

А. В. Нагорний<sup>1,2</sup>, Л. А. Булавін<sup>1,3</sup>, В. І. Петренко<sup>1,2</sup>, О. І. Іваньков<sup>1,2</sup>,  
О. В. Томчук<sup>1,2</sup>, М. В. Авдєєв<sup>2</sup>, Л. Векаш<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

<sup>2</sup> Об'єднаний інститут ядерних досліджень, Дубна, Росія

<sup>3</sup> Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ

<sup>4</sup> Центр фундаментальних і передових технічних досліджень, Румунська АН, Тімішоара, Румунія

## ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРНОГО ФАКТОРА МІЖЧАСТИНКОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ У ФЕРОФЛЮЇДІ ЗА ДАНИМИ МАЛОКУТОВОГО РОЗСІЯННЯ НЕЙТРОНІВ

Представлено результати дослідження структури та міжчастинкової взаємодії полярної магнітної рідинної системи з різним вмістом магнетиту, отримані методом малокутового розсіяння нейтронів (МКРН). Експеримент проводився на спектрометрі малокутового розсіяння ЮМО реактора ІБР-2 в Об'єднаному інституті ядерних досліджень (Дубна, Росія). В якості магнітної рідинної системи було використано ферофлюїд магнетит/олеїнова та додецил-бензолсульфонова кислоти/ізобутанол. Було показано, що експериментальні МКРН криві добре описуються лише форм-фактором полідисперсних сферичних частинок для концентрацій магнетиту  $\sim 0,5$  об. % у системі. Для більших концентрацій магнітного матеріалу в об'ємі ферофлюїдів було знайдено значний вплив структурного фактора на МКРН дані. Наведено експериментально отримані залежності ефективного структурного фактора та проведено порівняння з теоретичною залежністю, розрахованою для потенціалу твердих сфер у полідисперсному наближенні.

*Ключові слова:* магнітні рідинні системи, ферофлюїди, малокутове розсіяння нейтронів, структурний фактор, міжчастинкова взаємодія.

### Вступ

Магнітними рідинними системами (МРС) або ферофлюїдами називають суспензії магнітних наночастинок, колоїдна стабільність яких досягається шляхом покриття поверхні окремих частинок молекулами поверхнево-активних речовин (ПАР) або іонами. Завдяки стеричній (а інколи й зарядовій) стабілізації ферофлюїди проявляють відмінну стійкість до агрегації за різних зовнішніх умов, що дає можливість їхнього практичного застосування в багатьох технічних та біомедичних цілях [1 - 3]. Особливий інтерес для науковців в останні роки викликають магнітні рідинні системи, виготовлені на основі полярних та, зокрема, водних рідинних основах, через можливість їхнього застосування в медицині [4, 5], що потребує теоретичного опису їхніх властивостей. Одним з основних напрямків дослідження ферофлюїдів є вивчення впливу різних фізичних чинників на їхню стабільність. Магнітні наночастинки мають розміри порядку кількох нанометрів, що відповідає однодомному стану намагніченості. Урахування анізотропної диполь-дипольної взаємодії магнітних моментів наночастинок значно ускладнює вивчення властивостей реальних МРС.

Метою даної роботи було експериментальне визначення ефективного структурного фактора

міжчастинкової взаємодії для полідисперсних магнітних частинок ферофлюїду.

У роботі на основі аналізу даних малокутового розсіяння нейтронів (МКРН) проводиться експериментальна оцінка ефектів взаємодії в полярних магнітних рідинних системах та порівнюється отриманий структурний фактор із розрахованим для потенціалу твердих сфер. МКРН є одним із найбільш прямих методів при дослідженні багатокомпонентних систем у нанометровому діапазоні розмірів, особливо таких систем, що мають легкі атоми у своєму складі.

### Експеримент

У якості магнітної рідинної системи було обрано ферофлюїд з початковим вмістом магнетиту  $\varphi_m = 17\%$  (за об'ємом) на основі ізобутанолу. Стабілізація магнітних частинок у полярних МРС забезпечується шляхом покриття наночастинок додатковим (у порівнянні з неполярними ферофлюїдами) шаром молекул ПАР, що вимагає внесення певної кількості надлишку ПАР до рідини [6 - 8]. Формування другого шару молекул ПАР було забезпечене молекулами додецил-бензолсульфонової кислоти ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3\text{H}$ ), вміст якої був приблизно 1:1 у пропорції до основного стабілізатора – олеїнової кислоти [9].

Аби зменшити до мінімуму внесок розсіяння від молекул кислот, було використано протонований ізобутанол (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O), довжина когерентного розсіяння якого (усереднене за хімічним та ізотопічним складом значення довжини когерентного розсіяння нейтронів одиниці об'єму речовини,  $\rho = -0,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) дуже близька до значень цієї характеристики для використовуваних ПАР: олеїнової ( $\rho = 0,08 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) та додецил-бензолсульфонової ( $\rho = 0,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) кислот. Таким чином, нейтронний контраст магнетитових частинок у МРС, для яких  $\rho = 6,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , був максимальним. Приготування зразків для експерименту відбувалося за допомогою розведення початкової висококонцентрованої МРС (17 об. %) чистим розчинником (ізобутанолом) у відповідних об'ємних пропорціях. У результаті приготування були одержані зразки, концентрація магнітного матеріалу в рідинній системі варіювався в діапазоні  $\varphi_m = (0,08 \div 6,4) \%$  (за об'ємом).

Експерименти з МКРН на МРС були здійснені на спектрометрі ЮМО [10 - 12] імпульсного реактора ІБР-2 в лабораторії нейтронної фізики ОІЯД (Дубна, Росія). Вимірювання проводилися при кімнатній температурі з калібруванням на ванадієвий стандарт.

З експериментів МКРН, що здійснювалися за методом часу прольоту, було одержано залежності диференційного перерізу розсіяння одиниці об'єму зразка (інтенсивність розсіяння,  $(d\sigma/d\Omega)/V = I(q)$ ) від модуля вектора розсіяння  $q = (4\pi/\lambda)\sin(\theta/2)$ , де  $\lambda$  - довжина нейтронної хвилі і  $\theta$  - кут розсіяння. Доступний в експерименті інтервал модулів переданих хвильових векторів  $q$  варіювався в межах  $0,08 \div 5 \text{ нм}^{-1}$ .

Загальний вираз для інтенсивності розсіяння нейтронів на частинках в ізотропному середовищі можна записати як [13, 14]

$$I(q) = \Delta\rho^2 V \varphi F^2(q, r) S(q), \quad (1)$$

де  $\Delta\rho$  - контраст (різниця між густиною довжини когерентного розсіяння нейтронів для частинок зразка та оточуючого середовища);  $V$  - середній об'єм однієї частинки;  $\varphi$  - об'ємна концентрація розсіюючих частинок;  $F(q, r)$  - форм-фактор, що залежить від розміру та форми частинки;  $S(q)$  - власне структурний фактор, що враховує кореляції між диспергованими в рідину частинками. Обидва фактори  $F^2(q)$  та  $S(q)$  визначаються через Фур'є-перетворення розподілу густини довжини когерентного розсіяння нейтронів усередині частинки (яка лінійно залежить від розподілу масової густини) та парної функції

розподілу частинок у просторі відповідно.

Особливістю розсіяння нейтронів на магнітних частинках є те, що у розсіянні присутній як ядерний, так і магнітний вклад, які відповідають взаємодії нейтронів з ядрами атомів речовини та магнітними моментами цих атомів. Для даного типу ферофлюїду, особливо у випадку протонованої рідини, магнітне розсіяння на магнетиті можна вважати нехтовно малим, і його вплив на спектри МКРН є практично не помітним [15, 16].

Дослідження властивостей наночастинок вимагає певних умов приготування зразків для експерименту, завдяки яким вдається значно компенсувати прояв структурного фактора. Так, якщо розвести МРС з типовим розмірами частинок, близько  $3 \div 5 \text{ нм}$  у радіусі, до невеликої концентрації магнітного матеріалу (на практиці це  $\varphi_m \sim 1 \%$  за об'ємом), то середня відстань між частинками буде достатньо великою для значного послаблення кореляцій між ними. У такому разі можна вважати, що  $S(q) \approx 1$ . І таким чином інтерпретація отриманих експериментальних залежностей МКРН для ферофлюїдів здійснюється відповідно до моделі полідисперсних сферичних частинок, оскільки в нашому випадку нейтронний контраст між оболонкою ПАР і рідинною основою є нехтовно малим [9]:

$$I(q) = I(0) \frac{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} Dn(r)V(r)^2 F^2(qr) dr}{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} Dn(r)V(r)^2 dr} + I_{bkg}, \quad (2)$$

де перший доданок відповідає розсіянню на магнітних частинках ферофлюїду, а  $I(0) = n\Delta\rho^2 \langle V \rangle^2$  - інтенсивність розсіяння в нульовий кут;  $n$  - концентрація частинок в МРС; нейтронний контраст;  $\Delta\rho$  - це різниця між густиною довжини розсіяння магнітного ядра та оболонки ПАР;  $V(r) = (4/3)\pi r^3$  - об'єм сфери радіуса  $r$ ;  $F(qr) = 3(\sin(qr) - qr \cdot \cos(qr)) / (qr)^3$  - форм-фактор сфери радіуса  $r$ ;  $Dn(r) = \exp(-\ln(r/R_0)^2 / 2S^2) / Sr\sqrt{2\pi}$  - функція логнормального розподілу за розмірами з характерним радіусом  $R_0$  і стандартним відхиленням  $S$ ;  $R_{\min}$  и  $R_{\max}$  - мінімальний і максимальний розміри магнетитових частинок в рідині;  $I_{bkg}$  - залишковий некогерентний фон. У першому наближенні магнітним розсіянням у формулі (2) знехтували.

Формула (2) справедлива для рідинних систем, у яких відсутня взаємодія між колоїдними частинками. Зі зростанням кількості частинок в одиниці

об'єму рідинної системи міжчастинкові кореляції починають більше проявлятися в законі розсіяння  $S(q) \neq 1$ . Задача отримання структурного фактора із загального закону розсіяння  $I(q)$  ускладнюється значною полідисперсністю магнітних частинок. У такому випадку для якісної оцінки типу міжчастинкової взаємодії можна використати ефективний структурний фактор [17]

$$S_{eff}(q) = \frac{I(q) / \varphi}{I_0(q) / \varphi_0}, \quad (3)$$

де  $\varphi$  - об'ємна концентрація магнітного матеріалу в рідинній системі, а індекс «0» відображає випадок системи невазємодіючих частинок, тобто коли  $\varphi_0 \rightarrow 0$ . Для монодисперсної МРС на основі протонowanego розчинника ефективна характеристика (3) перейде у звичайний структурний фактор.

## Результати та їхнє обговорення

Експериментальні криві МКРН для вказаної вище МРС з різним вмістом магнітного матеріалу наведено на рис. 1. Апроксимація експериментальних даних (на рисунку) здійснювалась відповідно до виразу (2). У такому випадку визначалися параметри розподілу за розмірами  $R_0$  і  $S$ , а також параметри  $I(0)$  та  $I_{bkg}$ , що входять до моделі. Усереднення за розмірами у формулі (2) проводилося в масштабах розмірів 1 - 12 нм, які є типовими значеннями розмірів частинок магнетиту, що утворюється в результаті реакції конденсації. Одержані значення параметрів наведено в таблиці. Одержані в роботі результати добре узгоджуються з результатами для представлених раніше МКРН даних для схожої магнітної рідинної системи [9].

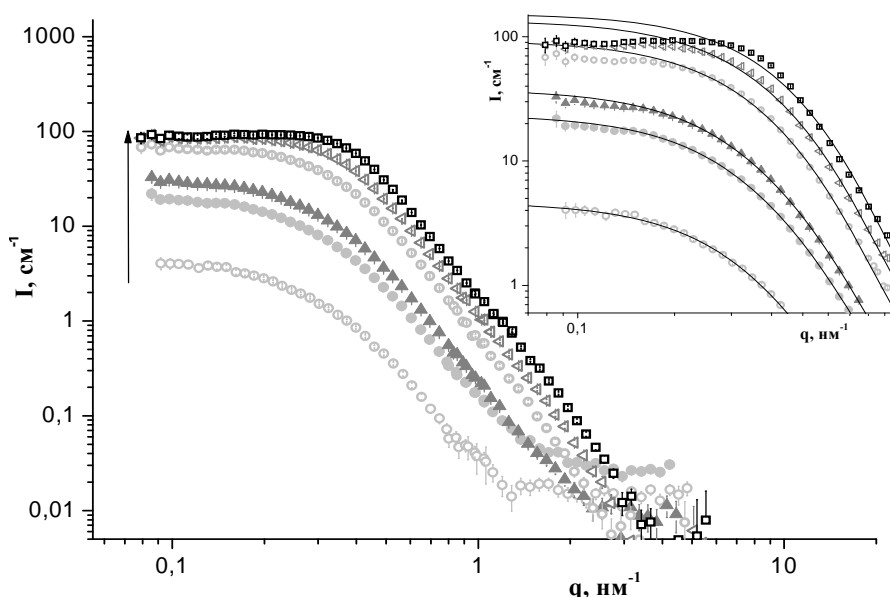


Рис. 1. Спектри МКРН на ферофлюїді магнетит-олеїнова та додецил-бензолсульфонова кислоти-ізобутанол. Криві відповідають зразкам із різним вмістом магнітного матеріалу:  $\varphi_m$  - 0,08, 0,35, 0,9, 2,6, 4,7 та 6,4 об. % у порядку зростання, указаному стрілкою. На вкладці у збільшеному масштабі зображено апроксимацію кривих формулою (2).

### Параметри апроксимування даних МКРН на ферофлюїді

| $\varphi_m$ , об. % | $I(0)$ , $\text{cm}^{-1}$ | $R_0$ , нм      | $S$               | $I_{bkg}$ , $\text{cm}^{-1}$ |
|---------------------|---------------------------|-----------------|-------------------|------------------------------|
| 0,08                | $4,6 \pm 0,1$             | $3,3 \pm 0,1$   | $0,38 \pm 0,01$   | $0,014 \pm 0,001$            |
| 0,35                | $23,5 \pm 0,2$            | $3,25 \pm 0,04$ | $0,390 \pm 0,004$ | $0,027 \pm 0,001$            |
| 0,9                 | $37,6 \pm 0,3$            | $3,11 \pm 0,03$ | $0,392 \pm 0,003$ | $0,009 \pm 0,001$            |
| 2,6                 | $93,1 \pm 0,2$            | $3,44 \pm 0,01$ | $0,339 \pm 0,001$ | $0,007 \pm 0,001$            |
| 4,7                 | $135,2 \pm 0,7$           | $3,36 \pm 0,01$ | $0,331 \pm 0,002$ | $0,003 \pm 0,001$            |
| 6,4                 | $153,3 \pm 0,6$           | $3,34 \pm 0,01$ | $0,307 \pm 0,001$ | $0,004 \pm 0,0008$           |

Слід відзначити, що на відміну від водних МРС [18] отримані експериментальні дані вказують на гарну агрегаційну стабільність ферофлюїдів – у системі відсутні агрегати магнітних

частинок і присутні лише полідисперсні мономери магнетиту, що утворюються в результаті синтезу наночастинок МРС. На вкладці до рис. 1 показано початкову ділянку спектрів МКРН разом з

апроксимованими кривими, що відображають вплив структурного фактора на експериментальні криві при збільшенні концентрації магнітного матеріалу в системі. На вкладці до рис. 1 видно, що для малих концентрацій магнетиту ( $\varphi_m < 0,9$  об. %) експериментальні криві гарно описуються формулою (2) (модель, де відсутній вплив структурного фактора), а при збільшенні концентрації можна бачити відмінність експериментальних МКРН даних від моделі в області малих векторів розсіяння  $q$ . Фактично це і є прояв структурного фактора міжчастинкової взаємодії.

Відмінність в експериментальних залежностях та теоретичних кривих стає більш помітною при зростанні концентрації магнітних частинок у рідинній системі. Слід зауважити, що якість підгонки спектрів МКРН для зразків із вмістом магнетиту  $\varphi_m = 0,08$  % та  $\varphi_m = 0,35$  % є хорошою, що дає змогу вважати магнітні частинки в них майже незв'язаними та обрати ці залежності за базові -  $I_0(q)$  у формулі (3). Однак, враховуючи, що перша крива має гіршу статистику, перевагу було надано експериментальній кривій

МКРН для зразка з  $\varphi_m = 0,35$  %.

На рис. 2 представлено залежність ефективного структурного фактора для зразків ферофлюїду з різним вмістом магнетиту в рідині. З графіків видно, що кореляції між магнітними частинками стають помітними, коли концентрація магнітного матеріалу перевищує значення  $\sim 1$  об. %. Загальна поведінка одержаних залежностей свідчить про те, що взаємодія між частинками наближена до поведінки системи твердих сфер (лише відштовхування в системі). Така схожість говорить про наявність лише стеричного відштовхування між магнітними частинками. Притягання майже повністю відсутнє завдяки подвійному шару молекул ПАР. Максимум першого піка (див. рис. 2) відповідає значенню  $q = 0,45 \text{ nm}^{-1}$ , яке відповідає характерній відстані  $\sim 14 \text{ nm}$  між центрами частинок у ферофлюїді, що добре узгоджується зі значенням мінімально можливої відстані між частинками даної МРС: середній діаметр магнітних наночастинок  $\sim 7 \text{ nm}$ , подвоєна ефективна товщина стабілізаційної оболонки  $\sim 5 \text{ nm}$ , а також розміри молекул олеїнової та додецилбензинсульфонової кислот [9, 19].

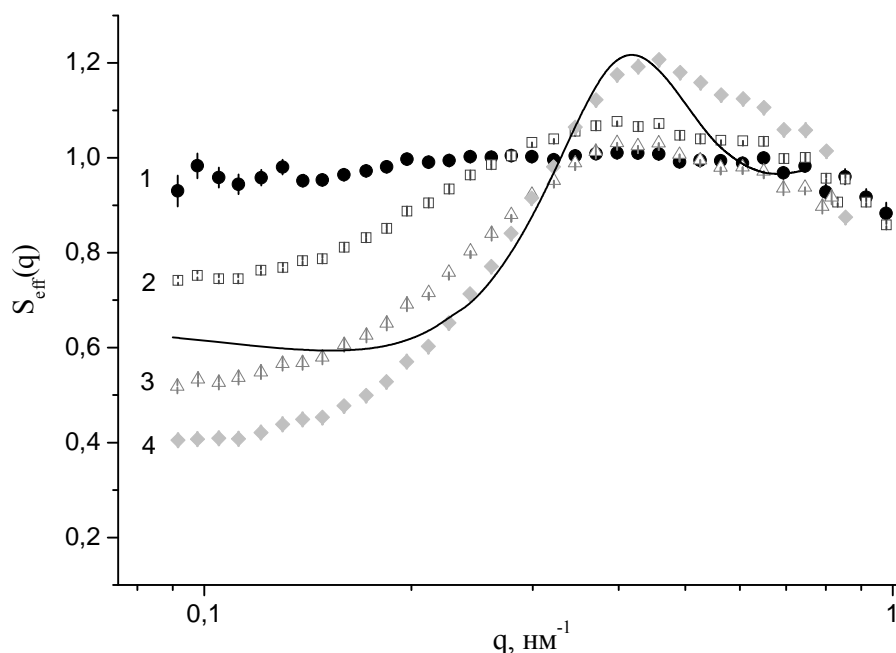


Рис. 2. Ефективний структурний фактор згідно з формулою (3) для різних концентрацій магнетиту в рідинній системі:  $\varphi_m = 0,9, 2,6, 4,7$  та  $6,4$  об. % у порядку зростання нумерації кривих. Суцільна лінія відповідає ефективному структурному фактору, одержаному з моделі для полідисперсних твердих сфер у формалізмі Врія - Френкеля.

Далі було зроблено спробу описати одержаний структурний фактор за допомогою теоретичної моделі. Так, було розраховано криву МКРН для системи полідисперсних частинок із потенціалом взаємодії для твердих сфер у формалізмі Врія - Френкеля [20]. На рис. 2 суцільною лінією показано розрахований ефективний структурний фактор для МРС з високим вмістом магнетиту

( $6,4$  об. %) та значеннями структурних параметрів, наведених у таблиці для ферофлюїду з концентрацією  $\varphi_m = 0,35$  об. % (відсутній вплив структурного фактора на експериментальні МКРН криві). Розбіжність між теоретичною кривою та відповідної їй експериментальною кривою на рис. 2 пов'язана з відмінністю потенціалу

взаємодії в дослідженому ферофлюїді від потенціалу твердих сфер. Це вказує на той факт, що в системі може бути присутня також магнітна взаємодія, яка в розглядуваній моделі не враховується.

### Висновки

Методом МКРН було досліджено структуру полярної МРС магнетит/олеїнова та додецилбензолсульфонова кислоти/ізобутанол із різним вмістом магнітного матеріалу. Одержані з експе-

рименту структурні параметри магнітних частинок узгоджуються зі значеннями для аналогічних типів МРС. Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити висновок, що в дослідженій МРС у зазначеному діапазоні концентрацій магнетиту відсутні агрегати магнітних наночастинок і вказаний ферофлюїд є високостабільною системою.

Показано, що метод МКРС може бути використаний для прямого визначення ефективного структурного фактора й дає змогу проводити аналіз взаємодії між колоїдами в МРС.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Berkovski B.* Magnetic Fluids and Applications Handbook. - N.-Y.: Beggel House Inc., 1996. - P. 350.
2. *Iwamoto Y., Yamaguchi H., Niu X.-D.* Magnetically-driven heat transport device using a binary temperature-sensitive magnetic fluid // *J. Mag. Mag. Mater.* - 2011. - 323 - P. 1378 - 1383.
3. *Proceedings of the 11-th Int. Conf. on Magnetic Fluids* / Ed. by P. Kopcansky, M. Timko, J. Kovac, M. Vaclavikova, S. Odenbach // *J. of Physics: Condensed Matter.* - 2008. - Vol. 20(20). - P. 200301.
4. *Johannsen M., Thiesen B., Wust P., Jordan A.* // *Int. J. Hyperthermia.* - 2010. - Vol. 26(8). - P. 790 - 795.
5. *Jordan A., Scholz R., Maier-Hauff K. et al.* Presentation of a new magnetic field therapy system for the treatment of human solid tumors with magnetic fluid hyperthermia // *J. Mag. Mag. Mater.* - 2001. - Vol. 225. - P.118 - 126.
6. *Авдеев М.В., Аксенов В.Л.* Малоугловое рассеяние нейтронов в структурных исследованиях магнитных жидкостей // *УФН.* - 2010. - Т. 180. - С. 1009 - 1034.
7. *Petrenko V.I., Avdeev M.V., Aksenov V.L. et al.* Magnetic fluids with excess of a surfactant according to the data of small-angle neutron scattering // *J. of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* - 2009. - Vol. 3(1). - P. 161 - 164.
8. *Фертман В.Е.* Магнитные жидкости. - Минск: Вышэйшая школа, 1988. - 184 с.
9. *Avdeev M.V., Aksenov V.L., Balasoiu M. et al.* Comparative analysis of the structure of sterically stabilized ferrofluids on polar carriers by small-angle neutron scattering // *J. Coll. Interf. Sc.* - 2006. - Vol. 295. - P. 100 - 107.
10. *Ostanevich Y.M.* Time-of-flight small-angle scattering spectrometers on pulsed neutron sources // *Macromol. Chem., Macromol. Symp.* - 1988. - Vol. 15. - P. 91 - 103.
11. *Куклин А.И., Исламов А.Х., Ковалев Ю.С. и др.* Оптимизация двухдетекторной системы малоуглового нейтронного спектрометра ЮМО для исследования нанообъектов // *Поверхность.* - 2006. - № 6. - С. 73 - 84.
12. *Kuklin A., Rogov A., Gorshkova Y. et al.* Analysis of neutron spectra and fluxes obtained with cold and thermal moderators at IBR-2 reactor: Experimental and computer-modeling studies // *Physics of Particles and Nuclei Letters.* - 2011. - Vol. 8. - P. 119 - 128.
13. *Pedersen J.S.* Analysis of small angle scattering data from colloids // *J. Coll. Interf. Sc.* - 1997. - Vol. 70. - P. 171 - 210.
14. *Свергун Д.И., Фейгин Л.А.* Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. - М.: Наука, 1986. - 280 с.
15. *Avdeev M.V., Balasoiu M., Aksenov V.L. et al.* On the magnetic structure of magnetite/oleic acid/benzene ferrofluids by small-angle neutron scattering // *J. Magn. Magn. Mater.* - 2004. - Vol. 270. - P. 371 - 379.
16. *Нагорний А.В., Булавін Л.А., Петренко В.І. та ін.* Чутливість методу малокутового розсіяння нейтронів при визначенні структурних параметрів магнітних рідинних систем з низькою концентрацією магнетиту // *УФЖ.* - 2013. - Т. 58(8). - P. 735 - 741.
17. *Gazeau F., Boue F., Dubois E., Perzynski R.* Static and quasi-elastic small angle neutron scattering on biocompatible ionic ferrofluids: magnetic and hydrodynamic interactions // *J. Phys. Condens. Matter.* - 2003. - Vol. 15. - S. 1305.
18. *Petrenko V.I., Aksenov V.L., Avdeev M.V. et al.* Analysis of the structure of aqueous ferrofluids by the small-angle neutron scattering method // *Physics of the Solid State.* - 2010. - Vol. 52(5). - P. 974 - 978.
19. *Petrenko V.I., Avdeev M.V., Garamus V.M. et al.* Micelle formation in aqueous solutions of dodecylbenzene sulfonic acid studied by small-angle neutron scattering // *Colloids Surf. A.* - 2010. - Vol. 369. - P. 160 - 164.
20. *Frenkel D., Vos R.J., de Kruijff C.G., Vrij A.* Structure factors of polydisperse systems of hard spheres: A comparison of Monte Carlo simulations and Percus - Yevick theory // *J. Chem. Phys.* - 1986. - Vol. 84(8). - P. 4625 - 4630.

А. В. Нагорный<sup>1,2</sup>, Л. А. Булавин<sup>1,3</sup>, В. И. Петренко<sup>1,2</sup>,  
О. И. Иваньков<sup>1,2</sup>, О. В. Томчук<sup>1,2</sup>, М. В. Авдеев<sup>2</sup>, Л. Векаш<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

<sup>2</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>3</sup> Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

<sup>4</sup> Центр фундаментальных и передовых технических исследований, Румынская АН, Тимишоара, Румыния

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНОГО ФАКТОРА МЕЖЧАСТИЧНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ФЕРРОЖИДКОСТИ ПО ДАННЫМ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ

Представлены результаты исследований структуры и межчастичного взаимодействия полярной магнитной жидкости с разным содержанием магнетита, которые получены методом малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН). Эксперимент проводился на спектрометре малоуглового рассеяния ЮМО реактора ИБР-2 Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Россия). В качестве магнитной жидкостной системы был использован феррофлюид магнетит/олеиновая и додецил-бензолсульфоновая кислоты/изобутанол. Показано, что экспериментальные кривые МУРН хорошо описываются форм-фактором полидисперсных сферических частиц только для жидкостных систем с концентрацией магнетита ~ 0,5 об. %. Для больших концентраций магнитного материала в объеме феррофлюида наблюдалось существенное влияние структурного фактора на МУРН спектры. В исследуемом диапазоне концентраций магнитного материала, агрегация магнитных частиц и молекул стабилизатора не происходит. Наводятся экспериментально полученные зависимости эффективного структурного фактора и приводится дополнительное сравнение с теоретической зависимостью, рассчитанной для потенциала твердых сфер в полидисперсном приближении.

*Ключевые слова:* магнитные жидкости, феррофлюиды, малоугловое рассеяние нейтронов, структурный фактор, межчастичное взаимодействие.

A. V. Nagorny<sup>1,2</sup>, L. A. Bulavin<sup>1,3</sup>, V. I. Petrenko<sup>1,2</sup>,  
O. I. Ivankov<sup>1,2</sup>, O. V. Tomchuk<sup>1,2</sup>, M. V. Avdeev<sup>2</sup>, L. Vékás<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Taras Shevchenko National University, Kyiv

<sup>2</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow region, Russia

<sup>3</sup> Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

<sup>4</sup> Center for Fundamental and Advanced Technical Research, Romanian Academy of Sciences, Timisoara, Romania

## DETERMINATION OF THE STRUCTURE FACTOR OF INTERPARTICLE INTERACTIONS IN THE FERROFLUID BY SMALL-ANGLE NEUTRON SCATTERING

Results of the structure and interparticle interaction investigations of polar magnetic fluid with different content of magnetite, which are obtained by small-angle neutron scattering (SANS) are presented in the work. The experiment was performed on small-angle scattering spectrometer YuMO at the Pulsed Reactor IBR-2 in the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia). Polar ferrofluid magnetite/oleic and dodecyl-benzenesulfonic acid/isobutanol was considered. It is shown that the experimental SANS curves are well described by form-factor for polydisperse spherical particles only for ferrofluids with magnetite concentration of about 0.5 vol. %. Significant effect of structural factors on the SANS spectra was observed for respectively large concentrations of magnetic material in the volume of ferrofluid. Aggregation of magnetic particles and the molecules of the stabilizer do not occur in the considered concentration range of magnetic material. Experimentally obtained dependences of the effective structure factor as well as the comparison with the theoretical curve calculated for the hard sphere potential in polydisperse approximation are presented in the work

*Keywords:* magnetic fluid, ferrofluid, small angle neutron scattering, structure factor, the interparticle interaction.

### REFERENCES

1. Berkovski B. Magnetic Fluids and Applications Handbook. - N.-Y.: Beggel House Inc., 1996. - P. 350.
2. Iwamoto Y., Yamaguchi H., Niu X.-D. // J. Mag. Mater. - 2011. - 323 - P. 1378 - 1383.
3. Proceedings of the 11-th Int. Conf. on Magnetic Fluids / Ed. by P. Kopcansky, M. Timko, J. Kovac, M. Vaclavikova, S. Odenbach // J. of Physics: Condensed Matter. - 2008. - Vol. 20(20). - P. 200301.
4. Johannsen M., Thiesen B., Wust P., Jordan A. // Int. J. Hyperthermia. - 2010. - Vol. 26(8). - P. 790 - 795.
5. Jordan A., Scholz R., Maier-Hauff K. et al. // J. Mag. Mater. - 2001. - Vol. 225. - P. 118 - 126.
6. Avdeev M.V., Aksenov V.L. // UFN. - 2010. - Vol. 180. - P. 1009 - 1034. (Rus)
7. Petrenko V.I., Avdeev M.V., Aksenov V.L. et al. // J. of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. - 2009. - Vol. 3(1). - P. 161 - 164.
8. Fertman V.E. Magnetic fluids. - Minsk: Vyshejschaya shkola, 1988. - 184 p. (Rus)
9. Avdeev M.V., Aksenov V.L., Balasoiu M. et al. // J. Coll. Interf. Sc. - 2006. - Vol. 295. - P. 100 - 107.
10. Ostanevich Y.M. // Macromol. Chem., Macromol.

- Symp. - 1988. - Vol. 15. - P. 91 - 103.
11. *Kuklin A.I., Islamov A.Kh., Kovalev Yu.S. et al. // Poverkhnost. - 2006. - Iss. 6. - P. 73 - 84. (Rus)*
  12. *Kuklin A., Rogov A., Gorshkova Y. et al. // Physics of Particles and Nuclei Letters. - 2011. - Vol. 8. - P. 119 - 128.*
  13. *Pedersen J.S. // J. Coll. Interf. Sc. - 1997. - Vol. 70. - P. 171 - 210.*
  14. *Svergun D.I., Fejgin L.A. X-ray and neutron small-angle scattering. - Moskva: Nauka, 1986. - 280 p.*
  15. *Avdeev M.V., Balasoiu M., Aksenov V.L. et al. // J. Magn. Magn. Mater. - 2004. - Vol. 270. - P. 371 - 379.*
  16. *Nagornyj A.V., Bulavin L.A., Petrenko V.I. et al. // Ukr. J. Phys. - 2013. - Vol. 58(8). - P. 735 - 741. (Ukr)*
  17. *Gazeau F., Boue F., Dubois E., Perzynski R. // J. Phys. Condens. Matter. - 2003. - Vol. 15. - S1305.*
  18. *Petrenko V.I., Aksenov V.L., Avdeev M.V. et al. // Physics of the Solid State. - 2010. - Vol. 52(5). - P. 974 - 978.*
  19. *Petrenko V.I., Avdeev M.V., Garamus V.M. et al. // Colloids Surf. A. - 2010. - Vol. 369. - P. 160 - 164.*
  20. *Frenkel D., Vos R.J., de Kruif C.G., Vrij A. // J. Chem. Phys. - 1986. - Vol. 84(8). - P. 4625 - 4630.*

Надійшла 25.12.2013

Received 25.12.2013