

03

## Динамика агломерации наночастиц в магнитной жидкости при изменении магнитного поля

© Д.А. Усанов, А.Э. Постельга, Т.С. Бочкова, В.Н. Гаврилин

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
410012 Саратов, Россия  
e-mail: usanovda@info.sgu.ru

(Поступило в Редакцию 27 апреля 2015 г. В окончательной редакции 21 июля 2015 г.)

Установлено, что в магнитной жидкости зависимость длины агломератов из магнетитовых наночастиц от величины приложенного магнитного поля имеет три характерных участка: в области слабых магнитных полей — существенное увеличение длины агломератов с ростом поля, с увеличением поля — участок незначительного увеличения средней длины агломератов и с дальнейшим ростом поля — резкое увеличение длин агломератов. Показано, что увеличение длин агломератов в области сильных магнитных полей происходит за счет сближения соседних агломератов вплоть до их полного объединения. При этом общее количество агломератов уменьшается.

При использовании магнитных жидкостей важно знание их гидродинамических свойств, которые сильно изменяются в процессе агломерации магнитных частиц. Упорядоченное расположение кластеров магнитных частиц диаметром  $1.5 \mu\text{m}$  в жидкости рассматривалось в [1]. Авторами [1] была показана возможность управления периодом таких структур. Результаты исследования механизмов взаимодействия частиц в магнитной жидкости приведены также в [2,3]. Возможность использования явления пространственной упорядоченности магнитных частиц в жидкости отмечалась авторами [4]. В [5] приведены результаты визуального наблюдения агломератов в объеме магнитной жидкости, магнетитовые частицы которой имели микронные размеры. В настоящей работе рассматривалась динамика образования агломератов в магнитной жидкости, магнетитовые частицы которой имеют нанометровые размеры.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании динамики изменения длин агломератов наночастиц магнитной жидкости при изменении величины индукции приложенного магнитного поля.

Диспергированные частицы в магнитных жидкостях, имеющие размеры порядка  $10^{-2} - 10^{-3} \mu\text{m}$ , не могут наблюдаться в оптический микроскоп. Размеры агломератов, образующихся при помещении магнитной жидкости во внешнее магнитное поле, могут быть на 2–3 порядка выше, вследствие чего представляется возможным визуальное наблюдение динамики их образования с помощью оптического микроскопа при соответствующем увеличении.

В ходе выполнения настоящей работы исследовалась магнитная жидкость, представляющая собой однородную взвесь однодоменных частиц магнетита в керосине, стабилизированных олеиновой кислотой со средним диаметром феррочастиц  $d = 5.5 \text{ nm}$  и объемной долей твердой фазы  $\varphi = 0.1$ . Значения этих параметров были определены по методике, описанной в работе [6].

При комнатной температуре слой магнитной жидкости, нанесенный на стеклянную подложку, помещался на предметный стол оптического микроскопа между полюсами двух постоянных магнитов в область однородного магнитного поля с индукцией  $0.02 \text{ T}$  (рис. 1).

При воздействии магнитного поля частицы выстраивались вдоль силовых линий магнитного поля, образуя серию нитевидных агломератов. Фотографии магнитной жидкости, полученные с использованием оптического микроскопа (HIROX KH-7700), подвергались гранулометрическому анализу для определения длин и соответствующих концентраций агломератов. Найденные таким образом длины агломератов лежали в интервале от 13

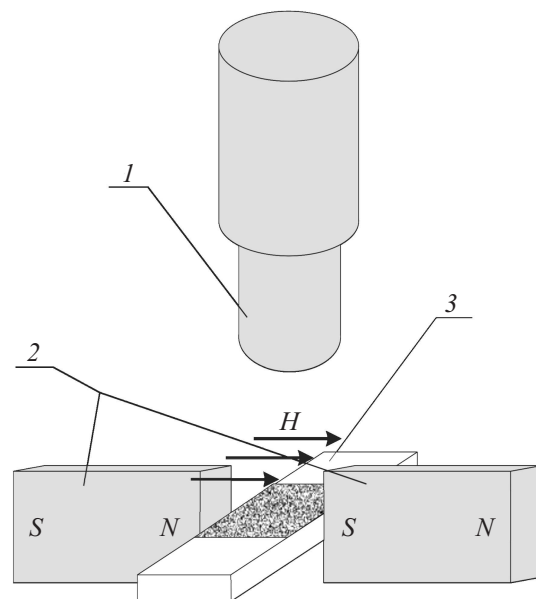
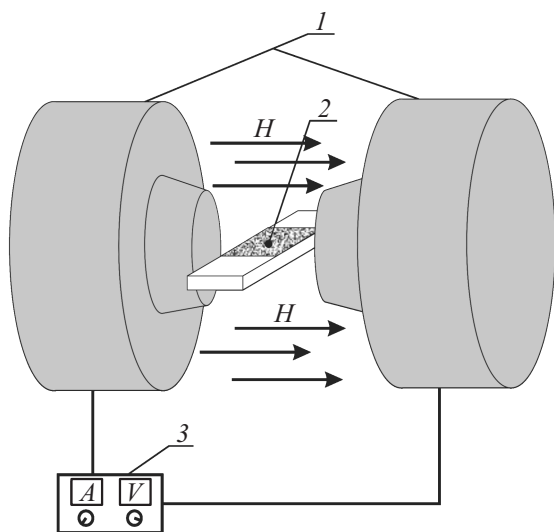


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — оптический микроскоп HIROX KH-7700, 2 — постоянные магниты, 3 — магнитная жидкость, нанесенная на стеклянную подложку.



**Рис. 2.** Схема установки экспериментальной установки: 1 — катушки электромагнита, 2 — магнитная жидкость, нанесенная на стеклянную подложку, 3 — блок питания электромагнита.

до  $97 \mu\text{m}$  со средним значением  $36.14 \mu\text{m}$  при значении индукции магнитного поля  $0.02 \text{ T}$ .

Было проведено исследование размеров агломератов после высушивания слоя магнитной жидкости в магнитном поле с индукцией  $0.02 \text{ T}$ . Значения длин агломератов в этом случае составляли от  $13$  до  $50 \mu\text{m}$  со средним значением  $23.5 \mu\text{m}$ .

Для получения характеристик агломератов в высушенном слое магнитной жидкости, при значениях индукции магнитного поля в диапазоне от  $0.02 \text{ T}$  до  $0.13 \text{ T}$ , была использована установка, состоящая из двух катушек электромагнита (рис. 2). При комнатной температуре слой магнитной жидкости, нанесенный на стеклянную подложку, помещался между полюсами электромагнита в область создаваемого при пропускании тока через его катушки однородного магнитного поля. Полученный под действием поля слой магнитной жидкости высушивался, и исследование размеров агломератов в нем осуществлялось с помощью оптического микроскопа.

В результате измерений были определены пороговые значения индукции магнитного поля:

$2.5 \text{ mT}$  — значение индукции магнитного поля, при котором появлялась возможность наблюдать нитевидные агломераты средствами оптической микроскопии, средние значения длин которых составили  $5 \mu\text{m}$ ;

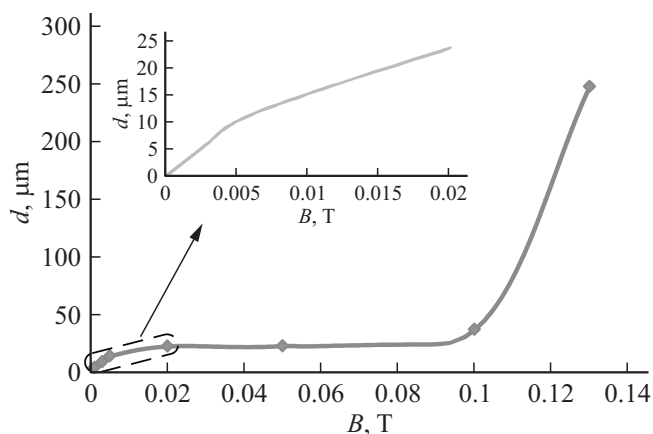
$0.1 \text{ T}$  — значение индукции магнитного поля, при котором наблюдалось резкое увеличение среднего значения длин агломератов.

При достижении определенных значений индукции магнитного поля агломераты приобретали сигарообразную форму. Дальнейшее увеличение магнитного поля сопровождалось образованием новых агломератов.

На рис. 3 приведена зависимость длин агломератов от величины магнитного поля в тонком слое магнитной жидкости.

На вставке к рисунку видно, что при достижении порогового значения индукции магнитного поля  $2.5 \text{ mT}$  среднее значение длин агломератов составляло  $5 \mu\text{m}$ , и они становились различимыми в оптический микроскоп. При дальнейшем увеличении поля размеры агломератов магнитной жидкости в тонкой пленке увеличивались, и их концентрация изменялась с  $4.3 \cdot 10^2$  до  $1 \cdot 10^3 \text{ mm}^{-2}$ , причем средняя длина агломератов незначительно увеличивалась вследствие того, что при значениях магнитной индукции выше  $0.02 \text{ T}$  подавляющее большинство частиц уже приняло участие в процессе агломерации. Кривая становилась пологой, что можно объяснить ростом дипольного взаимодействия при сближении с соседними доменами. При превышении значения индукции магнитного поля  $0.1 \text{ T}$  происходило резкое увеличение длин агломератов, что сопровождалось значительным уменьшением их количества, концентрация частиц уменьшалась до  $0.50 \cdot 10^2 \text{ mm}^{-2}$  ввиду того, что отдельные нити объединялись друг с другом: при увеличении магнитного поля соседние агломераты сближались до критических расстояний вплоть до полного объединения.

Из рис. 3 по результатам гранулометрического анализа следует, что в диапазоне значений индукции магнитного поля от  $0.2$  до  $0.7 \text{ T}$ , средние значения длин агломератов практически не изменялись. Исследования частотной зависимости коэффициента отражения СВЧ-излучения в диапазоне  $27\text{--}34 \text{ GHz}$  от полубесконечного слоя магнитной жидкости, заполняющей поперечное сечение волновода, позволило подтвердить тот факт, что средние значения длин агломератов, определенные в результате гранулометрического анализа, изменялись слабо при изменении индукции внешнего магнитного поля в диапазоне от  $0.2$  до  $0.7 \text{ T}$ , для которого характерно отсутствие существенного изменения среднего значения их длин. В этом диапазоне изменения магнитных



**Рис. 3.** Зависимость длин агломератов от величины магнитного поля в тонком слое магнитной жидкости.

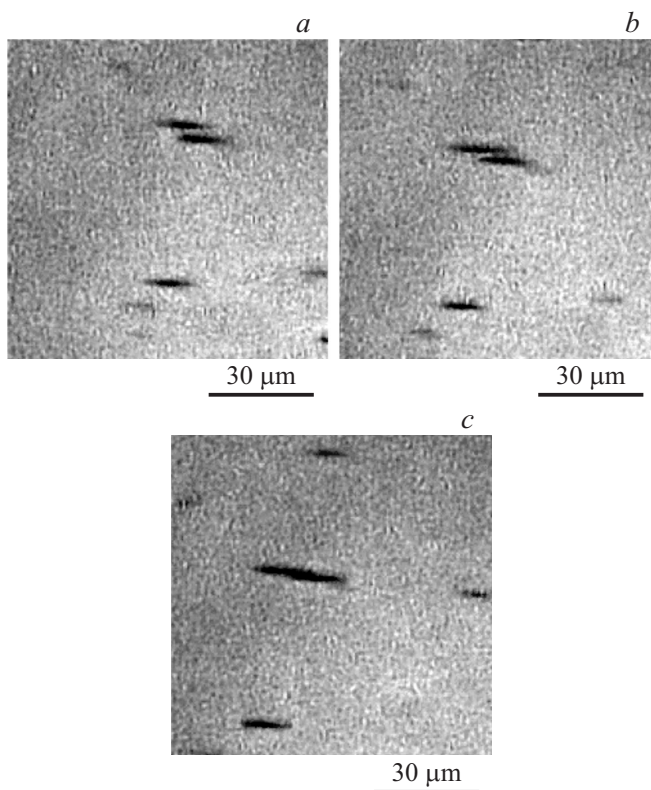


Рис. 4. Покадровая съемка образования агломератов.

полей частотная зависимость коэффициента отражения СВЧ-излучения оставалась практически неизменной.

Процесс объединения агломератов иллюстрируется рис. 4 в виде покадровой съемки при увеличении индукции магнитного поля.

Таким образом, было установлено, что процессы агломерации магнитных наночастиц в объеме и тонком слое магнитной жидкости под действием магнитного поля существенно зависят от его величины. Были найдены две пороговые величины индукции магнитного поля для магнитной жидкости со средним размером феррочастиц  $d = 5.5 \text{ nm}$ , объемной долей твердой фазы  $\varphi = 0.1$ , на основе керосина, стабилизированной олеиновой кислотой. При первом значении индукции магнитного поля ( $\sim 0.02 \text{ mT}$ ) наблюдалось прекращение роста длин агломератов, вплоть до значения индукции магнитного поля  $0.1 \text{ T}$ . Дальнейшее увеличение величины индукции магнитного поля приводило к резкому росту размеров агломератов за счет объединения агломератов с меньшими размерами.

Плато на рис. 3 зависимости средней длины агломератов от величины индукции внешнего магнитного поля можно объяснить тем, что момент силы взаимодействия частиц, возникающий при броуновском движении, больше момента силы приложенного магнитного поля, что не позволяет образовываться агломератам, среднее значение длин которых превышает  $38 \mu\text{m}$ , до значения

индукции магнитного поля  $0.1 \text{ T}$ . При превышении данного порогового значения величины индукции магнитного поля влияние броуновского движения становилось меньше влияния магнитного поля, что способствовало образованию более длинных агломератов при объединении агломератов меньших размеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 1376 и 1575).

## Список литературы

- [1] Антонюк О.А., Коваленко В.Ф., Молдован Б.Н., Петричук М.В. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 6. С. 93–97.
- [2] de Gennes P.G., Pincus P.A. // Phys. Condens. Mat. 1970. Vol. 11. P. 189.
- [3] Jordan P.C. // Mol. Phys. 1973. Vol. 25. N 4. P. 1412
- [4] Xu X., Friedman G., Humdeld K.D., Majetich S.A., Asher S.A. // Chem. Mater. 2002. Vol. 14. N 3. P. 1249.
- [5] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Ермолаев С.А. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 22. С. 82–85.
- [6] Усанов Д.А., Постельга А.Э., Алтынбаев С.В. // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 11. С. 30–33.