная жидкость. На образующих зазор поверхностях полюсных приставок или вала располагаются кольцевые концентраторы, преобразующие магнитное поле в зазоре в резко неоднородное. МЖ втягивается в области с максимальной напряженностью магнитного поля, образуя магнитожидкостные жгуты вокруг вала, герметично перекрывающие зазор. Каждый жгут или магнитожидкостная пробка имеет повышенное внутренне давление, зависящее от магнитных свойств жидкости и характера распределения напряженности магнитного поля в зазоре.

В системах второго поколения изменение напряженности магнитного поля вдоль зазора достигается не изменением величины зазора, а изменением потенциала на поверхности полюсной приставки или вала. Уплотнение второго поколения состоит из ряда последовательно установленных кольцевых магнитов с аксиальной намагниченностью, которые разделены полюсными приставками, выполненными в виде тонких магнитопроводящих дисков (рис. 2). Рядом расположенные магниты имеют встречную намагниченность. Их суммарный магнитный поток выдавливает в рабочий зазор через ограниченную поверхность магнитопроводящего диска, проходит через вал, еще раз пронизывает рабочий зазор и замыкается на соседний магнитопроводящий диск противоположной полярности. В рабочем зазоре создается магнитное поле с напряженностью чередующейся полярности. Это значит, что напряженность магнитного поля в зазоре обязана проходить через нулевое значение.



**Рис. 2 - Принципиальная схема магнитожидкостного уплотнения 2-ого поколения**

Преимуществом уплотнения данного типа является существенное снижение радиальных размеров. Высота магнитов соизмерима с высотой зубцов уплотнения первого типа. Исключаются громоздкие полюсные приставки. Аксиальные размеры снижаются, но не столь значительно. Уплотнение третьего типа устроено следующим образом. К торцевым поверхностям кольцевого магнита 1 (рис. 3) примыкают полюсные приставки 2. На поверхностях полюсных приставок, обращенных к валу 3, выполнены кольцевые пазы 4.

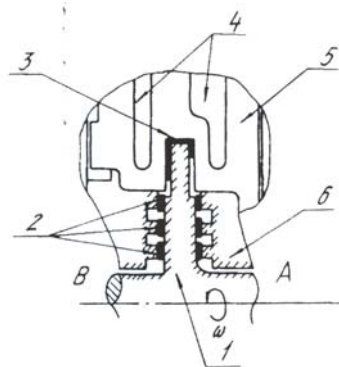


**Рис. 3 - Принципиальная схема магнито-жидкостного уплотнения 3-го поколения**

На валу 3 герметично установлены немагнитные диски 5, заходящие в пазы полюсных приставок с зазором. В зазор между полюсной приставкой и валом помещена магнитная жидкость, которая разбивается на отдельные магнито-жидкостные пробки 6. В данном уплотнении предлагается отказаться от канавки и ее роли – снижения напряженности поля вдоль рабочего зазора. Вместо этого на ровной поверхности полюсной приставки выполняется узкий кольцевой паз. Его роль заключается не в изменении напряженности магнитного поля в зазоре, а в создании полого пространства в теле полюсной приставки, окруженного с трех сторон средой с высокой магнитной проницаемостью. Такая конструкция обеспечивает, при отсутствии насыщения стали полюсных приставок, нулевую напряженность магнитного поля в глубине паза. Диски, закрепленные на валу, смещают вторую свободную поверхность магнито-жидкостной пробки в паз, где поле равно нулю. Магнито-жидкостная пробка в такой системе удерживает максимально возможный перепад давлений. С точки зрения формирования поля в рабочем зазоре, чем уже паз, тем эффективнее работает магнитная система. Достижимый технический результат заключается в повышении удерживающей способности магнито-жидкостного уплотнения, в снижении габаритов уплотнения.

В свое время создавались винчестеры с абсолютной герметизацией для отечественных компьютеров, которые выпускались десятками тысяч вплоть до 1992-1993 года, когда исчезла отечественная электронная промышленность и от перспективной программы пришлось отказаться. Для текстильной промышленности были разработаны подшипники с уплотнением, в качестве которого использовалась магнитная жидкость. Срок их

использования без дозаправки увеличился в шесть раз.



**Рис. 4 - Статико-центробежное уплотнение: 1 – вращающийся диск; 2 – положение жидкости при низких скоростях и при полной остановке (магнито-жидкостное уплотнение); 3 – положение жидкости при высоких скоростях (центробежное уплотнение); 4 – водяное охлаждение; 5 – немагнитный корпус; 6 – магнитная система; А – сторона высокого давления; В – сторона низкого давления**

В настоящее время величина уплотняемого перепада давлений в уплотнениях составляет до 1,0 МПа, наработка на отказ – до 15 лет.

Величина уплотняемого перепада давлений может быть повышена при использовании уплотнений комбинированного действия. Для примера на рис. 4 приведена конструкция статико-центробежного уплотнения [5].

При невращающемся роторе или низких скоростях магнитная жидкость удерживается магнитным полем в зазорах 2, а при высоких скоростях отбрасывается центробежными силами на периферию диска 1 в зазор 3. При этом уплотняемый перепад давлений повышается с  $8,6 \cdot 10^4$  Па до  $48,4 \cdot 10^4$  Па (т.е. более 5-и раз) при скоростях вращения вала 26000 об/мин.

На отечественном рынке среди фирм, производящих и реализующих магнито-жидкостные уплотнения, ведущую роль занимают следующие фирмы:

- ООО «РЛС»,
- компания «Волга Техком».

На зарубежном рынке:

- Ferrotec (США)
- VacSol GmbH (ФРГ)
- Hangzhou Vigor Magnet & Electronic Technology Co. (КНР)
- Rigaku Mechatronics Co., Ltd. (Япония)

На сегодняшний день основными производителями магнитных жидкостей Российской Федерации и ближайшего зарубежья являются:

- ООО «Научно-производственное предприятие «АМ-КУБ» (г. Екатеринбург)
- Проблемная научно-исследовательская лаборатория прикладной феррогидродинамики (ПНИЛ ПФГД) (г. Иваново)

– ООО "Научно-производственное внедренческое предприятие "Феррогидродинамика" (г. Николаев, Украина)

Зарубежные производители:

- компания «Ферротек» (США);
- фирма «Ферролабс» (США).

Обзор цен на магнитные жидкости представлен на примере предприятия «АМ-КУБ»:

Цена 1 литра магнитной жидкости на основе керосина

| Намагниченность насыщения кА/М | От 1 до 3 литров | От 3 до 5 литров | От 5 до 20 литров | От 20 и более литров |
|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| 10-15                          | 4000             | 3720             | 3460              | 3217                 |
| 15-30                          | 5000             | 4650             | 4325              | 4022                 |
| 30-70                          | 6000             | 5580             | 5189              | 4826                 |

Цена 1 литра магнитной жидкости на основе воды

| Намагниченность насыщения кА/М | От 1 до 3 литров | От 3 до 5 литров | От 5 до 20 литров | От 20 и более литров |
|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| 10-15                          | 4000             | 3720             | 3460              | 3217                 |
| 15-30                          | 5000             | 4650             | 4325              | 4022                 |

Цена 1 литра магнитной жидкости на основе силикона

| Намагниченность насыщения кА/М | От 1 до 3 литров | От 3 до 5 литров | От 5 до 20 литров | От 20 и более литров |
|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------|----------------------|
| 5-20                           | 20000            | 18600            | 17298             | 16087                |
| 20-40                          | 21000            | 19530            | 18163             | 16891                |
| 40-60                          | 22000            | 20460            | 19028             | 17696                |

Для сравнения:

- Магнитная жидкость на основе керосина, выпускаемая в ПНИЛ ПФГД стоит 700 руб/грамм

- Магнитная жидкость на основе силикона (Ферролабс) – \$1500 за 100мл.

- Магнитная жидкость на основе глицерина (Компания ВолгаТехком, закупаящая магнитную жидкость из Китая) 200\$ за 100мл, на основе трансформаторного масла 150\$ за 100мл.

Таким образом в настоящее время имеются все технологические возможности для разработки и внедрения магнитожидкостных уплотнений в компрессорной технике [3].

### Литература

1. Фертман, В.Е. Магнитные жидкости. Справочное пособие / В.Е. Фертман. – Минск: «Высшая школа», 1988. – 184 с.
2. Орлов, Д.В. Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1993. – 268 с.
3. Максимов, В.А. Магнитожидкостные уплотнения вращающихся валов компрессорных машин / В.А. Максимов, И.З. Галимзянов, М.Б. Хадиев. – М.: ЦИНТИХИМ – НЕФТЕМАШ, 1979. – 37с.
4. Щелькалов, Ю.Я. Принципы формирования рабочей зоны магнитожидкостного уплотнения нового поколения / Ю.Я. Щелькалов, С.М. Перминов, М.С. Перминов // Сб. науч. тр. XI-межд. Плесской конф. по магнитным жидкостям. – Иваново, 2004. – С.365-370.
5. Heshmat, H. Design and test of a Magnetic — Fluid, Static – Centrifugal seal / H. Heshmat, W. Shapiro, D.F. Wilcock // Lubrication Engineering. – 1981. – Vol. 37,9. – S.520 – 526.
6. Новиков Е.А. Расчёт характеристик упорных подшипников и торцовых уплотнений гидростатического действия / Новиков Е.А., Максимов В.А. // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – №8. – С.268-272
7. Гузельбаев Я.З. Синтез настроек системы магнитного подвеса стенда газодинамических испытаний малорасходных ступеней / Гузельбаев Я.З., Сусликов Э.В., Максимов В.А., Андрианов А.В. // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – №22. – С.99-105

© Т. В. Максимов - ст. препод. каф. компрессорных машин и установок КНИТУ; М. Ю. Клюкин – студ. КНИТУ; В. А. Максимов - д-р техн. наук, проф., зав. каф. компрессорных машин и установок КНИТУ, с.н.с. ЗАО «НИИТурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», smu@kstu.ru.