

А.В. НАГОРНИЙ,<sup>1,2</sup> Л.А. БУЛАВІН,<sup>1</sup> В.І. ПЕТРЕНКО,<sup>1,2</sup> М.В. АВДЄЄВ,<sup>2</sup>  
В.Л. АКСЬОНОВ<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет ім. Тараса Шевченка  
(Просп. Академіка Глушкова, 2, Київ 03022)

<sup>2</sup> Об'єднаний інститут ядерних досліджень  
(Вул. Жоліо-Кюрі 6, м. Дубна 141980, Росія; e-mail: avnagorny@jinr.ru)

<sup>3</sup> Петербурзький інститут ядерної фізики ім. Б.П. Константинова  
(Орлова роща, ФГБУ "ПІЯФ", м. Гатчина 188300, Ленінградська обл., Росія)

## ЧУТЛИВІСТЬ МЕТОДУ МАЛОКУТОВОГО РОЗСІЯННЯ НЕЙТРОНІВ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ СТРУКТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНИХ РІДИННИХ СИСТЕМ З НИЗЬКОЮ КОНЦЕНТРАЦІЄЮ МАГНЕТИТУ

УДК 539.1

*У роботі розглядаються можливості методу малокутового розсіяння нейтронів при дослідженні магнітних рідинних систем різного типу з низькою концентрацією магнетиту (~0,1% за об'ємом), коли відсутній ефект структурного фактора. У рамках моделі "сферичне ядро-оболонка" проаналізовано структурні параметри наночастинок (густина довжини магнітного когерентного розсіяння, товщина немагнітного шару на поверхні магнітних частинок та товщина стабілізаційної оболонки), які можна одержати з експериментів малокутового розсіяння нейтронів та параметрів наближення Гіньє для інтенсивності розсіяння. За допомогою розрахунків встановлено чутливість указаної моделі до зміни структурних параметрів магнітної рідинної системи з урахуванням полідисперсності частинок. На прикладі магнітних рідинних систем магнетит/олеїнова кислота/бензол (на основі неполярної рідини-носія) та магнетит/олеїнова та додецил-бензолсульфонова кислоти/пентанол (на основі полярної рідини-носія) здійснено вибір та проведено порівняння умов виконання експерименту.*

*Ключові слова:* магнітна рідинна система, малокутове розсіяння нейтронів, поверхнево-активна речовина.

### 1. Вступ

Магнітні рідинні системи (МРС) або ферофлюїди – це рідинні колоїдні системи магнітних наночастинок (розмір ~10 нм), що вкриті шаром поверхнево-активних речовин (ПАР) з метою отримання стабільної рідинної системи. Нанометровий розмір частинок відповідає їх однодомному стану намагніченості і визначає близьку до суперпа-

рамагнітної поведінку МРС. Вивчення структури даних систем має як великий фундаментальний, так і прикладний інтерес [1–3].

Метод малокутового розсіяння нейтронів (МКРН) активно використовується [2–5] при дослідженні ядерної і магнітної структур МРС. Наявність однорідного рідинного середовища (рідини-носія) надає широкі можливості для реалізації варіації контрасту в досліджуваних системах за допомогою використання розчинів дейтерованих і протонованих рідинних основ [6]. Разом з тим, диспергованим у рідинному носію

© А.В. НАГОРНИЙ, Л.А. БУЛАВІН, В.І. ПЕТРЕНКО,  
М.В. АВДЄЄВ, В.Л. АКСЬОНОВ, 2013

магнітним наночастинкам притаманна значна полідисперсність, що ускладнює аналіз експериментальних даних. У першу чергу це пов'язано з тим, що у ферофлюїдах між частинками існує значна диполь-дипольна магнітна взаємодія, яка залежить від взаємної орієнтації магнітних моментів частинок і приводить до відхилень від парамагнітної поведінки. Вказані чинники перешкоджають прямому спостереженню однієї із найцікавіших властивостей магнітних наночастинок – передбачуваного немагнітного поверхневого шару з товщиною до 1 нм, існування якого пояснює пониження питомої намагніченості магнітних наночастинок зі зменшенням їх розміру [2, 6], а також дає можливість покращити інтерпретацію результатів низки експериментів з намагнічуваності [7, 10] та ефекту Мессбауера [11, 12]. Чисельний розрахунок даного явища представлено у теоретичній роботі Кодами с колегами [13]. Необхідно, однак, зазначити, що ефект зменшення магнітного розсіяння може бути пов'язаний із переорієнтаціями вектора магнітного момента та броунівським рухом частинок [14]. Як було показано раніше [4], навіть у випадку мало концентрованих МРС з об'ємною часткою магнітного матеріалу близько 1%, вплив структурного фактора приводить до ефективного збільшення спостережуваного магнітного розміру частинок. При використанні розсіяння неполяризованих нейтронів на немамагнічених МРС за відсутності зовнішнього магнітного поля це виявляється у відхиленні в області малих векторів розсіяння [15] експериментальних даних від модельних кривих розсіяння, які відтворені без урахування взаємодії. Зменшення диполь-дипольної взаємодії можливе шляхом подальшого зменшення концентрації частинок у рідинній системі. Проте, це приводить до падіння реєстрованої інтенсивності розсіяння та, особливо у разі повністю протонованих розчинників, завдяки некогерентному фону робить можливим аналіз кривих розсіяння лише в області Гіньє, де основними характеристиками речовини виступають інтегральні параметри [16]: інтенсивність розсіяння у нульовий кут,  $I(0) = |\int \rho(\mathbf{r}) d\mathbf{r}|^2$ , та квадрат радіуса інерції,  $R_g^2 = \int_V \rho(\mathbf{r}) r^2 d\mathbf{r} / \int_V \rho(\mathbf{r}) d\mathbf{r}$ , які визначаються через густину довжини розсіяння,  $\rho(\mathbf{r})$ , що є усередненим за хімічним та ізотопічним складом значенням довжини когерентного розсіяння нейтронів одиниці об'єму речовини.

Раніше нами були проведені розрахунки для сильно розбавлених неполярних магнітних рідинних систем у монодисперсному наближенні [17]. Метою даної роботи є оцінка можливості проведення експерименту з малокутового розсіяння нейтронів на полярних та неполярних магнітних рідинних системах у полідисперсному наближенні за відсутності впливу структурного фактора (об'ємна частка магнітного матеріалу  $\sim 0,1\%$ ) та знаходження таких умов режиму проведення експерименту, які б дозволяли із одержаних результатів зробити оцінки магнітних властивостей частинок. Для цього шляхом моделювання у припущенні про відсутність магнітної взаємодії між частинками розглянута чутливість параметрів Гіньє до зміни різних параметрів полідисперсних частинок МРС, у тому числі і товщина немагнітного шару наночастинок.

Вирази для параметрів Гіньє, а саме: квадрат радіуса інерції  $R_g^2$  та інтенсивність розсіяння в нульовий кут  $I(0)$ , отримані в рамках моделі “сферичне ядро-оболонка” для профілів ядерної та магнітної густини довжини розсіяння полідисперсних частинок магнетиту ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Розглянуто два випадки полідисперсних колоїдних систем з типовими середніми розмірами магнітних частинок  $R_0 = 3$  нм і  $R_0 = 8$  нм, та параметром полідисперсності  $S = 0,3$  для лог-нормального розподілу за розмірами. Варійованими величинами були: товщина немагнітного шару ( $h$ ), густина довжини магнітного розсіяння ( $\rho_m$ ), товщина ( $\delta$ ) і густина довжини розсіяння нейтронів ( $\rho_1$ ) оболонки ПАР. Враховуючи той факт, що точки компенсації даних модельних систем лежать в діапазоні 40–70% об'ємної частки дейтерованої компоненти у рідинній основі, розрахунки були проведені для найбільших сигналів МКРН для випадку повністю протонованої та повністю дейтерованої рідинної основи. На меті був вибір умов експерименту з варіації контрасту МКРН для надійного (з похибкою менше 5%) визначення параметрів частинок МРС. Критерій 5% відхилення вибраний з огляду на типові похибки реальних експериментів МКРН.

## 2. Опис моделі

У випадку магнітних сферичних полідисперсних частинок за відсутності зовнішнього магнітного поля, коли магнітні моменти частинок орієнтовані хаотично і магнітна складова розсіяння ізотропна, інтенсивність малокутового розсіяння нейтро-

нів можна записати у вигляді суми ядерного і магнітного розсіяння [16]:

$$I(q) = I_n(q) + (2/3)I_m(q), \quad (1)$$

де  $I_n(q)$ ,  $I_m(q)$  – відповідно ядерний та магнітний внески у розсіяння. Коефіцієнт  $2/3$  у другому доданку формули (1) пов'язаний з тим, що довжина магнітного когерентного розсіяння залежить від кута між вектором розсіяння і магнітним моментом атома. Він виникає при усередненні по всіх неупорядкованих положеннях магнітних моментів магнітно не взаємодіючих частинок. Складові у виразі (1) можна записати у вигляді

$$I_n(q) = n(\rho_0 - \rho_1)^2 \times \langle [V(r)F(qr) + \eta V(r + \delta)F(q(r + \delta))]^2 \rangle_r, \quad (2)$$

$$I_m(q) = n\rho_m^2 \langle [V(r - h)F(q(r - h))]^2 \rangle_r,$$

де  $n$  – концентрація частинок в МРС; параметр нейтронного контрасту,  $\eta = (\rho_1 - \rho_S)/(\rho_0 - \rho_1)$ , який визначається густиною довжини когерентного розсіяння магнітного ядра,  $\rho_0$ , оболонки ПАР,  $\rho_1$ , і рідкого середовища,  $\rho_S$ , відповідно;  $\delta$  – товщина оболонки ПАР;  $\rho_m$  – магнітна густина довжини розсіяння ядра частинки;  $h$  – товщина можливого немагнітного шару на поверхні магнетиту;  $V(r) = (4/3)\pi r^3$  – об'єм сфери з радіусом  $r$ ;  $F(qr) = 3(\sin(qr) - qr \cos(qr))/(qr)^3$  – формфактор сфери. У другому виразі системи (2) передбачається, що розсіюючі магнітні частинки з ефективним об'ємом  $V_m = (4/3)\pi(r - h)^3$  розміщені в немагнітному середовищі, а знак  $\langle \dots \rangle_r$  означає усереднення за лог-нормальною функцією розподілу вигляду:  $Dn(r) = \exp(-\ln^2((r/R_0)/2S^2))(r\sqrt{2\pi S})^{-1}$ .

При переході в область апроксимації Гіньє ( $qR_g < 1$ ) використовуємо відповідне наближення [16]:

$$I(q) \simeq I(0) \exp(-(qR_g)^2/3), \quad (3)$$

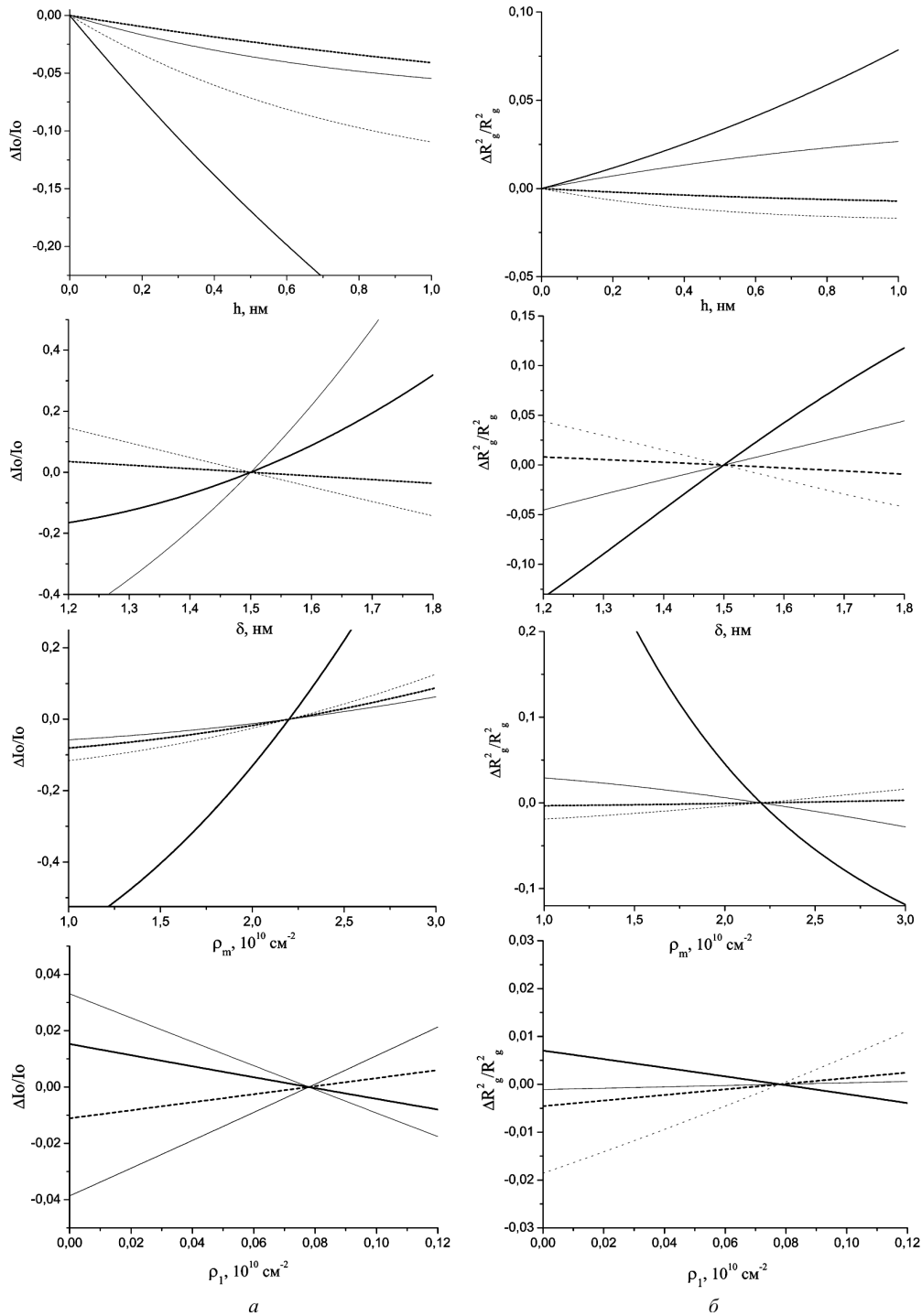
де  $I(0)$  – інтенсивність розсіяння в нульовий кут,  $R_g$  – радіус інерції частинки. Використовуючи (2) і (3), та вводячи позначення  $\Delta\rho = \rho_0 - \rho_1$ , отримуємо

$$I(0) = n(\Delta\rho)^2 \langle [V(r) + \eta V(r + \delta)]^2 \rangle_r + (2/3)n\rho_m^2 \langle V_m(r - h)^2 \rangle_r,$$

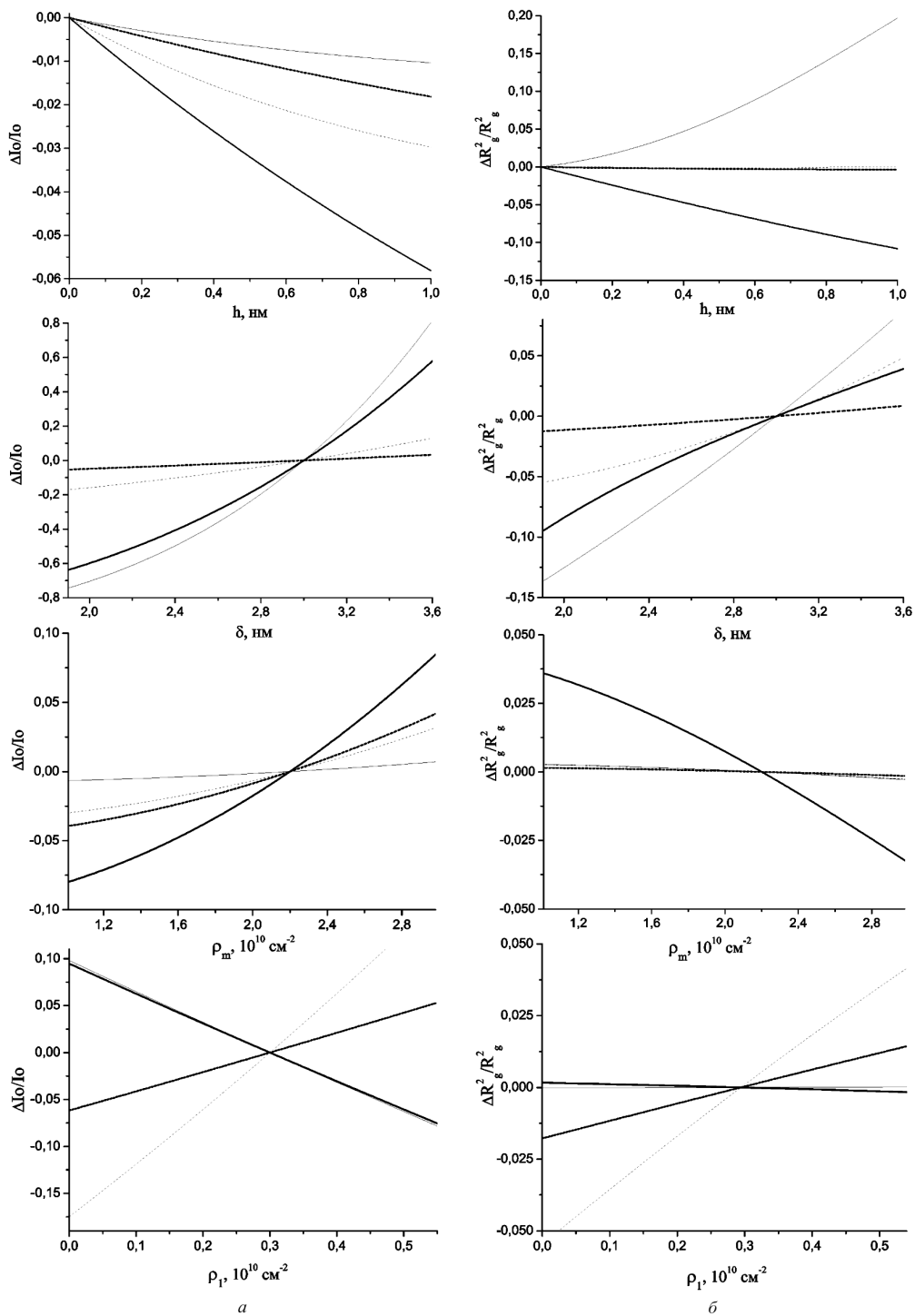
$$R_g^2 = (1/A) \langle [rV(r) + \eta(r + \delta)V(r + \delta) + (\eta\delta)^2 V(r)V(r + \delta)]^2 \rangle_r + (1/A)(2/3)(\rho_m/\Delta\rho)^2 \langle (r - h)^2 V_m(r - h)^2 \rangle_r, \\ A = \langle [V(r) + \eta V(r + \delta)]^2 \rangle_r + (2/3)(\rho_m/\Delta\rho)^2 \langle V_m(r - h)^2 \rangle_r. \quad (4)$$

Густину довжини розсіяння розчинника з об'ємною часткою дейтерованої компоненти  $x$  можна записати як  $\rho_S = x\rho_D + (1 - x)\rho_H$ , де  $\rho_D$ ,  $\rho_H$  – густина довжини розсіяння повністю дейтерованого та протонованого розчинників, відповідно;  $x$  може змінюватися в діапазоні 0–1 (0–100%). Обчислення проводилися для двох значень дейтерованої компоненти  $x = 0$  і  $x = 1$ .

Відносні зміни параметрів наближення Гіньє ( $\Delta R_g^2/R_g^2$ ,  $\Delta I(0)/I(0)$ ) знаходили при варіюванні структурних параметрів частинок:  $h$ ,  $\delta$ ,  $\rho_m$ ,  $\rho_1$ , решта параметрів приймалися незмінними. За фіксовану початкову точку було взято характерні значення для високо стабільних МРС на основі неполярних та полярних органічних розчинників з магнетитом ( $\rho_0 = 6,9 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ), стабілізованим монокарбонними кислотами [15]. За рідинну основу ферофлюїду вибирали бензол (неполярний розчинник,  $C_6H_6$ ) із  $\rho_D = 5,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  і  $\rho_H = 1,1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , та пентанол (полярний розчинник,  $C_5H_{11}OH$ ) із  $\rho_D = 6,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  і  $\rho_H = -0,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Початкові значення для варіюваних параметрів становили:  $\delta = 1,5 \text{ нм}$  (для неполярної МРС на основі бензолу з одинарним шаром ПАР) та  $\delta = 3 \text{ нм}$  (для полярної МРС на основі пентанолу з подвійним шаром ПАР),  $\rho_1 = 0,08 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ,  $h = 0 \text{ нм}$  та  $\rho_m = 2,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Вибір інтервалів зміни цих параметрів ґрунтувався на попередніх літературних даних [5, 15, 18–22]. Для  $\delta$  був вибраний інтервал (1,2–1,8) нм (неполярна МРС) та (2,0–3,6) нм (полярна МРС), що відображає можливу ефективну товщину шару ПАР в полярному або неполярному ферофлюїді [15, 23]. Густина довжини когерентного розсіяння оболонки ПАР  $\rho_1$  змінювалася в інтервалі (0,0–0,12)  $\cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , що відображало той факт,



**Рис. 1.** Відносне відхилення інтенсивності розсіяння в нульовий кут (а) та радіуса інерції (б) при варіації різних параметрів моделі “ядро-оболонка” в полідисперсному випадку для MPC магнетит/олеїнова кислота/бензол. Графіки подано для двох значень  $R_0$  (жирні лінії – 8 нм, тонкі – 3 нм) у випадку дейтерованої рідини-носія (суцільні лінії) та протонованої рідини-носія (пунктирні лінії)



**Рис. 2.** Відносне відхилення інтенсивності розсіяння в нульовий кут (а) та радіуса інерції (б) при варіації різних параметрів моделі “ядро–оболонка” для МРС магнетит/олеїнова та додецил-бензолсульфонова кислоти/пентанол. Графіки подано для двох значень  $R_0$  (жирні лінії – 8 нм, тонкі – 3 нм) у випадку дейтерованої рідини-носія (суцільні лінії) та протонованої рідини-носія (пунктирні)

що розчинник при приготуванні магнітної рідинної системи практично не проникає в шар ПАР [23] у випадку МРС на основі бензолу. Для полярного розчинника густину довжини розсіяння оболонки ПАР варіювали в інтервалі  $(0,0-0,5) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , оскільки в даному випадку вказана величина є усередненим значенням  $(0,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2})$  для двох шарів ПАР на поверхні магнітних частинок: олеїнової ( $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$ ,  $\rho_1 = 0,078 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) та додецилбензолсульфонової ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3\text{H}$ ,  $\rho_1 = 0,51 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ) кислот. Параметр  $h$  змінювався в інтервалі  $(0,0-1,0)$  нм згідно з очікуваним ефектом [8, 13]. Для магнітної густини розсіяння  $\rho_m$  інтервал варіювання становив  $(1,0-3,0) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

Як відомо, у полярних МРС для формування зовнішнього стабілізаційного шару потрібен певний надлишок ПАР у об'ємі рідинної основи [5, 20]. При цьому не адсорбовані молекули ПАР можуть утворювати міцели в об'ємі полярного розчинника [24], в той час як у неполярному розчиннику такого не спостерігається [25]. Внесок у розсіяння нейтронів від міцел, утворення яких у полярних ферофлюїдах можливе за наявності надлишку ПАР, у даній роботі не враховувався.

### 3. Результати та їх обговорення

На рис. 1, 2 наведено розраховані залежності відносних змін параметрів, які можна спостерігати з МКРН експерименту, при варіюванні зазначених вище змінних для неполярних та полярних ферофлюїдів. Оскільки з наближення Гін'є визначається квадрат радіуса інерції, розглядалася квадратична зміна  $\Delta R_g^2/R_g^2$ . Пунктиром позначені залежності для випадку МРС з повністю протонованою рідиною-носієм, а суцільними лініями – випадок з повністю дейтерованою рідинною основою. Тонкі криві відповідають МРС з малим середнім розміром частинок, а жирні криві – МРС з великим середнім розміром.

Відібравши на рис. 1 випадки з відхиленнями більшими за 5%, можна зазначити, що параметри Гін'є для неполярних МРС практично не чутливі до невизначеності параметра густини довжини розсіяння оболонки  $\rho_1$ . Об'єднавши інформацію за трьома іншими параметрами, бачимо, що найбільш інформативним є випадок повністю дейтерованої рідинної системи з великим середнім розміром частинок. Це є зручним чинником під час проведення експерименту МКРН на дуже роз-

бавлених МРС з неполярними рідинними основами. Крім того, значне заміщення протонованого розчинника дейтерованою компонентою додатково поліпшує умови експерименту, оскільки рівень фону некогерентного розсіяння нейтронів на системах з високим вмістом дейтерованої компоненти набагато нижчий, аніж у випадку з протонованими рідинами. Отримані дані для неполярних ферофлюїдів у полідисперсному наближенні якісно підтверджують аналогічні розрахунки, що зроблені раніше для монодисперсного випадку [15].

Узагальнюючи дані для випадку МРС на основі полярної рідини-носія, які відображені на рис. 2, можна зробити висновок про те, що аналіз Гін'є при суттєвому пониженні концентрації магнітного матеріалу для полярного ферофлюїду залишається застосовним для визначення товщини немагнітного шару та товщини стабілізаційної оболонки ПАР. При цьому найбільш інформативним із двох спостережуваних інтегральних параметрів  $R_g^2$  та  $I(0)$  є останній. Проте, на відміну від низькоконцентрованої неполярної МРС у полярній рідинній системі аналіз Гін'є стає слабо чутливим до невизначеності параметра  $\rho_m$ , в той час як відхилення параметра  $\rho_1$  від очікуваного значення може бути визначене з експерименту МКРН із достатньою точністю. Такий результат є цілком закономірним, оскільки наявність подвійного стабілізаційного шару на поверхні наночастинок одночасно веде до зростання ефективного об'єму для ядерного розсіяння та відносного зменшення об'єму магнітного матеріалу, для якого спостерігається магнітне розсіяння.

### 4. Висновки

Таким чином, при проведенні експерименту з малокутового розсіяння нейтронів для визначення структури магнітних рідинних систем у випадку низької концентрації магнетиту, найбільш перспективним є шлях варіації контрасту при змінах долі дейтерованої компоненти  $x$  в діапазоні 0,75–1,0 для МРС з відносно великими середніми розмірами частинок. З одного боку, це досить далеко від ефективної точки компенсації. З іншого боку, даний діапазон дозволяє отримати криві малокутового розсіяння нейтронів для надійного визначення параметрів: товщини немагнітного шару ( $h$ ), густини магнітного розсіяння магнетиту ( $\rho_m$ ) та товщини стабілізаційної оболонки ( $\delta$ ) у випадку неполяр-

ної МРС, а також товщини немагнітного шару ( $h$ ), довжини розсіювання ( $\rho_1$ ) та товщини ( $\delta$ ) оболонки ПАР – у випадку полярної рідинної системи.

1. B. Berkovsky and V. Bashtovoi, *Magnetic fluids and applications handbook* (Begell House, New York, 1996).
2. L. Vekas, M.V. Avdeev, and D. Bica, *Magnetic Nanofluids: Synthesis and Structures. Nanoscience and Its Applications in Biomedicine* edited by Donglu Shi. (Springer Verlag, Berlin, 2009), Ch. 25, P. 645.
3. М.В. Авдеев, В.Л. Аксенов, УФН **180**, 10 (2010).
4. М.В. Авдеев, УФН **10**, 1139 (2007).
5. В.И. Петренко, М.В. Авдеев, В.Л. Аксенов, и др., Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. **2**, 92 (2009).
6. M.V. Avdeev, J. Appl. Cryst. **40**, 56 (2007).
7. R. Kaiser and G. Miskolczy, J. Appl. Phys. **41**, 1064 (1970).
8. A.E. Berkowitz *et al.*, Phys. Rev. Lett. **34**, 594 (1975).
9. P. Mollard, P. Germe, and A. Rousset, Phys. B **86**, 1393 (1977).
10. D.H. Han, J.P. Wang, Y.B. Feng *et al.*, J. Appl. Phys. **76**, 6591 (1994).
11. K. Haneda and A.H. Morrish, J. Appl. Phys. **63**, 4258 (1988).
12. E. Tronc, P. Prenè, J.P. Jolivet *et al.*, Hyperfine Interact. **112**, 97 (1998).
13. R.H. Kodama *et al.*, Phys. Rev. Lett. **77** 394 (1996).
14. О.Я. Дзюблик, УФЖ **23**, 881 (1978).
15. А.В. Феоктистов, М.В. Авдеев, В.Л. Аксенов и др., Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. **1**, 3 (2009).
16. Д.И. Свєргун, Л.А. Фейгин, *Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние* (Наука, Москва, 1986).
17. А.В. Нагорный, В.И. Петренко, М.В. Авдеев и др., Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. **12**, 3 (2010).
18. M.V. Avdeev, D. Bica, L. Vekas *et al.*, J. Coll. Int. Sci. **334**, 37 (2009).
19. V. Aksenov, M. Avdeev, M. Balasoiu *et al.*, Appl. Phys. A **74**, 943 (2002).
20. M.V. Avdeev *et al.*, Journal of Colloid and Interface Science **295**, 100 (2006).
21. А.В. Феоктистов, Л.А. Булавин, М.В. Авдеев та ін., УФЖ **54**, 3 (2009).
22. R.E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1985).
23. M.V. Avdeev, D. Bica, L. Vekas *et al.*, J. Magn. Magn. Mater. **311**, 6 (2007).
24. V.I. Petrenko, M.V. Avdeev, V.M. Garamus *et al.*, Coll. Surf. A: Phys. Eng. Asp. **369**, 160 (2010).
25. V.I. Petrenko, M.V. Avdeev, L. Almasy *et al.*, Coll. Surf. A: Phys. Engin. Asp. **337**, 91 (2009).

Одержано 02.03.13

А.В. Нагорный, Л.А. Булавин,  
В.И. Петренко, М.В. Авдеев, В.Л. Аксенов

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МЕТОДА  
МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ  
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ С НИЗКОЙ  
КОНЦЕНТРАЦИЕЙ МАГНЕТИТА

Резюме

В работе рассматриваются возможности метода малоуглового рассеяния нейтронов при исследовании магнитных жидкостных систем разного типа с низкой концентрацией магнетита (~0,1 об.%) в отсутствие эффекта структурного фактора. В рамках модели “сферическое ядро–оболочка” проанализированы структурные параметры наночастиц (плотность длины магнитного когерентного рассеяния, толщина немагнитного слоя на поверхности магнитных частиц и толщина стабилизационной оболочки), которые можно получить из экспериментов по малоугловому рассеянию нейтронов и параметров приближения Гинье для интенсивности рассеяния. С помощью расчетов установлена чувствительность упомянутой модели к изменениям структурных параметров магнитной жидкостной системы с учетом полидисперсности частиц. На примере магнитных жидкостных систем магнетит/олеиновая кислота/бензол (на основе неполярной жидкости-носителя) и магнетит/олеиновая и додецил-бензолсульфоновая кислоты/пентанол (на основе полярной жидкости-носителя) сделан выбор и проведено сравнение условий проведения эксперимента.

A. V. Nagornyi, L. A. Bulavin,  
V. I. Petrenko, M. V. Avdeev, V. L. Aksenov

SENSITIVITY OF SMALL-ANGLE  
NEUTRON SCATTERING METHOD AT DETERMINING  
THE STRUCTURAL PARAMETERS IN MAGNETIC  
FLUIDS WITH LOW MAGNETITE CONCENTRATIONS

Summary

The capabilities of the small-angle neutron scattering (SANS) method for the research of various magnetic fluids with low magnetite concentrations (~0.1 vol.%), when the structural factor effect is absent, have been considered. The structural parameters of nanoparticles (the magnetic coherent scattering length density, thickness of a nonmagnetic layer on the surface of magnetic nanoparticles, and thickness of a stabilizing shell), which can be obtained from SANS experiments and the Guinier parameters for the scattering intensity, were analyzed in the framework of the “spherical core–shell” model. The model is found to be sensitive to a variation of the structural parameters of magnetic fluids if the particle polydispersity is taken into account. Experimental conditions for magnetite/oleic acid/benzene (a nonpolar carrier fluid) and magnetite/oleic and dodecyl-benzenesulphonic acids/pentanol (a polar carrier fluid) ferrofluids are selected and compared.