

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 магнитожидкостных 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 магнитожидкостные герметизаторы сразу же нашли применение в космической и вакуумной технике. Пионером и мировым лидером в области технического и коммерческого использования магнитожидкостных 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.

а б 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 магнитожид-костного уплотнения 3-ого 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 магнитожидкостные 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 магнитожидкостной пробки в паз, где поле равно нулю. Магнитожидкостная 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 магнитожидкостного 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 (магнитожидкостное 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 магнитожидкостные

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»:

Намагниченность насыщения кА/М	От 1 до 3 литров	От 3 до 5 литров	От 5 до 20 литров	От 20 и более литров
керосина	10-15	4000	3720	3460
воды	3217	15-30	5000	4650
силикона	4325	4022	30-70	6000
глицерина	5580	5189	4826	5-20
трансформаторного масла	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, закупающая 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].