

МАГНИТНЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ

There is a deep guide about magnetic fluid reservoir developed which can be used for sistematizing of research and technical information.

Введение. В спектре свойств природных жидкостей имеется существенный пробел - отсутствуют достаточно сильные, имеющие значение для технических приложений магнитные свойства. Этот пробел заполняется благодаря созданию обладающих широким спектром текучих и магнитных характеристик композиционных материалов, которые представляют собой дисперсии твердых ферромагнетиков в слабомагнитных (диа- и парамагнитных) жидкостях-носителях [1 - 3]. Разнообразие эффектов, обусловленных взаимодействием этих материалов с магнитным полем, в совокупности с вариациями геометрии магнитного поля привело к тому, что число действующих, существенно различающихся технических устройств и лабораторных установок, в которых используются феррожидкостные дисперсии, исчисляется сотнями.

В сравнении с природными жидкостями, стабильность этих сред в большей степени зависит от внешних условий, и в особенности от интенсивности и конфигурации магнитного поля. Основной причиной нестабильности являются магнитодипольные силы межчастичного взаимодействия, которые приводят к слипанию частиц и в конечном счете к разделению твердой ферромагнитной и текучей слабомагнитной фаз. Поэтому при разработке магнитожидкостных устройств приходится решать комплексную задачу формирования магнитного поля нужной конфигурации и создания текучей среды, обладающей нужными свойствами и достаточным уровнем стабильности в данных условиях. Практически любое такое устройство представляет собой сложную систему, в которой каждая пространственная точка взаимосвязанных полевого и текучего

вещественного континуумов должны характеризоваться широким набором физико-химических, магнитных, гидродинамических, теплофизических и др. параметров.

Разработка таких систем потребовала использования достижений различных дисциплин, таких, как физическая и коллоидная химия, теплофизика и статистическая физика, оптика, механика и электродинамика сплошных сред. Получение и изучение феррожидкостных дисперсий обогатило каждую из них, однако в целом относящиеся сюда сведения невозможно "разложить по полкам" этих дисциплин. Многочисленные публикации, патентная информация и материалы конференций свидетельствуют о формировании новой дисциплины, объектом изучения которой являются магнитожидкостные резервуары.

Под магнитожидкостным резервуаром будем понимать взаимосвязанную систему создающих магнитное поле твердых тел (источник магнитного поля) и некоторого объема текучего сильно намагничивающегося вещества (феррожидкостная дисперсия), которая характеризуется определенными функциональными свойствами (совокупность наблюдаемых либо регистрируемых физических явлений, обусловленных взаимодействием поля с веществом). Целью настоящей работы является развернутое определение понятия магнитожидкостного резервуара как единой физико-технической системы. Приведенное выше краткое определение объединяет четыре понятия: объем жидкости, ферромагнитная дисперсия, источник магнитного поля, функциональные свойства, которые далее рассмотрены более подробно.

1. **Объем жидкости.** Как известно, в жидком состоянии вещество может принимать различную форму, в зависимости от внешних условий. Основными факторами, формирующими объем природных жидкостей, являются твердые границы, поле тяжести, капиллярные и гидродинамические силы. Число факторов, влияющих на форму магнитных жидкостей, расширяется - добавляются массовые и поверхностные силы магнитного происхождения. Поле магнитных сил, как правило, имеет сложную конфигурацию, даже в тех случаях, когда оно в основном определяется источником. Механизм формирования объема еще больше усложняется, когда становятся существенными эффекты самовоздействия, обусловленные полями, индуцируемыми жидкостью.

По этим причинам приобретают значение большое число деталей, которые характеризуют всю охватывающую жидкий объем замкнутую поверхность и прилежащие к ней твердые тела. Термин "объем жидкости" не отражает специфику такой системы, поскольку в общепринятом смысле означает скалярную меру количества жидкости. Для обозначения совокупности факторов, определяющих пространственное размещение жидкости будем использовать термин жидкостный резервуар. Резервуар для жидкости, известный в гидротехнике, представляет собой частный случай определяемого здесь общезначимого понятия, которое объединяет гидротехнический резервуар, бытовой сосуд с жидкостью, дождевую каплю, жидкость в капиллярной трубке и т.д.

Важными внешними признаками резервуара являются число участков твердых и свободных (участков контакта с газом либо другой жидкостью) поверхностей, ограничивающих объем жидкости, и способ их объединения. Проведем классификацию резервуаров исходя из этих признаков. В общем случае различные типы резервуаров можно описать мнемонической формулой $mC \cup nT$. Здесь m , n числа свободных и твердых поверхностей, соответственно; символ \cup , обозначающий объединение, в конкретных случаях может видоизменяться, чтобы уточнить способ объединения. В рамках такой классификации имеется бесконечное число типов резервуаров, однако важнейшие из них характеризуются небольшими значениями чисел m и n , и мы их последовательно рассмотрим.

Все типы резервуаров удобно разбить по категориям, для каждой категории сумма $m+n$ постоянна. Возможны два типа резервуаров первой категории ($m+n=1$). При $m=1$, $n=0$ жидкость ограничена только одной свободной поверхностью. С-резервуар, к примеру, представляет взвешенную каплю (форма которой в общем случае может быть весьма сложной), самогравитирующую массу и т.д. При $m=0$, $n=1$ имеется закрытый, полностью заполненный жидкостью, сосуд (Т-резервуар).

Можно различать 5 типов резервуаров 2-й категории, для которых выполняется условие $m+n=2$. При $m=n=1$ возможны три случая. В резервуаре типа $C^1 \cup T^0$ жидкость заключена между замкнутыми непересекающимися свободной и твердой поверхностями. Здесь и далее в обозначениях резервуаров индексами "i" и "e" отмечаются замкнутые либо частично замкнутые поверхности, от-

носителем которых жидкость расположена внутри (i) и снаружи (e). Резервуару $C^i \cup T^e$ можно дать наглядное определение как твердой частицы, покрытой слоем жидкости, а резервуар T^i и C^e охарактеризовать как пузырь в заполненном закрытом сосуде. Вырожденные случаи этих резервуаров - T^e и C^e , которые представляют, соответственно, твердое тело и слабомагнитный жидкий либо газовый пузырь в неограниченном объеме сильномагнитной жидкости, можно отнести к резервуарам первой категории. В резервуаре $C \cup T$ свободная поверхность имеет с твердой общий замкнутый контур, что соответствует, к примеру, незаполненной емкости, либо капле, прилипшей к твердой поверхности. К резервуарам второй категории относятся также твердое тело, взвешенное в закрытом, заполненном жидкостью сосуде ($T^i \cup T^e$) и газовый пузырь в капле жидкости ($C^i \cup C^e$). Используя введенную символику, можно обозначить любую встречающуюся на практике ситуацию. Важнейшие случаи представлены в табл.

Табл. Обозначение и классификация резервуаров

Тип резервуара (наглядное определение)	Графическое обозначение	Мнемони- ческое обозначение	Категория резервуара
1	2	3	4
Капля		C	1
Заполненный сосуд		T	1
Пузырь в жидкости		C^e	1
Твердая частица в жидкости		T^e	1
Капля на твердой поверхности или незаполненный сосуд	 	$T \cup C$	2
Частица, покрытая слоем жидкости		$C^i \cup T^e$	2
Пузырь в заполненном сосуде		$T^i \cup C^e$	2
Пузырь в капле		$C^i \cup C^e$	2
Частица в заполненном сосуде		$T^i \cup T^e$	2

Продолжение табл.

1	2	3	4
Т U C-резервуар с подводом жидкости		$T^i U C$	2
Пробка в канале		$T^i U 2C$	3
Пузырь в канале		$(T^i U 2C)^e$	3
Капля между подвижными Т-границами		$C U 2T$	3
Пузырь между подвижными Т-границами		$(C U 2T)^e$	3
Торроидальная пробка между подвижными полузамкнутыми Т-границами		$2T^{i,e} U 2C$	4
Торроидальная пробка между подвижными простыми Т-границами		$2T U 2C$	4

Можно бесконечно повышать категорию резервуара, последовательно погружая в жидкий объем твердые и газообразные тела. Приведенные в таблице случаи составляют базовый набор, который лежит в основе более сложных комбинированных резервуаров.

Особую группу базовых резервуаров составляют вырожденные - такие, у которых один из однородных участков поверхности отодвигается на бесконечность. В этом случае категория резервуара понижается, что упрощает рассмотрение ситуаций.

Рассмотренная классификация использует только свойство текучести, с которым связана возможность образования свободной поверхности. Она в равной мере относится к природным и магнитным жидкостям. Все резервуары, приведенные в табл., в принципе могут быть сформированы для тех и других жидкостей. Специфика магнитожидкостных резервуаров состоит в том, что их свободные границы сохраняют устойчивость для более широкого диапазона внешних воздействий, а твердые границы испытывают более широкий спектр силовых воздействий со стороны жидкости.

Понятие резервуара как совокупности факторов, определяющих размещение жидкости, тесно связано с другими существенными признаками любого магнитожидкостного устройства. Размещение магнитной жидкости во многих случаях наглядно отражает структуру поля источника, а также в значительной мере определяет функциональные свойства системы. Поэтому определение "магнитожидкостный резервуар" (МЖ-резервуар) кратко и достаточно точно характеризует систему в целом, и его можно принять в качестве обобщенного названия магнитожидкостного устройства. Термин резервуар подразумевает наличие в системе жидкости, следовательно, равноценным, но более лаколичным является название магнитный резервуар.

В МЖ-резервуарах могут протекать разнообразные термогидродинамические процессы, связанные с изменением структуры феррофазы, движением твердых границ и другими динамическими воздействиями на жидкость. Изучение и систематизация этих процессов представляет собой обширную область исследований, которые отражены в [1-9]. Здесь обратим внимание лишь на процессы, которые имеют особое значение в связи с приведенной выше классификацией, а именно, на процессы, изменяющие тип резервуара. Эти изменения являются результатом развития неустойчивостей, которые возникают при достижении в системе критических параметров и приводят к делению жидкостного объема, проникновению в него газовых пузырей, отрыву жидкости от твердых поверхностей и т.д. Изучение условий, ограничивающих область стабильного существования различных типов резервуаров, представляет большой теоретический и практический интерес.

2. Феррожидкостные дисперсии. Рабочими жидкостями для магнитных резервуаров являются феррожидкостные дисперсии, поскольку другие, принципиально отличающиеся классы текучих сильномагнитных веществ в настоящее время неизвестны. Среди множества различных образцов такого рода веществ особое значение имеют определенным образом регламентированные физические либо технические материалы, которые будем называть магнитными жидкостями.

В зависимости от деталей структуры возможны более дифференцированные определения феррожидкостных дисперсий. Их свойства зависят от природы жидкостей-носителей и

ферромагнетиков, а также от размеров частиц и способа их стабилизации. Наиболее радикальным фактором является размер частиц. Энергия парного магнитодипольного взаимодействия возрастает пропорционально третьей степени диаметра частиц, что затрудняет получение текучих композиций по мере укрупнения частиц.

В литературе имеются весьма обширные сведения по исследованию свойств феррожидкостных дисперсий с частицами микронных размеров, относительная стабильность которых обеспечивается за счет структурирования феррофазы и гелеобразующих добавок [2, 3]. Эта группа дисперсий получила название магнитореологических суспензий, так как их специфической особенностью является неньютоновость кривой течения (бингамовского типа), параметры которой сильно зависят от интенсивности магнитного поля. На другом краю масштабов располагаются частицы с размерами порядка 10 нм, сопоставимые с размерами макромолекул. Дисперсии с такими размерами частиц стабилизируются методами коллоидной химии и называются феррожидкостными коллоидами. При разработке ферроколлоидов и суспензий приходится иметь дело с разнообразными образцами технологических феррожидкостных дисперсий, которые не могут быть отнесены к уже оформившимся группам и составляют базу для развития представлений о структуре этих веществ.

Лучшие образцы жидких ферроколлоидов по стабильности приближаются к природным жидкостям. Видимо, поэтому для них в научной литературе используется название магнитные жидкости. На наш взгляд, этому термину соответствует более широкое содержание. В этом названии не акцентируется внимание на структуре вещества, и оно точно отражает смысл понятия "рабочая жидкость магнитного резервуара", для которой важны три обстоятельства - сильная намагниченность, текучесть и стабильность, удовлетворяющие определенным критериям. Поэтому определение магнитной жидкости как регламентированной рабочей жидкости магнитных резервуаров является более гибким. Расширяющиеся в процессе исследований структурные представления автоматически могут быть включены в понятие магнитных жидкостей.

Наряду с поиском новых технологий, вопросы регламентации составляют основное содержание проблемы разработки магнитных

жидкостей. Рассмотрим, как изменяется смысл понятия магнитная жидкость при различных подходах к ее регламентации.

Первым шагом при разработке этих материалов является получение в результате некоторого химико-технологического процесса образца, стабильность которого не исследована. Такой образец представляет сырье для получения конечного продукта, удовлетворяющего требуемому уровню стабильности и который можно назвать технологической магнитной жидкостью. Далее производится контроль основных физических свойств (к примеру, денситометрических, магнитных, реологических) в процессе воздействия интенсивных массовых сил, температуры либо других дестабилизирующих факторов. После отделения нестабильной фракции и достижения стабильных значений параметров получается магнитная жидкость как физически определенный материал в указанном диапазоне внешних воздействий.

Возможен другой способ регламентации. Дисперсия испытывается в магнитожидкостном резервуаре, который моделирует условия некоторого класса магнитожидкостных устройств. Если образец обеспечивает функциональные свойства этого резервуара, то его можно характеризовать как техническую магнитную жидкость (к примеру, сепарирующую, уплотняющую, смазывающую и т.д.). Между физической и технической регламентациями имеется тесная связь. Возможны случаи, когда физическая регламентация может быть положена в основу технической и наоборот. Вместе с тем, в общем случае они не сводятся друг к другу. Основным требованием при физической регламентации является оценка стабильности по общезначимым свойствам, в то время как для конкретной технической жидкости могут иметь значение специфические свойства, к примеру, смазочные, медицинские и т.д. С другой стороны, достаточно распространенным является случай, когда изменение внешних условий в необходимом диапазоне приводит к существенному изменению общезначимых свойств жидкости, но при возврате к исходным условиям свойства восстанавливаются. Если такие псевдостабильные образцы воспроизводят существенные функциональные свойства резервуара, то они могут быть регламентированы как технические магнитные жидкости, не являясь при этом физически определенным материалом.

Рассмотренная выше дифференциация (технологические, физические, технические магнитные жидкости) не касается внутреннего

строения и может оказать пользу в качестве методологической основы при практическом использовании разнообразных образцов феррожидкостных дисперсий не взирая на неопределенность и сложность их структуры.

Конечным результатом научных исследований является разработка структурно-физических моделей для различных групп феррожидкостных дисперсий. Эти модели позволяют прогнозировать свойства дисперсий по небольшому числу параметров и представляют теоретическую основу для их регламентации. К настоящему времени усилиями многих исследователей такая модель разработана для жидких ферроколоидов (см., например, [9]).

Рассмотрим базовые структурные представления об этих материалах. В идеальном случае феррофаза коллоида представляет собой "идеальный газ" магнитодипольных частиц. Оценочная масса m частиц-"молекул" при размерах $d \sim 10$ нм в $\sim 5 \cdot 10^8$ раз больше массы молекул азота. Характерный размер концентрационной неоднородности частиц в поле тяжести во столько же раз меньше характерного размера барометрического распределения и составляет $l_n = kT/mg \sim 1,5$ м. Напряженность поля массовых сил в магнитных резервуарах может составлять 10^3 g. В таких условиях l_n снижается до миллиметров. Таким образом, эффекты сжимаемости магнитодипольного "газа" в равновесии могут быть весьма ощутимы. Однако характерные времена сжимаемости первоначально однородного распределения феррофазы идеального стабилизированного коллоида в гравитационном поле весьма продолжительны, поскольку скорость седиментации одиночных частиц невелика: $v = \Delta \rho g a^2 / (36\eta) \sim 50$ нм/час. В магнитных резервуарах она может достигать 50 мкм/час.

Условие идеальной стабилизации означает, что энергия парного взаимодействия частиц много меньше энергии их теплового движения. Если эти энергии становятся сравнимы (что на практике может выполняться), происходит "конденсация" феррочастиц в так называемые микрокапельные агрегаты, размеры которых на порядки превышают размеры отдельных частиц. В этом случае феррофазу можно рассматривать как разреженный дипольный "газ" с включениями "конденсата" - дипольной "жидкости". Динамические свойства таких материалов усложняются, поскольку времена осаждения и слияния микрокапель становятся сравнимыми с временами процессов в измерительных и технических устройствах.

Энергия взаимодействия частиц в микрокаплях сравнительно невелика, вследствие чего термодинамические и гидродинамические процессы существенно взаимосвязаны. В зависимости от внешних условий состояние феррофазы может изменяться от "газообразного" (при полностью разрушенной структуре в сдвиговом потоке) до "конденсированного" (при осаждении и слиянии микрокапель в макроскопические образования в статических условиях).

3. Разработка источников магнитного поля является областью технической физики, которая имеет свою самостоятельную историю развития, и ее достижения используются при разработке МЖ-резервуаров. Более детальное обсуждение этого вопроса выходит за рамки настоящей работы. Здесь отметим две проблемы: разработку экономичных магнитных систем с максимально достижимыми значениями градиента поля, которая приобрела особую значимость в связи с созданием магнитожидкостных уплотнений, и разработку системы, обеспечивающей постоянный градиент поля в значительном объеме, что важно для магнитожидкостных сепараторов.

4. Функциональные свойства резервуаров связаны с качественно различающимися механизмами взаимодействия жидкости с полем и новыми направлениями их применения. По богатству таких свойств феррожидкостные дисперсии являются беспрецедентным материалом, что инициировало бурную изобретательскую деятельность. В обзоре [10], к примеру, описано свыше 1500 патентов и авторских свидетельств. Полный перечень на настоящее время можно оценить в 3000 наименований. Функциональных свойств, имеющих принципиальное значение, сравнительно немного, и они могут быть положены в основу систематизации этой обширной информации. Каждое из них объединяет большое число конкретных устройств, отличающихся по конструктивным признакам, эффективности, назначению и другим второстепенным показателям. Разработка достаточно дифференцированной системы функциональных свойств является важной задачей, которая требует отдельного обсуждения.

В заключение сформулируем общие направления развития проблемы магнитных резервуаров. Это - исследование и повышение структурной, гидромеханической и термической стабильности, исследование и открытие новых функциональных свойств, а также совершенствование технологии изготовления этих объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенцвейг Р. Феррогидродинамика. - М.: Мир, -1989.
2. Библик Е.Е. Реология дисперсных сред. Л.: ЛГУ, 1981.
3. Шульман З.П., Кордонский В.И. Магнито-реологический эффект. - Мн.: Наука и техника, 1982.
4. Шлиомис М.И. Магнитные жидкости//УФН. - 1974. -Т. 112, выш. 3. - С. 427-458.
5. Гогосов В.В., Налетова В.А., Шапошникова Г.А. Гидродинамика намагничивающихся жидкостей//Итоги науки и техники. Серия: Мех. жид. и газа. - М.: ВИНТИ, - 1981. - Т. 10.
6. Баштовой В.Г., Берковский В.М., Вислович А.Н. Введение в термомеханику магнитных жидкостей. - М., ИВТАН. - 1985, 188 с.
7. Фертман В.Е. Магнитные жидкости. - Мн.: Вышэйшая школа. - 1988, 182 с.
8. Берковский В.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. - М.: Химия. - 1989, 238 с.
9. Блум Э.Я., Майоров М.М., Цеберс А.О. Магнитные жидкости. - Рига: Зинатне. - 1989, 336 с.
10. Bashtovoi V.G., Krakov M.S., Reks A.G. Magnetic fluids and powders nev technological materials. V. 1-4. Minsk. 1991.