

УДК 538.955

DOI: 10.17223/00213411/62/10/176

*Ю.И. ДИКАНСКИЙ, А.Г. ИСПИРЯН, С.А. КУНИКИН*

## О ЗАВИСИМОСТИ ПРОЦЕССОВ КИНЕТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТНЫХ ДИСПЕРСНЫХ НАНОСИСТЕМ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ И ИЗМЕНЕНИЯ ИХ СТРУКТУРЫ\*

Приведены результаты экспериментального исследования процессов релаксации намагниченности ансамбля магнитных наночастиц, а также экспериментальные данные, свидетельствующие о нелинейной зависимости магнитной восприимчивости магнитных коллоидов от объемной концентрации дисперсных наночастиц. На основе данных о дисперсии магнитной восприимчивости и ее зависимости от температуры определены зависимости времени релаксации намагниченности от концентрации наночастиц и температуры. Обнаружена сложная немонотонная зависимость этого времени от концентрации дисперсных частиц и, близкая к экспоненциальной, ее зависимость от температуры, характерная для системы взаимодействующих дипольных частиц, находящейся в состоянии так называемого дипольного стекла. Установленные особенности процессов релаксации намагниченности связаны с проявлением взаимодействия частиц и возможным изменением структурного состояния коллоида.

**Ключевые слова:** магнитные наночастицы, магнитная восприимчивость, суперпарамагнетизм, магнитная релаксация.

### Введение

Первоначально считалось [1], что процессы намагничивания магнитных жидкостей (магнитных коллоидных наносистем) могут быть описаны с помощью теории Ланжевена, в связи с чем их магнитная восприимчивость может быть выражена такой же формулой, как и магнитная восприимчивость парамагнитных газов. Однако первые же исследования концентрационной зависимости магнитной восприимчивости магнитных коллоидов [2] выявили ее существенное отличие от линейной, что привело к развитию исследований взаимодействия частиц и его влияния на процессы намагничивания таких сред [2–4]. Изменение концентрации дисперсной фазы и температуры может привести как к изменению сил взаимодействия частиц, так и к образованию из них агрегатов и, как следствие, оказать влияние на кинетику процессов намагничивания коллоидов. В настоящей работе предпринята попытка изучить особенности релаксации магнитного момента коллоидных частиц, обусловленные изменением температуры и их объемного содержания в коллоиде.

### Методика измерений и образцы для исследования

В качестве образца для исследований был использован магнитный коллоид с магнетитовыми частицами и керосином в качестве дисперсионной среды. Исследование комплексной магнитной восприимчивости осуществлялось мостовым методом с помощью установки, подробно описанной в [5], позволяющей проводить измерения действительной и мнимой частей магнитной восприимчивости в широком температурном и частотном интервалах при значении амплитуды напряженности измерительного поля, не превышающем 30 А/м. Измерение намагниченности осуществлялось с помощью вибрационного магнетометра LakeShore Cryotronics VSM 7400 Series. Полученные кривые намагничивания использовались для гранулометрических расчетов [6]. Значение среднего диаметра частиц, полученное магнитогранулометрическим методом, составило 12.3 нм. Кроме этого, размер частиц оценивался с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan, а также методом динамического рассеяния света. На рис. 1 представлена гистограмма распределения частиц по размерам, полученная с помощью электронного микроскопа. Средний диаметр частиц, определенный методом динамического рассеяния света, оказался равным 14 нм. Некоторое несовпадение результатов, полученных различными методами, может быть связано с тем, что электронный микроскоп дает размер всего твердого ядра частицы, магнитогранулометрический метод – размер магнитного ядра частицы, которая может содержать немагнитный поверхно-

\* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект № 16-03-00054) и Министерства образования Российской Федерации.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>