

УДК 538.9

## СТРУКТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ДИСПЕРСИЙ МАГНИТНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ПОЛИСОРБАТА-80

© 2021 г. А. В. Нагорный<sup>a, b, c, \*</sup>, М. В. Авдеев<sup>a, d</sup>, А. И. Иванов<sup>a, e, f</sup>,  
Ю. Ю. Шлапа<sup>g</sup>, С. А. Солопан<sup>g</sup>, Т. В. Нагорная<sup>a, b</sup>, А. В. Шульгина<sup>d, h</sup>,  
Ю. Л. Забулонов<sup>c</sup>, А. Г. Белоус<sup>g</sup>, Л. А. Булавин<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980 Россия

<sup>b</sup>Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко,  
Киев, 01601 Украина

<sup>c</sup>Государственное учреждение “Институт геохимии окружающей среды НАН Украины”,  
Киев, 03142 Украина

<sup>d</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, 119991 Россия

<sup>e</sup>Институт проблем безопасности атомных электростанций НАН Украины,  
Чернобыль, 07270 Украина

<sup>f</sup>Московский физико-технический институт,  
Долгопрудный, 141701 Россия

<sup>g</sup>Институт общей и неорганической химии им. В.И. Вернадского НАН Украины,  
Киев, 03142 Украина

<sup>h</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”,  
Москва, 123182 Россия

\*e-mail: avnagorny@jinr.ru

Поступила в редакцию 24.12.2020 г.

После доработки 25.02.2021 г.

Принята к публикации 28.02.2021 г.

Исследованы структурные особенности агрегации в магнитных жидкостях на основе растворов поверхностно-активного вещества – полисорбат-80 (твин-80). С помощью малоуглового рентгеновского и нейтронного рассеяния, а также динамического светорассеяния получены фракционные распределения наночастиц магнетита и феррита кобальта в жидком носителе, для которых проведен сравнительный анализ. В случае нейтронного рассеяния для анализа вкладов от разных компонент растворов дополнительно применена вариация контраста на основе смесей легкой и тяжелой воды. Как результат, показано, что исследованные системы имеют более сложную структуру, чем классические магнитные жидкости, когда магнитные наночастицы образуют с молекулами поверхностно-активного вещества комплексы “ядро–оболочка”, и представляют собой растворы крупных ассоциатов (размер порядка 100 нм). При этом дисперсии демонстрируют коллоидную устойчивость в течение длительного (год и более) времени.

**Ключевые слова:** малоугловое рентгеновское рассеяние, синхротронное излучение, малоугловое рассеяние нейтронов, динамическое светорассеяние, магнитные жидкости, феррожидкости, магнитные наночастицы, поверхностно-активные вещества.

**DOI:** 10.31857/S1028096021080100

### ВВЕДЕНИЕ

Современный интерес к магнитным коллоидным системам, таким как магнитные жидкости или феррожидкости, обусловлен эффективной комбинацией их магнитных и немагнитных свойств, полезных в различных промышленных и биомедицинских технологиях. Так, совмещение текучести и магнетизма актуально для медико-биологических приложений [1–4]. Магнитные

наночастицы, предназначенные для этих целей, должны обладать как можно более узким распределением по размерам, быть химически стабильными, нетоксичными и одновременно демонстрировать суперпарамагнитные свойства (что необходимо, в частности, для гипертермии в переменном электромагнитном поле). Оксиды типа шпинели  $Fe_3O_4$  и  $CoFe_2O_4$ , которые используются в изучаемых нами магнитных жидкостях, в целом удовлетворяют таким требованиям. Наночастицы

феррита часто рассматриваются в качестве основного физического агента в медицинских приложениях, например, при управляемой доставке лекарств или гипертермии при лечении рака [5, 6]. Для эффективного использования магнитные наночастицы должны иметь регулируемый размер, а также, насколько это возможно, быть устойчивыми к образованию крупных агрегатов [7]. В магнитных жидкостях на водной основе избежать коллоидной агрегации не удастся [8]. Особенно важным вопрос агрегации становится в биорелевантных растворах, которые естественным образом имеют водную основу. Так, ранее агрегационная устойчивость магнитных наночастиц, приготовленных разными способами, исследовалась для водных растворов агарозы методами малоуглового рассеяния рентгеновских лучей и нейтронов [9, 10]. Было показано, что все исследуемые системы представляют собой агрегированные коллоиды, структура которых (тем не менее), стабильна во времени.

Целью данной работы было исследование структуры магнитных жидкостей с наночастицами магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) и феррита кобальта ( $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ), диспергированных в водные растворы неионогенного поверхностно-активного вещества (ПАВ) полисорбат-80 (твин-80,  $\text{C}_{64}\text{H}_{124}\text{O}_{26}$ ), широко применяемого в косметическом производстве. Характеризация наночастиц и их агрегатов проводилась методами малоуглового рентгеновского (МУРР) и нейтронного (МУРН) рассеяния. Метод МУРР чувствителен к сравнительно тяжелым химическим элементам и почти невосприимчив к водородсодержащим (воде и органическим веществам), т.е. малоугловая дифракция происходит преимущественно на магнитном материале, диспергированном в раствор. Использование МУРН дает возможность исследовать также рассеяние на водородсодержащих компонентах [11], в том числе посредством проведения вариации контраста на основе изотопного замещения  $\text{H}_2\text{O}/\text{D}_2\text{O}$  в жидком носителе. Последняя позволяет определить особенности внутренней структуры таких гетерогенных наносистем [12]. Дополнительно проводился анализ динамического светорассеяния (ДСР), который охватывает диапазон размеров до 1 мк, что превышает ограничение в стандартных методах МУРР и МУРН.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наночастицы магнетита и феррита кобальта были синтезированы с помощью реакции осаждения в (неводных) растворах диэтиленгликоля, которые затем диспергировались в водные растворы полисорбат-80. Все стадии синтеза проводили по методике, описанной ранее [13]. Синтез магнитных частиц и последующее приготовление магнитных жидкостей и буферных растворов

(водных растворов ПАВ соответствующей концентрации) проводились в Институте общей и неорганической химии им. В.И. Вернадского НАН Украины (Киев, Украина).

Для экспериментов по малоугловому рассеянию были приготовлены образцы: магнетит/полисорбат-80/вода и феррит кобальта/полисорбат-80/вода с исходной объемной долей магнитного материала соответственно 0.29 и 0.25% и для вариации контраста МУРН – последующим разбавлением  $\text{D}_2\text{O}$  до 0.2 и 0.17% по объему соответственно. В результате для магнитных жидкостей обоих типов были смешаны четыре образца с различным соотношением  $\text{H}_2\text{O}/\text{D}_2\text{O}$  в носителе.

Измерения малоуглового рентгеновского синхротронного рассеяния проводили на экспериментальной станции ДИКСИ [14] синхротронного источника КИСИ-Курчатов (Москва, Россия) с энергией 7.65 кэВ ( $\lambda = 1.62 \text{ \AA}$ ). Все измерения были выполнены в геометрии пропускания при нормальных условиях на идентично подготовленных образцах с использованием двухкоординатного детектора Pilatus3 1M DECTRIS. Обработку данных проводили с помощью программного обеспечения Fit2D [15]. Для получения экспериментальной кривой рассеяния  $I(q)$  в диапазоне модуля вектора рассеяния  $q = 0.04\text{--}1.1 \text{ nm}^{-1}$  детектор располагался за образцом на двух расстояниях: 500 и 2400 мм. Каждый образец помещался в кварцевый капилляр диаметром 1.5 мм и толщиной стенки 10 мкм. Кривые рассеяния для буферного раствора полисорбата-80 в  $\text{H}_2\text{O}$  вычитали из соответствующих кривых для магнитных жидкостей. Для калибровки угловой шкалы использовалась картина малоуглового рассеяния на стандартном образце (бегенате серебра), содержащая серии эквидистантных пиков с максимальным межплоскостным расстоянием  $d_{(001)} = 58.38 \text{ \AA}$ . Данные МУРР были получены и проанализированы в условных единицах.

Эксперименты МУРН проводили на установке малоуглового рассеяния ЮМО, действующей на импульсном реакторе ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна, Россия), во времяпролетном режиме. Для регистрации рассеянных нейтронов использовалась двухдетекторная система кольцевых многопроволочных детекторов [16]; сигнал с детекторов обрабатывался системой сбора данных во времяпролетном режиме DeLiDAQ-1 [17, 18]. Используемый диапазон длин волн нейтронов составлял 0.06–4 нм. Измеренные кривые рассеяния корректировали на фоновое рассеяние от буферных растворов (смеси  $\text{H}_2\text{O}/\text{D}_2\text{O}$ ), а абсолютную калибровку интенсивности рассеяния проводили по специальной методике с использованием ванадиевого стандарта [16]. Образцы магнитных жидкостей и буферные растворы помещались в

плоские кварцевые кюветы с оптическим путем 1 мм (производства Hellma).

Измерения распределения по гидродинамическому размеру для образцов магнитной жидкости, разбавленных водой в 10 раз, были выполнены на приборе DLS Photocor Compact-Z. В качестве источника света использовался лазер с длиной волны 654 нм. Рассеянный свет детектировался под углом 90°. Автокорреляционная функция интенсивности рассеянного света анализировалась с помощью программы DynaLS. Усредненный по интенсивности (Z-усреднение) гидродинамический радиус рассчитывался из измеренных коэффициентов диффузии согласно уравнению Стокса–Эйнштейна.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Измеренные кривые МУРП представлены на рис. 1. Их форма типична для случая рассеяния на высоко полидисперсных системах. Из-за характерных различий в значениях плотности длины рассеяния (ПДР)  $\rho_{\text{SLD}}$  для компонент магнитных жидкостей в случае рентгеновских лучей (для  $\text{Fe}_3\text{O}_4$   $\rho_{\text{SLD}} = 37.56 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ,  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$   $\rho_{\text{SLD}} = 38.84 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$  и для  $\text{H}_2\text{O}$   $\rho_{\text{SLD}} = 9.47 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ,  $\text{C}_{64}\text{H}_{124}\text{O}_{26}$   $\rho_{\text{SLD}} = 9.87 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) преобладающий вклад в кривые вносит рассеяние на кристаллических наночастицах (магнитные “ядра” комплексов).

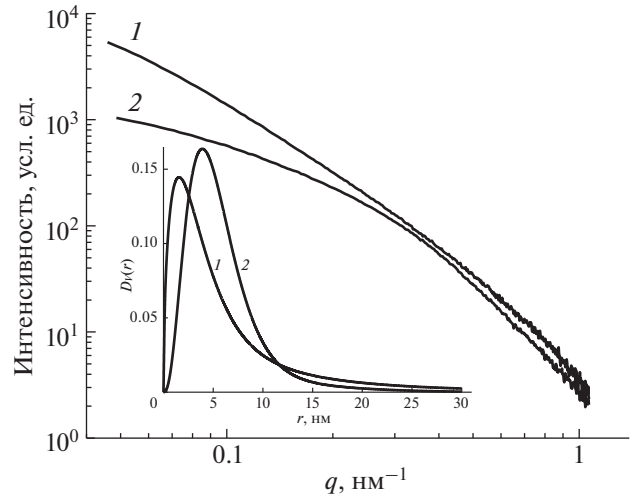
Анализ экспериментальных кривых рассеяния в программном пакете ATSAS с использованием программы MIXTURE дает функции распределения по размерам (по объему)  $D_i(r)$  в сферическом приближении [19]. Алгоритм программы основан на прямом моделировании кривой малоуглового рассеяния как суперпозиции рассеяния от нескольких фракций частиц, каждая из которых рассматривается в сферическом приближении, с учетом известной полной объемной доли магнитного материала в растворе. Данный алгоритм позволяет уточнить параметры ожидаемого распределения для различных фракций, вид которого задается пользователем. В результате определяются средний размер  $R_0$ , полуширина  $S$  функции распределения и относительная доля фракций  $f_i$  в общей интенсивности:

$$I(q) = \sum_{i=1}^K f_i I_{0i}(q), \quad (1)$$

где  $K$  – количество фракций в растворе, а интенсивность  $i$ -й компоненты равна:

$$I_{0i}(q) = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} V_i(r) [\Delta\rho_i(r)]^2 F_{0i}^2(q, r) D_{Vi}(r) dr. \quad (2)$$

Здесь  $r$  – радиус сферы;  $R_{\min}$ ,  $R_{\max}$  – минимальный и максимальный размеры в функции  $D_{Vi}(r)$ ;  $F_{0i}(q, r) =$



**Рис. 1.** Экспериментальные кривые МУРП для магнитных жидкостей: магнетит/полисорбат-80/вода (1) и феррит кобальта/полисорбат-80/вода (2), на основе легкой воды. На вставке: экспериментально полученная суперпозиция парциальных функций распределения по размерам  $D_V(r) = \sum_i D_{Vi}(r)$ .

$= [\sin(qr) - (qr) \cos(qr)] / (qr)^3$  и  $V_i(r) = (4/3)\pi r^3$  – соответственно, форм-фактор сферы и ее объем. Значение  $\Delta\rho_i(r)$  равнялось 1.

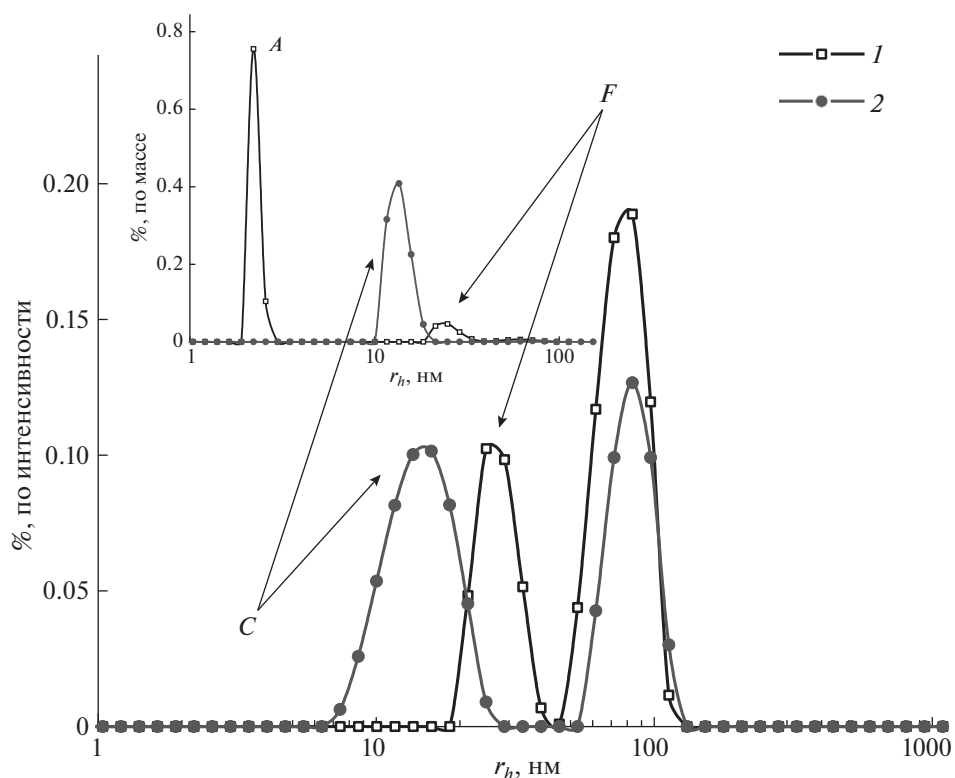
Каждая функция  $D_{Vi}(r)$  выбиралась в виде нормированного распределения Шульца–Зимма [20]:

$$D_{Vi}(r) = \left( \frac{z+1}{R_{0i}} \right)^{z+1} \frac{r^z}{\Gamma(z+1)} \exp \left[ -(z+1) \frac{r}{R_{0i}} \right], \quad (3)$$

где  $z = (R_{0i}/S_i)^2 - 1$  и  $\Gamma(x)$  – гамма функция.

Расчеты экспериментальных данных проводились путем аппроксимации уравнением (1), минимизируя общий остаток аппроксимации, для двух фракций, соответствующим отдельным частицам и агрегатам. Найденные таким образом параметры распределений приведены в табл. 1. Отметим, что средний размер по всем фракциям в случае образца с наночастицами феррита кобальта существенно меньше. Он составляет менее 100 нм, что проявляется в наблюдаемом на кривых рассеяния выходе на режим Гинье при малых  $q$ . В случае системы с магнетитом агрегационные эффекты на большем уровне не позволяют наблюдать данный режим.

Результаты анализа ДСР по определению функции распределения гидродинамического размера частиц в исследуемых магнитных жидкостях представлены на рис. 2. Для обоих видов систем наблюдаются два уширенных пика, что характерно для полидисперсных систем, а средние размеры наночастиц согласуются с аналогичными значениями для порошков магнетита и феррита кобальта (общего происхождения с настоящи-



**Рис. 2.** Распределения гидродинамического радиуса, полученные из измерений динамического рассеяния света, для магнитных жидкостей: магнетит/полисорбат-80/вода (1) и феррит кобальта/полисорбат-80/вода (2). Вставка демонстрирует наличие разных включений: видна фракция малых частиц только для образца (1) – пик *A* в массовом представлении распределения, тогда как следующие видимые фракции дублируют друг друга для образцов (1), (2) – пики *C* и *F*.

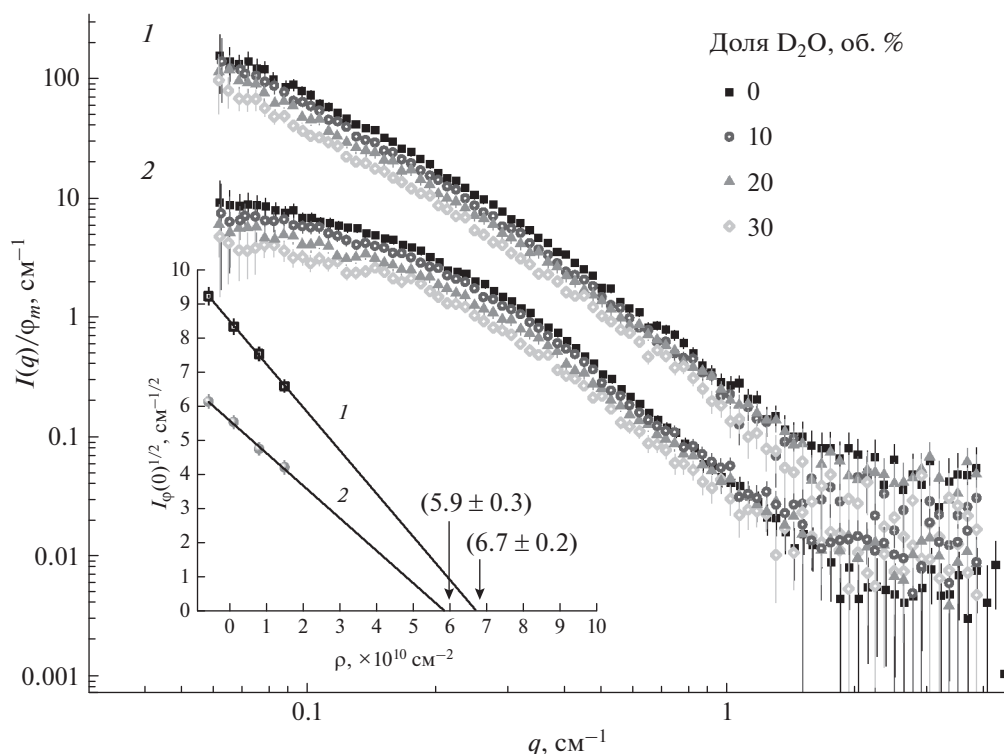
ми наночастицами), исследованными ранее [21]. Параметры данных пиков также приведены в табл. 1. Можно заметить, что в образцах присутствуют коллоидные включения сравнительно большого размера (порядка 100 нм), которые могут быть образованы как магнитными частицами с разной степенью покрытия ПАВ, так и кластерами мицелл, сформированными из избытка молекул полисорбата-80 в растворе при стабилизации.

Стоит отметить, что массово-взвешенные распределения из ДСР могут характеризовать фракции коллоидов несколько иначе, чем в представлении по концентрации. Так, при перенормировке обнаруживается новый сигнал, который ранее подавлялся из-за большой разницы в концентрациях [22]. Таким образом, для жидкостной системы на основе частиц магнетита массово-взвешенное распределение демонстрирует наличие

**Таблица 1.** Структурные параметры частиц, полученные из анализа данных малоуглового рентгеновского рассеяния, и данные динамического светорассеяния: гидродинамический радиус ( $r_h$ ), абсолютное стандартное отклонение ( $STD$ ). Ошибка содержится в последнем разряде

Фракция, $i$	Магнитная жидкость с наночастицами									
	Магнетит					Феррит кобальта				
	МУРР			ДСР		МУРР			ДСР	
	$f_i$ , %	$R_{0i}$ , нм	$S$ , нм	$r_h$ , нм	$STD$ , нм	$f_i$ , %	$R_{0i}$ , нм	$S$ , нм	$r_h$ , нм	$STD$ , нм
1	52.3	2.9	1.37	2.4*	0.4*	94.3	4.7	2.7	–	–
2	17.9	7.5	2.7	27.0	5.0	5.7	19	10.2	17.1	3.8
3	29.9	19.60	13.9	90.3	16.2	–	–	–	90.2	18.3

\* Определено из массово-взвешенного распределения гидродинамических размеров.



**Рис. 3.** Нормированные на объемную долю магнитной компоненты экспериментальные кривые МУРН для магнитных жидкостей: магнетит/полисорбат-80/вода (1) и феррит кобальта/полисорбат-80/вода (2), с различными объемными долями тяжелой воды в носителе. Для удобного визуального восприятия экспериментальные зависимости (2) масштабированы (коэффициент 0.2). На вставке представлены линейные аппроксимации нормированной интенсивности  $I_{\phi}(0)^{1/2}$  в зависимости от плотности длины когерентного рассеяния жидкого носителя  $\rho_{\text{SLD}}$  и соответствующие значения ПДР эффективных точек компенсации для магнетита и феррита кобальта (обозначены стрелками).

сравнительно небольших частиц (пик А на вставке к рис. 2). В то же время аналогичное распределение для образца, содержащего частицы феррита кобальта, не содержит пик в этой области (ниже 10 нм). Результат качественно согласуется со структурными данными, полученными из МУРР. Видно, что система с наночастицами магнетита обладает большей полидисперсностью по сравнению с системой на основе феррита кобальта.

Для прояснения вопроса о внутренней структуре фракций феррожидкостей использовали метод МУРН с вариацией нейтронного контраста. Измерения МУРН проводили для тех же образцов (через полгода после измерений МУРР). Соответствующие кривые рассеяния МУРН показаны на рис. 3. Характер кривых повторяется при сравнении с кривыми МУРР, представленными на рис. 2. Вариация нейтронного контраста охватывала диапазон концентраций  $\text{D}_2\text{O}$  в растворе от 0 до 30 об. %. Выбранный интервал обусловлен сравнительно малой концентрацией магнитного материала в исходных системах. Более широкая вариация контраста требует больших растворов, что приводит к уменьшению интенсивности рассеяния (в том числе и в области  $q$ ), где ожида-

ется проявления вклада от оболочек вокруг магнитных частиц. Точка компенсации (объемная доля дейтерированного компонента в растворителе, при которой интенсивность рассеяния вперед  $I(0)$  минимальна) для полисорбата-80 (нейтронная ПДР  $\rho_{\text{SLD}} = 0.55 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) близка к 16 об. % по  $\text{D}_2\text{O}$ . Таким образом, вариация контраста проводилась в окрестности минимума в отношении данного ПАВ. Целью ставилось зафиксировать возможные отклонения от рассеяния, определяемого магнитным материалом, при отходе от вышеупомянутой точки компенсации в области положительных и отрицательных контрастов в отношении полисорбата-80. Исходя из вида кривых, можно сделать вывод, что имеет место достаточно равномерное распределение кристаллических “ядер” магнитных частиц внутри агрегатов; форма кривых рассеяния при вариации контраста сохраняется, а изменяется только масштабный коэффициент, связанной с общим контрастом. Для определения эффективной точки компенсации растворов была проанализирована интенсивность рассеяния в диапазоне  $q = 0.06\text{--}0.1 \text{ нм}^{-1} I_{\phi}(0)$ . Зависимость параметра  $I_{\phi}(0)^{0.5}$  от среднего значения ПДР  $\rho_{\text{SLD}}$  для смеси  $\text{H}_2\text{O}/\text{D}_2\text{O}$

показана на вставке к рис. 3. Соответствующие ПДР, полученные в результате линейной аппроксимации, составляют  $\rho_{\text{SLD}} = 6.7 \pm 0.2 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$  и  $\rho_{\text{SLD}} = 5.9 \pm 0.3 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , что в пределах ошибки совпадает с теоретическими ПДР для магнетита и феррита кобальта ( $\rho_{\text{SLD}} = 6.9 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$  и  $\rho_{\text{SLD}} = 5.95 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$  соответственно).

Таким образом, эффект рассеяния на водородсодержащей компоненте для исследованного интервала  $q$  не наблюдается. Из этого следует, что, во-первых, полисорбат-80 находится в растворе в виде больших ассоциатов (размер порядка 100 нм и более). Этот вывод согласуется с данными ДСР. Во-вторых, магнитные наночастицы не образуют комплексов с данным ПАВ. Магнитные частицы не взаимодействуют и с ассоциатами ПАВ. Ситуация сходна с той, что недавно наблюдалась (с помощью вариации контраста МУРН) в водных магнитных жидкостях, где могут образовываться крупные ассоциаты ПАВ [23]. Наконец, агрегаты магнитных частиц имеют развитую структуру, обеспечивающую практически полный доступ растворителя к поверхности агрегированных частиц.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обсуждаемые магнитные жидкости представляют собой стабильные коллоидные водные дисперсии высоко полидисперсных наночастиц магнетита и феррита кобальта. Согласно данным МУРН, МУРН и ДСР, их распределение по размерам можно описать суперпозицией нескольких разномасштабных фракций, основная из которых соответствует условно малым частицам размером около 10 нм и менее. Полисорбат-80 не образует с магнитными наночастицами комплексов и предположительно находится в растворе в виде крупных ассоциатов (размер порядка 100 нм). В то же время, несмотря на агрегацию магнитных наночастиц и сложную структурную организацию растворов в целом, магнитные жидкости остаются стабильными в отношении их структуры.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hafeli U., Zborowski M.* // J. Magn. Mater. 2009. V. 321. P. 1335.
2. *J. van der Zee, Vujaskovic Z., Kondo M., Sugahara T.* // Int. J. Hyperth. 2008. V. 24. № 2. P. 111. <https://doi.org/10.1080/02656730801895058>
3. *Vekas L., Bica D., Avdeev M.V.* // China Particuology. 2007. V. 5. № 1–2. P. 43. <https://doi.org/10.1016/j.cpart.2007.01.015>
4. *Авдеев М.В., Аксенов В.Л.* // УФН. 2010. Т. 180. С. 1009. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0180.201010a.1009>
5. *Kashevsky B.E., Agabekov V.E., Kashevsky S.B. et al.* // Particuology. 2008. V. 6. № 5. P. 322.
6. *Belous A.G., Solovyova E.D., Solopan S.O. et al.* // Solid State Phenomena. 2015. V. 230. P. 95. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.230.95>
7. *Guibert C., Dupuis V., Peyre V., Fresnais J.* // J. Phys. Chem. C. 2015. V. 119. № 3. 50. P. 28148. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b07796>
8. *Nagorny A.V., Socoliuc V., Petrenko V.I. et al.* // J. Mag. Mag. Mater. 2020. V. 501. P. 166445. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166445>
9. *Nagorny A.V., Petrenko V.I., Avdeev M.V. et al.* // J. Mag. Mag. Mater. 2017. V. 431. P. 16. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.018>
10. *Nagorny A.V., Petrenko V.I., Avdeev M.V. et al.* // Romanian Journal of Physics. 2016. V. 61. № 3. P. 483. [http://www.nipne.ro/rjp/2016\\_61\\_3-4/RomJPhys.61.p483.pdf](http://www.nipne.ro/rjp/2016_61_3-4/RomJPhys.61.p483.pdf)
11. *Aksenov V., Avdeev M., Balasoiu M. et al.* // Appl. Phys. A. 2002. V. 74. P. 943. <https://doi.org/10.1007/s003390201674>
12. *Balasoiu M., Avdeev M.V., Aksenov V.L. et al.* // J. Mag. Mag. Mater. 2006. V. 300. № 1. P. e225. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.230.95>
13. *Yelenich O.V., Solopan S.O., Trachevskii V.V., Belous A.G.* // Rus. J. Inorg. Chem. 2013. V. 58. P. 901. <https://doi.org/10.1134/S0036023613080068>
14. *Korneev V.N., Shlektarev V.A., Zabelin A.V. et al.* // J. Surface Investigation. 2012. V. 6. № 5. P. 849. <https://doi.org/10.1134/S1027451012100084>
15. *Hammersley A.P.* FIT2D V9.129. Reference Manual // ESRF Internal Report: ESRF98HA01T. V 3.1. 1998.
16. *Kuklin A.I., Soloviov D.V., Rogachev A.V. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2011. V. 291. № 1. P. 012013.
17. *Litvinenko E.I., Bogdzal A.A., Bodnarchuk V.I. et al.* // CEUR Workshop Proceedings. 2019. V. 2507. P. 165. <http://ceur-ws.org/Vol-2507/165-169-paper-28.pdf>
18. *Литвиненко Е.И., Богдзель А.А., Боднарчук В.И. и др.* // Приборы и Техника Эксперимента. 2020. № 3. С. 56. <https://doi.org/10.31857/S0032816220040072>
19. *Franke D., Petoukhov M.V., Konarev P.V. et al.* // J. Appl. Cryst. 2017. V. 50. P. 1212. <https://doi.org/10.1107/S1600576717007786>
20. *Kotlarchyk M., Stephens R.B., Huang J.S.* // J. Phys. Chem. 1988. V. 92. № 6. P. 1533. <https://doi.org/10.1021/j100317a032>
21. *Нагорный А.В., Авдеев М.В., Еленич А.В. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2018. № 8. С. 3. <https://doi.org/10.1134/S0207352818080140>
22. *Zheng T., Bott S., Huo Q.* // Appl. Mater. Interfaces. 2016. V. 8. № 33. P. 21585. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b06903>
23. *Nagorny A.V., Shlapa Y.Y., Avdeev M.V. et al.* // J. Mol. Liq. 2020. V. 312. P. 113430. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113430>

## Structural Stability of Dispersions of Magnetic Nanoparticles in Aqueous Solutions of Polysorbate-80

A. V. Nagornyi<sup>1, 2, 3, \*</sup>, M. V. Avdeev<sup>1, 4</sup>, O. I. Ivankov<sup>1, 5, 6</sup>, Y. Y. Shlapa<sup>7</sup>, S. O. Solopan<sup>7</sup>, T. V. Nagorna<sup>1, 2</sup>,  
A. V. Shulenina<sup>4, 8</sup>, Yu. L. Zabulonov<sup>3</sup>, A. G. Belous<sup>7</sup>, L. A. Bulavin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

<sup>2</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 01601 Ukraine

<sup>3</sup>State Institution "Institute of Environmental Geochemistry of the Ukrainian NAS", Kyiv, 03142 Ukraine

<sup>4</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

<sup>5</sup>Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the Ukrainian NAS, Chernobyl, 07270 Ukraine

<sup>6</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141701 Russia

<sup>7</sup>Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry of the Ukrainian NAS, Kyiv, 03142 Ukraine

<sup>8</sup>National Research Center "Kurchatovskiy Institute, Moscow, 123182 Russia

\*e-mail: avnagorny@jinr.ru

The structural features of aggregation in magnetic fluids based on solutions of the surfactant polysorbate-80 (tween-80) were investigated. Using small-angle X-ray and neutron scattering and dynamic light scattering, the fractional distributions of magnetite and cobalt ferrite nanoparticles in a liquid carrier were obtained, for which a comparative analysis was carried out. In the case of neutron scattering, to analyze the contributions from different components of the solutions, a contrast variation based on mixtures of light and heavy water was additionally applied. As a result, it was shown that the studied systems have a more complex structure than classical magnetic fluids, when magnetic nanoparticles form "core-shell" complexes with surfactant molecules, and represent solutions of large associates (size of about 100 nm). Nevertheless, the dispersions show colloidal stability for a long (at least one year) time.

**Keywords:** small-angle X-ray scattering, synchrotron radiation, small-angle neutron scattering, dynamic light scattering, magnetic fluids, ferrofluids, magnetic nanoparticles, surfactants.