

УДК 537.6

Методы синтеза магнитных жидкостей (обзор)*

С.А. Новопашин, М.А. Серебрякова, С.Я. Хмель

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: khmel@itp.nsc.ru

Проведен обзор современного состояния исследований в области методов синтеза магнитных жидкостей. Основной упор сделан на анализ методов, в которых используются магнитные наночастицы в инертной оболочке.

Ключевые слова: магнитная жидкость, коллоидный раствор, наночастицы в углеродной оболочке.

Введение

Магнитная жидкость (МЖ) представляет собой устойчивый коллоидный раствор на основе магнитных наночастиц в базовой жидкости. Магнитную жидкость также называют феррожидкостью или ферромагнитной жидкостью, на английском языке соответственно — magnetic fluid, magnetic nanofluid, magnetic liquid или ferrofluid (Joseph, Mathew, 2014; Genc, Derin, 2014; Vekas et al., 2009; Odenbach, 2009). Впервые МЖ были синтезированы в середине 60-х годов двадцатого века (Papell, 1965; Rosensweig, Kaiser, 1967). С этого времени начались интенсивные исследования свойств МЖ, поиск новых методов синтеза МЖ и областей их практического использования. Магнитные жидкости обладают уникальным сочетанием текучести и способности взаимодействовать с магнитным полем, поэтому они представляют большой интерес для практических применений. МЖ широко используются в энергетике (интенсификация теплообмена, магнитные уплотнения, магнитные смазки) (Joseph, Mathew, 2014; Odenbach, 2009; Орлов и др., 1976); для хранения и обработки информации (Брагинский, Тимофеев, 1987); в экологии (сбор нефтесодержащих загрязнений в воде, удаление органических отходов из воды с последующей их каталитической переработкой) (Баранов, Губин, 2009; Kaur et al., 2014); в медицине (адресная доставка лекарств, контрастирование для магнитной резонансной томографии, гипертермия) (Joseph, Mathew, 2014; Vekas et al., 2009; Odenbach, 2009; Баранов, Губин, 2009; Faraji et al., 2010; Laurent et al., 2011; Mahmoudi et al., 2011; Sharifi et al., 2012); при обогащении полезных ископаемых (Joseph, Mathew, 2014).

Фундаментальные исследования свойств МЖ связаны с изучением их агрегативной устойчивости, магнитной гидродинамики, теплофизических свойств, динамики намагничивания и релаксации магнитных моментов в однодоменных ферромагнитных или

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI60414X0004).

ферритмагнитных частицах. Отметим одну из первых работ по анализу физических свойств МЖ (Шлиомис, 1974).

К настоящему времени благодаря развитию нанотехнологий, созданию нового поколения аналитических приборов и прогрессу вычислительной техники поняты и описаны многие физические явления в МЖ, расширены области их практического использования и созданы новые методы синтеза. Интерес к исследованию и применению магнитных жидкостей продолжает расти. За последние пять лет в ведущих мировых изданиях опубликовано несколько десятков обзорных работ (многие из них цитируются в настоящей статье).

Важными задачами при получении МЖ являются защита коллоидных частиц от окисления и предотвращение их агломерации и коагуляции как в процессе получения, так и при переводе частиц в коллоидное состояние в жидкости-носителе. Также для ряда приложений, например в медицине, требуется устранение возможности взаимодействия материала магнитной частицы с окружающей средой. Решают эти задачи двумя способами. В большинстве методов получения МЖ на стадии синтеза наночастиц используются поверхностно-активные вещества (ПАВ). Вторым способом является синтез магнитных наночастиц, находящихся в оболочке, которая не позволяет частицам сближаться на расстояние, при котором их уже будет невозможно разделить ультразвуковым воздействием.

В представленном обзоре подробно рассмотрены методы синтеза магнитных наночастиц в углеродной оболочке и использование этих наночастиц для синтеза МЖ. Другие методы синтеза наночастиц в других инертных оболочках будут отмечены особо. Для полноты картины представлены общие свойства МЖ и рассмотрены современные методы синтеза МЖ на основе обзорных работ, опубликованных за последние годы.

1. Общие свойства магнитных жидкостей

Магнитная жидкость состоит из дисперсной твердой магнитной фазы, дисперсионной среды и стабилизатора. Свойства магнитной жидкости определяются совокупностью характеристик входящих в нее компонентов, варьируя которые, можно в довольно широких пределах изменять свойства МЖ.

Магнитные наночастицы вследствие малости их размеров (5–15 нм) находятся в интенсивном броуновском движении, что обеспечивает седиментационную устойчивость магнитных коллоидов и их равномерное распределение по объему жидкости. Для агрегативной и пространственной устойчивости коллоидных систем на основе магнитных частиц необходимо, чтобы сближение частиц вызывало появление сил отталкивания между ними. Это может достигаться двумя способами: либо путем введения в МЖ определенного количества стабилизатора — ПАВ, либо за счет использования ионной жидкости в качестве несущей. На рис. 1 приведена структура магнитной жидкости, стабилизированной ПАВ (Odenbach, 1998; Sharifi et al., 2012). Обычно в качестве ПАВ используют вещества, состоящие из полярных органических молекул, строение которых характеризуется наличием короткой функциональной группы (щелочной, кислотной и др.) и длинной хвостовой цепочки (углеводородной, фторуглеродной и др.). Часто в качестве классического стабилизатора для магнитных жидкостей используется олеиновая кислота.

Устойчивые магнитные жидкости содержат частицы размером 5–15 нм. Если размер частиц превышает 30–40 нм, то такие жидкости уже являются магнитореологическими. Их особенностью является резкое увеличение вязкости под воздействием магнитного поля, а в сильных полях они могут полностью затвердевать. Такое свойство позволяет отнести их к так называемым «умным» материалам с нелинейным откликом на внешнее воздействие (de Vicente et al., 2011; Lopez-Lopez et al., 2012). Магнитные частицы для МЖ являются однодоменными, для магнитореологических жидкостей — полидоменными. Классификации магнитных жидкостей по размерам магнитных частиц проведены

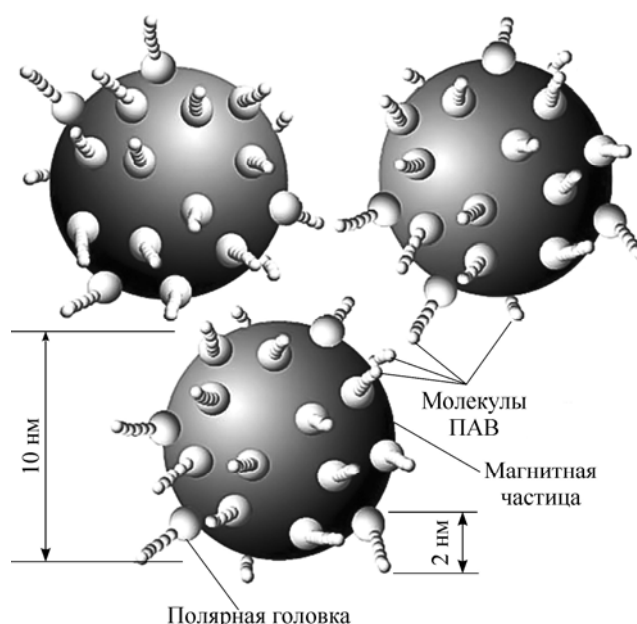


Рис. 1. Структура магнитной жидкости, стабилизированной ПАВ.

в работах (Joseph, Mathew, 2014; Lopez-Lopez et al., 2012). Отметим, что синтез, исследование и использование магнитных жидкостей начали интенсивно развиваться с 1960-х годов, т.е. задолго до появления термина «нанотехнология» (Joseph, Mathew, 2014; Genc, Derin, 2014; Vekas et al., 2009; Odenbach, 2009). Несмотря на название, ферромагнитные жидкости (МЖ) не проявляют ферромагнитных свойств, поскольку не сохраняют остаточной намагниченности после исчезновения внешнего магнитного поля. Поэтому МЖ являются парамагнетиками и их часто называют суперпарамагнетиками из-за высокой магнитной восприимчивости.

Так как магнетизм является проявлением коллективного взаимодействия атомных магнитных диполей, то на него оказывают сильное влияние температурный и пространственный факторы. Когда размер частицы ферромагнетика или ферримагнетика становится меньше критического значения, частица переходит из полидоменного в однодоменное состояние. Критический размер однодоменной частицы зависит от ее формы, температуры и кристаллической магнитоанизотропии. При дальнейшем уменьшении размера частицы тепловой энергии оказывается достаточно, чтобы хаотизировать магнитные диполи за короткий промежуток времени (Faraji et al., 2010; Jeong et al., 2007). Такие маленькие частицы не имеют собственного магнитного момента в отсутствии внешнего поля, но в его присутствии существенно усиливают магнитное поле. Эти частицы подобны парамагнитным атомам, но с очень большим собственным магнитным моментом. Они являются суперпарамагнетиками и в последнее время также используются для синтеза магнитных жидкостей (Faraji et al., 2010; Laurent et al., 2011; Mahmoudi et al., 2011; Jeong et al., 2007). На рис. 2 представлена классификация МЖ по размеру использованных наночастиц (Faraji et al., 2010; Jeong et al., 2007).

Эффективность технологий синтеза МЖ оценивается по достижению основных физических характеристик: коллоидальная стабильность в течение длительного времени, намагниченность насыщения, вязкость, диапазон рабочих температур. Качественные магнитные жидкости сохраняют устойчивость в течение двух–пяти лет и обладают при этом хорошей текучестью в сочетании с магнитными свойствами.