

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ГАПОН ІГОР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 538.97

**СТРУКТУРА МАГНІТНИХ РІДИННИХ СИСТЕМ НА
ГРАНИЦІ ПОДІЛУ З ТВЕРДИМ ТІЛОМ**

01.04.14 – теплофізика і молекулярна фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико–математичних наук

Київ–2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на фізичному факультеті Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Науковий керівник: академік НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор
БУЛАВІН Леонід Анатолійович,
Київський національний університет імені Тараса
Шевченка, фізичний факультет, завідувач кафедри
молекулярної фізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
ЛИСЕЦЬКИЙ Лонгін Миколайович,
Інститут скінтіляційних матеріалів НАН України,
провідний науковий співробітник відділу молекулярних та
гетероструктурованих матеріалів,

кандидат фізико-математичних наук,
ІВАНЬКОВ Олександр Ігорович,
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України,
науковий співробітник відділу фізики реакторів.

Захист відбудеться “31” жовтня 2017 р. о 16⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.001.08 Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: м. Київ, пр. Глушкова 4, корп. 1, фізичний факультет, ауд. 500.

З дисертацією можна ознайомитись у Науковій бібліотеці ім. М. Максимовича Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: м. Київ, вул. Володимирська, 58 або на сайті Науково-консультаційного центру Київського національного університету імені Тараса Шевченка за посиланням <http://scc.univ.kiev.ua/abstracts>.

Автореферат розісланий “29” вересня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д.26.001.08,
кандидат фізико-математичних наук

Свечнікова О.С.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Магнітні рідинні системи широко застосовуються у різноманітних галузях, зокрема мають високу перспективу використання в медицині. Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених вивченню структури магнітних рідин в об'ємі зразка, мало уваги приділялося вивченню їх мікроструктури поблизу границі поділу з іншими середовищами. Це досить актуальне питання, так як при практичному застосуванні магнітна рідинна система завжди контактує з іншими середовищами, зокрема і з твердими тілами. Дане питання залишається актуальним і для інших об'єктів, вивчення яких на границі поділу продовжується.

Вивчення магнітних рідинних систем (МРС) має як загальнонауковий, так і прикладний інтерес. Дослідження поведінки самоорганізації частинок в них на границях їх поділу з твердим тілом можуть значно розширити уявлення про явище адсорбції в рідинних системах. Практичне застосування магнітних рідинних систем приводить до необхідності синтезу ферофлюїдів зі задалегідь відомою ступінню їх стабільності. Тому отримання взаємозв'язку структурних параметрів в об'ємі магнітних рідинних систем та на границях поділу з твердим тілом і газом дадуть змогу прогнозувати поведінку магнітних рідинних систем при їх використанні з урахуванням їхньої стабільності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є частиною досліджень, які проводяться на кафедрі молекулярної фізики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка у рамках Комплексної наукової програми «Конденсований стан – фізичні основи новітніх технологій». Зміст роботи був узгоджений з планами роботи за держбюджетною темою «Конденсований стан (рідинні системи, наноструктури, полімери, медико-біологічні об'єкти) – фундаментальні дослідження молекулярного рівня організації речовини» (№ ДР 0114U003475).

Мета та завдання досліджень. Метою роботи було встановлення зв'язку між структурною організацією частинок в об'ємі магнітних рідинних систем та на границях їх поділу методами нейтронної та рентгенівської рефлектометрії. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання:

- ✓ дослідити адсорбцію кремнієм магнітних частинок з МРС;
- ✓ встановити зв'язок адсорбційних властивостей МРС з їх структурою;
- ✓ визначити, як впливає стабілізація магнітної рідинної системи на адсорбцію магнітних частинок кристалічним кремнієм;
- ✓ за допомогою нейтронної рефлектометрії з'ясувати вплив зміни хімічного складу наночастинок на адсорбцію кремнієм частинок з МРС;
- ✓ дослідити вплив зовнішнього магнітного поля на структурну організацію магнітних наночастинок на границях поділу МРС з твердим тілом;
- ✓ за допомогою рентгенівської рефлектометрії дослідити границю поділу магнітна рідинна система-повітря.

Об'єкт дослідження – вплив об'ємної структури ферофлюїдів на їх адсорбційні властивості.

Предметом дослідження є магнітні рідинні системи та їх адсорбційні властивості.

Методи дослідження. Для дослідження структури магнітних рідинних систем в об'ємі в дисертаційній роботі був застосований метод малокутового розсіяння нейтронів. У той час, як для характеристики рідинних систем на границях поділу з твердим тілом застосовувались методи нейтронної та рентгенівської рефлектометрії.

Наукова новизна отриманих результатів. Вперше розглянуто вплив параметрів магнітної рідинної системи на її адсорбційні властивості. Знайдено зв'язок між концентрацією наночастинок, типом розчинника, типом стабілізації та матеріалом магнітної частинки в магнітній рідинній системі з структурною організацією наночастинок на границі поділу. Показано, що в стабільних магнітних рідинах на границі з твердим тілом відбувається адсорбція поодиноких магнітних наночастинок, а не їх агрегатів, у один шар. Зміна концентрації наночастинок, типу розчинника чи хімічного складу частинки, або зміна типу стабілізації в магнітній рідинній системі приводить до зміни параметрів адсорбційного шару (ступінь заповнення, товщини, тощо).

Практичне значення отриманих результатів. Отримана інформація дає змогу прогнозувати властивості магнітних рідинних систем на границях поділу ще в процесі їх приготування. Це дозволяє синтезувати необхідні в практиці ферофлюїди з потрібними адсорбційними параметрами.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною науковою працею, в якій висвітлені власні ідеї та розробки автора, що дозволили вирішити поставлені завдання. Запозичені в дисертації ідеї, положення чи гіпотези інших авторів мають відповідні посилання і використані лише для підкріплення ідей здобувача. Усі наукові результати, положення і висновки, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Дисертантом із використанням створеної особисто ним комірки для дослідження границі поділу тверде тіло – рідинна система проведена серія рефлектометричних експериментів з дослідження рідинних магнітних систем. Результати експериментів, представлених в роботі, отримані автором особисто. Вибір тематики, постановка мети та завдань дослідження здійснено дисертантом разом з науковим керівником академіком НАН України, д.ф.-м.н., проф. Булавіним Л.А.

Особистий вклад здобувача у виконанні в співавторстві роботи [1-19], полягає у проведенні всіх експериментів та обробці їхніх результатів. Здобувач взяв активну участь у обговоренні, інтерпретації експериментальних результатів та формулюванні висновків. Здобувачем розроблена рідинна комірка для дослідження границь поділу рідинна система та тверде тіло та проведено експерименти з її тестування, результати яких представлено в роботах [5, 8, 10, 11]. Здобувач, у роботі [4], привів порівняння методу малокутового розсіяння нейтронів з іншими методами, що використовуються в для дослідження МРС У роботах [2, 7, 15] дисертант запропонував методику

врахування дифузного розсіяння нейтронів для магнітних рідинних систем на границі з кремнієм. Здобувачем досліджено структурну організацію магнітних наночастинок на границі з повітрям, запропоновано модель адсорбції наночастинок на поверхні МРС та досліджено вплив магнітного поля на цій границі поділу на адсорбційні властивості, результати представлені в [6, 9, 10]. В роботах [2, 13, 14, 19] здобувач провів експеримент опрацював його та запропонував модель адсорбції моношару наночастинок як з полярної, так і з неполярної МРС. Порівнявши результати експериментів з малокутового розсіяння нейтронів та нейтронної рефлектометрії, дисертант продемонстрував вплив об'ємної структури ферофлюїда на адсорбційні властивості, при цьому виявив адсорбцію лише поодиноких частинок, а не їх агрегатів, в роботах [1, 6, 9, 18]. У роботах [5, 6] представлено експеримент для впливу концентрації та хімічного складу частинок, дані експерименти та їх інтерпретація проведена здобувачем.

Апробація результатів дисертації. Результати, представлені в роботі, оприлюднювались на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях: III International Conference on SMALL ANGLE NEUTRON SCATTERING (м. Дубна); The International Conference: Physics of liquid matter: modern problems (PLMP-2016) (м. Київ); 50-я Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния (м. Санкт-Петербург); Multifunctional nanoparticles, magnetically controllable fluids, complex flows, engineering and biomedical applications (м. Тімішоара, Румунія); WORKSHOP on Condensed matter research by means of neutron scattering methods (м. Константа, Румунія); 15th International Balkan Workshop on Applied Physics (м. Константа, Румунія); Девятнадцатая международная научная конференция молодых ученых и специалистов (ОМУС-2015) к 100-летию Ф.Л. Шапиро (м. Дубна); XLIX Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния (м. Санкт-Петербург); International Conference Condensed Matter Research at the IBR-2 (м. Дубна); Central European Training School on Neutron Techniques 2014 (CETS-2014) (м. Будапешт, Угорщина); International Conference Condensed Matter Research at the IBR-2 (м. Дубна); Восемнадцатая международная научная конференция молодых ученых и специалистов (ОМУС-2014) к 105-летию Н.Н. Боголюбова (м. Дубна); Structural aspects of biocompatible ferrocolloids 2013 (м. Кошица, Словачія); XLVII Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния (м. Санкт-Петербург).

Публікації. Основні матеріали та результати дисертації опубліковані у 5 статтях [1–5] у наукових фахових журналах, а також наукові результати дисертації додатково відображені в збірнику наукових праць, матеріалах та тезах доповідей на наукових конференціях, основні з яких [6–19] наведені у списку опублікованих праць за темою дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел, що містить 144 найменування. Роботу викладено на 135 сторінках машинописного тексту, який містить 38 рисунків та 3 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** висвітлено актуальність теми, її зв'язок з науковими програмами, темами, планами, сформульовано мету і завдання досліджень, наведено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, відображено особистий внесок автора, надано відомості про апробацію результатів, публікації, структуру та обсяг дисертації.

У **розділі 1** проаналізовані основні теоретичні та експериментальні роботи, присвячені дослідженню будови рідинних наносистем в об'ємі та на границях поділу. Наведено опис будови магнітних рідинних систем, а також їхнє застосування в медицині та техніці. Представлено огляд існуючих результатів досліджень адсорбційних властивостей наносистем на границях поділу. Описано сучасний стан дослідження магнітних рідинних систем за допомогою методів малокутового розсіяння нейтронів та рентгенівського випромінювання. Проаналізовані експериментальні роботи по дослідженню магнітних рідинних систем на границях поділу.

У **розділі 2** наведені основні відомості про особливості дослідження наносистем за допомогою рефлектометрії. Нейтронна рефлектометрія – це метод, який ґрунтується на відбитті теплових нейтронів на границі поділу двох середовищ. Відбиття в даному випадку можна описати добре відомим з хвильової оптики законом Френеля:

$$R = \frac{|n_0 \sin \theta_0 - n_1 \sin \theta_1|^2}{|n_0 \sin \theta_0 + n_1 \sin \theta_1|^2}, \quad (1)$$

де n_0 та n_1 – коефіцієнти заломлення нейтронів для першого та другого середовища відповідно, θ_0 – кут ковзання та θ_1 – кут заломлення. Даний метод дозволяє дослідити структуру нанорозмірних шаруватих утворень на границі поділу середовищ. Наведені теоретичні основи вказаного методу. Представлено методику Паррата та матричний метод розрахунку коефіцієнта відбиття, що широко використовуються для опису експериментальних даних. Наведено опис застосування методу нейтронної рефлектометрії для дослідження рідинних наносистем. Показано, що головною перевагою методу нейтронної рефлектометрії є можливість проведення досліджень структурної організації в об'ємних наносистем на границі рідина-тверде тіло. Представлений опис використання методу варіації нейтронного контрасту в нейтронному рефлектометричному експерименті.

Наведено опис експериментальних установок, що використовувались в роботі. Переважна більшість експериментів з нейтронної рефлектометрії магнітних рідинних систем була виконана на багатофункціональному рідинному часопротітному рефлектометрі ГРЕІНС, що збудований на імпульсному реакторі ІБР-2 Лабораторії нейтронної фізики ім. І.М. Франка Об'єднаного інституту ядерних досліджень (м. Дубна). Наводяться основні параметри рефлектометра та представлений детальний опис методики проведення експерименту на ньому. Інший, використаний в роботі рефлектометр NREX розташований у залі дослідницького реактора FRM-II, що знаходиться в м. Гархінг (Німеччина) і

використовує монохроматичний пучок холодних нейтронів. NREX має також горизонтальне розміщення зразка, що дозволяє проводити дослідження з рідинними системами. Цей рефлектометр може бути використаний для проведення експерименту як з нейтронної, так і з рентгенівської рефлектометрії. Наводиться опис організації експерименту на згаданому рефлектометрі та його основні параметри.

У розділі 3 розглядається застосування методів нейтронної та рентгенівської рефлектометрії рідин та рідинних систем. Представлені технічні особливості проведення експериментів. Описується сконструйована дисертантом комірка для експериментів з вивчення структури границі поділу рідке середовище / тверде тіло. Створена комірка використовувалась для дослідження структурної організації магнітних частинок на поверхні кремнію.

При дослідженні полярних МРС на границі з кремнієм виявлено значне дифузне розсіяння нейтронів, яке суттєво перевищує дифузне розсіяння у випадку неполярних МРС (див. рис. 1). Таке розсіяння певно зв'язано з малокутовим розсіянням нейтронів на агрегатах наночастинок, що спостерігаються в структурі полярних феррофлюїдів на відміну від неполярних. При аналізі дзеркального відбиття дифузне або недзеркальне розсіяння відіграє роль додаткової фонові компоненти, яку потрібно коректно враховувати. В роботі запропоновано та перевірено методики врахування згаданого розсіяння. Виявлена методика, що дозволяє відокремити дзеркальне розсіяння від дифузного та забезпечити достовірність отриманих структурних параметрів. Саме така методика застосовувалась при подальших дослідженнях рідинних систем на границі з кремнієм.

Важливою проблемою при проведенні рефлектометричних досліджень рідинних систем є вплив гравітаційних сил на їх адсорбційні властивості на межі поділу тверде тіло – рідина. В роботі показано, що розділити вплив адсорбційних

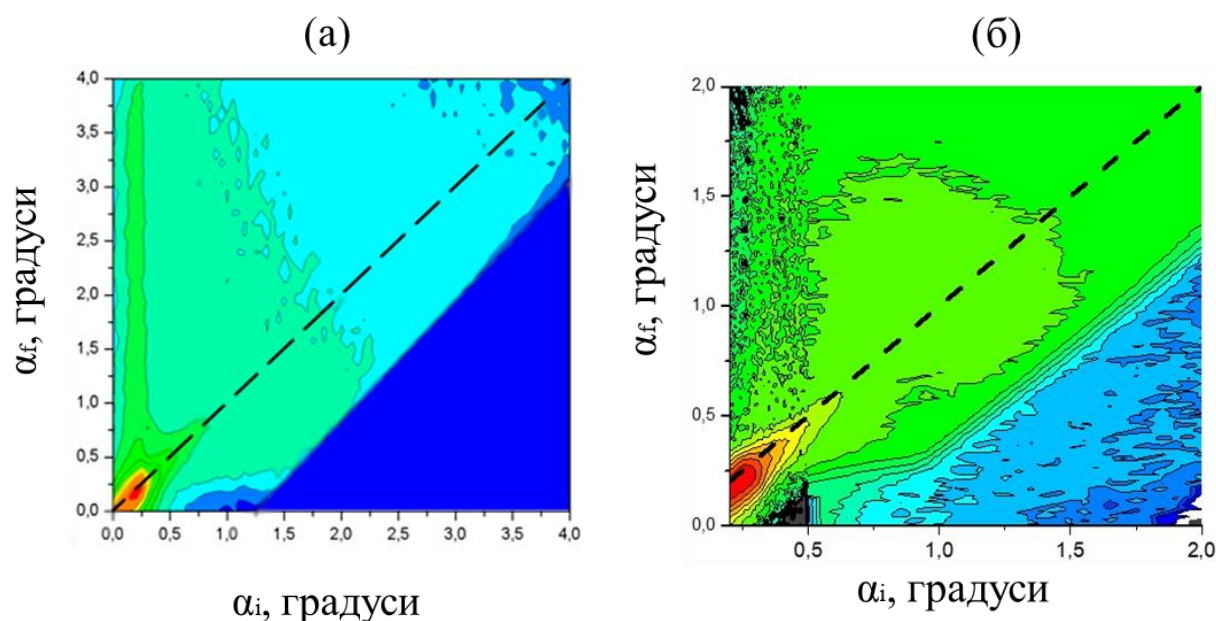


Рис. 1. Карта розсіяння на неполярній (10%) МРС (а) та полярній (водній) (0.8%) МРС (б) на інтерфейсі з кристалічним кремнієм. По осях відкладено кути падіння α_i та відбивання α_f нейтронного пучка. Пунктирні лінії відповідають дзеркальному розсіянню

сил та сил тяжіння можливо шляхом зміни геометрії проведення експерименту. Дійсно, при розміщенні рідинної системи над твердим тілом маємо випадок дії адсорбційних сил в напрямку, що є протилежним дії гравітаційної сили, а при розміщенні її під кристалом – напрямки дії сил співпадають. Знайдено зміну густини довжини розсіяння нейтронів, при чому у випадку кристалу над ферофлюїдом маємо більшу густину довжини розсіяння нейтронів, ніж у випадку кристалу під МРС. Даний факт пояснюється збільшенням концентрації наночастинок магнітної рідинної системи зі збільшенням глибини, на якій знаходиться відповідний шар рідинної системи відносно поверхні системи по напрямку дії гравітаційної сили.

Для дослідження ферофлюїдів на границі з газом було обрано систему з об'ємною часткою магнетиту $\varphi_m = 0.4\%$. Дослідження поверхні МРС на границі з повітрям виконувалось на інструменті NREX (м. Гархінг, Німеччина) з використанням рентгенівського рефлектометра. На рис. 2 представлені експериментальні рефлектометричні криві для поверхні ферофлюїду до випаровування розчинника та після його повного випаровування. З експерименту можна оцінити характерний розмір повторюваної структурної одиниці для рідинної системи після випаровування. Отриманий розмір становить 4 нм, що в два рази менше за середнє значення розміру магнітних частинок у рідинній системі. Це означає, що при випаровуванні розчинника з МРС магнітні частинки упаковуються в шарувату структуру зі щільним пакуванням. Разом з тим, співпадіння положення піків на двох рефлектометричних кривих (див. рис. 2) означає, що під час дослідження поверхні МРС на границі з повітрям весь час відбувається процес випаровування розчинника з приповерхового шару рідинної системи, внаслідок чого збільшується концентрація наночастинок в ньому. Це і призводить до їх агрегування.

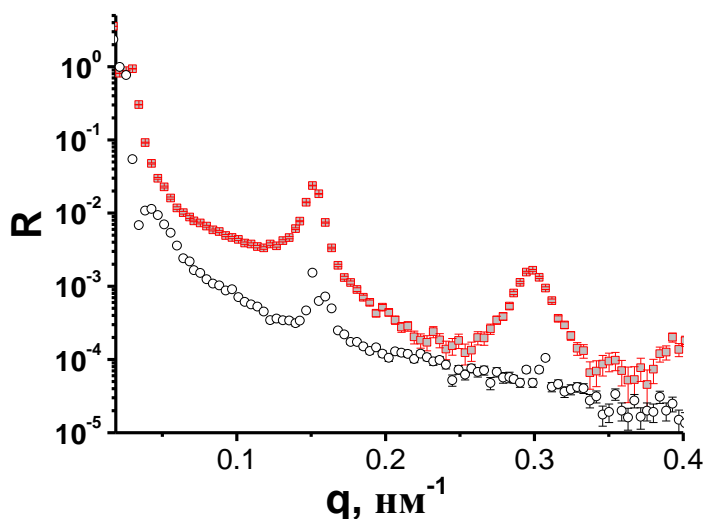


Рис. 2. Експериментальні рентгенівські рефлектометричні залежності для МРС на границі з повітрям до випаровування (○) та після випаровування розчинника (□)

Зрозуміло, що ферофлюїди, в першу чергу, цікаві з точки зору їх застосування при дії зовнішнього магнітного поля, тому наступним кроком при вивченні поверхні МРС на границі з газом було вивчення впливу магнітного поля на структуру приграничного шару. Досліджувались МРС з об'ємною часткою магнетиту $\varphi_m = 0.4\%$ та $\varphi_m = 6.6\%$ у зовнішньому магнітному полі з індукцією 0.01 Тл,

напрямок дії якого був перпендикулярним або паралельним до поверхні рідинної системи (рис. 3). В МРС з меншою концентрацією при перпендикулярному напрямку дії магнітного поля спостерігається додаткова структурна організація магнітних частинок, що відповідає створенню шару магнітних частинок поблизу поверхні. Структура цього шару є складною, тому можна лише оцінити товщину спостережуваного шару, яка становить ~ 7 нм. Виявлений адсорбційний шар, на нашу думку, є шаром магнітних частинок, що утворився на поверхні. У випадку МРС з концентрацією 6.6% додаткова структура не спостерігається. Це пояснюється недостатньою концентрацією мономерів в приграничному шарі, що є наслідком їх агрегації в об'ємі магнітної рідинної системи. З отриманих даних можна зробити висновок стосовно залежності самоорганізації наночастинок МРС на границі з газом як від концентрації наночастинок, так і від напрямку дії зовнішнього магнітного поля. Виявлено, що більш суттєвий вплив на самоорганізацію наночастинок на інтерфейсі ферофлюїду з газом, є при дії магнітного поля перпендикулярно до поверхні МРС, ніж паралельно.

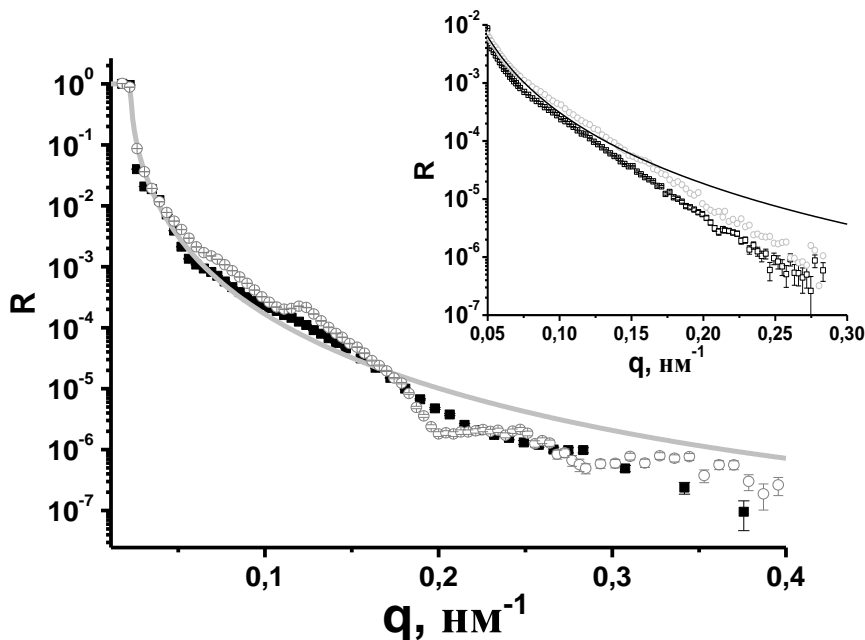


Рис. 3.
Експериментальні дані рентгенівської рефлектометрії поверхні МРС на границі з повітрям з об'ємною часткою магнетиту 0.4% та 6.6% (вставка) при дії магнітного поля паралельно (■) та перпендикулярно (○) до поверхні МРС. Суцільні лінії на графіках відповідають закону Френеля

Було також досліджено вплив зовнішнього магнітного поля, яке діяло перпендикулярно до границі поділу кремній / МРС, для магнітних рідинних систем, які були виготовлені як на органічному розчиннику, так і на воді, з концентраціями $\varphi_m = 10\%$ та $\varphi_m = 0.8\%$ відповідно. Для обох досліджуваних типів МРС не виявлено впливу магнітного поля як на розсіяння, так і на відбиття нейтронів. Для водної МРС спостережуваний результат можна пояснити досить низькою, в порівнянні з аналогічними системами, концентрацією магнітного матеріалу, що гарантує стабільність зразка. При збільшенні концентрації наночастинок до 9% було виявлено упорядкування адсорбованих частинок. У той же час, не виявлено впливу зовнішнього магнітного поля на адсорбцію для концентрованої органічної неполярної МРС (10%). На нашу думку, проведені дослідження свідчать про те, що зміни в структурі об'ємної фази магнітної рідинної системи, які пов'язані з

утворенням ланцюгоподібних або упакованих агрегатів, не впливають на структурну самоорганізацію на границі поділу ферофлюїду з твердим тілом.

Розділ 4 присвячений дослідженню структурної організації магнітних частинок в околі поверхні кремнію. Розглядається вплив типу розчинника, концентрації наночастинок, типу стабілізації МРС та матеріалу магнітної частинки на адсорбційні властивості. Для порівняння впливу розчинника на структурну організацію наночастинок на границі поділу досліджувалась полярна МРС з об'ємною часткою 0.8% магнетиту та неполярна МРС з об'ємною часткою 10% магнетиту, що є стабільними. Отримані рефлектометричні залежності апроксимувались за методом Паррата, в результаті чого були отримані профілі густини довжини розсіяння нейтронів вздовж глибини інтерфейсу. Отримані результати наведені на рис. 4, де вони порівнюються з середніми значеннями густини довжини розсіяння нейтронів для магнітних рідинних систем, що були обчислені в наближенні рівномірного розподілу магнітних частинок за об'ємом зразка. При цьому виявлено два шари з істотно рівними середніми густинами довжини розсіяння. Ці два шари в моделі ядро-оболонка можна розглядати як два підрівні одного шару колоїдних частинок, що адсорбовані на кремнієвій підкладці. Така фізична картина схематично зображена на рис. 5.

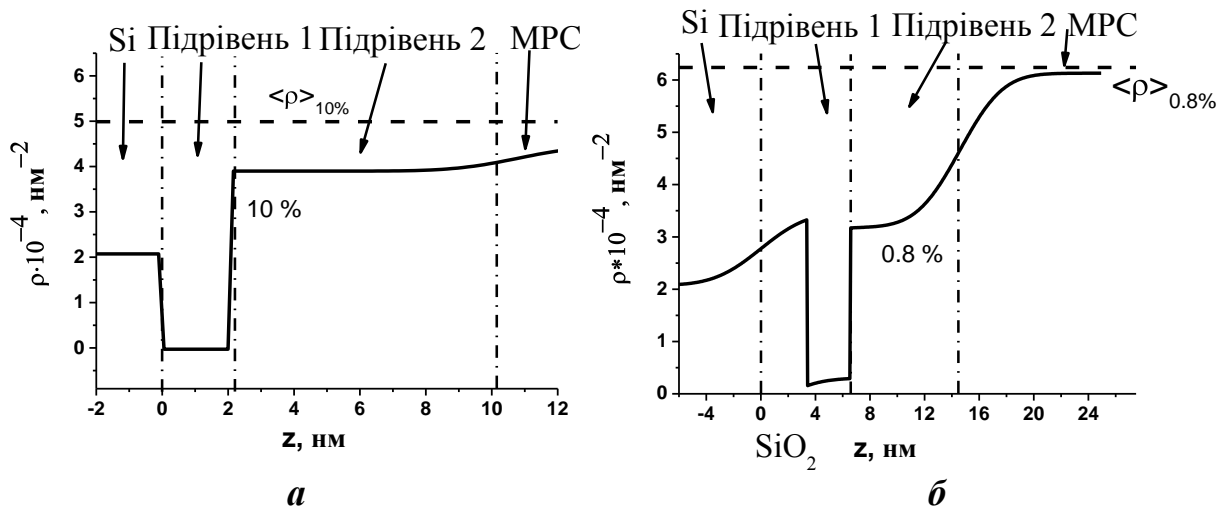


Рис.4. Профілі густини довжини розсіяння нейтронів, які знайдені для неполярної (а) та полярної (б) МРС на границі з кремнієм. Горизонтальні пунктирні лінії відповідають розрахованим значенням густини довжини розсіювання нейтронів в об'ємі рідинних систем в наближенні рівномірного розподілу магнітних частинок

Зазначимо, що як з неполярної, так і з полярної магнітної рідинної системи на поверхню кремнію адсорбується єдиний моношар магнітних наночастинок.

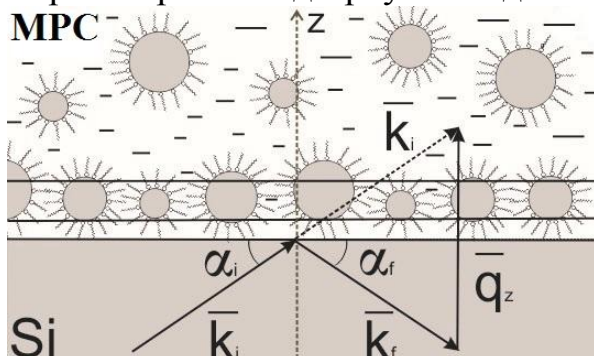


Рис. 5. Схематичне зображення процесу адсорбції магнітних частинок з МРС на границі з кремнієм

Важливим чинником, що характеризує МРС є концентрація магнітних частинок. Тому для знаходження зв'язку між концентрацією магнітних частинок у ферофлюїді та адсорбційними властивостями МРС були отримані рефлектометричні залежності для двох концентрацій магнетиту (2.1% та 3.9%) в полярній та двох концентрацій магнетиту (5% та 10%) в неполярній МРС. Відповідні глибинні профілі густини довжини розсіяння вздовж нормалі до поверхні наведені на рис. 6. Отримані профілі густини довжини розсіяння нейтронів свідчать про існування єдиного адсорбційного шару частинок. Зауважимо, що для водної полярної МРС з більшою концентрацією частинок (3.9 об. %) у експерименті спостерігалися більш чіткі границі між підрівнями. На нашу думку, це свідчить про те, що збільшення концентрації наночастинок призводить до збільшення ступеня заповнення адсорбційного шару магнітними частинками. Для органічної неполярної МРС з концентраціями $\varphi_m = 10\%$ та $\varphi_m = 5\%$ спостерігалась подібна тенденція (рис. 6). Як і у випадку водної МРС, збільшення концентрації призводить до щільнішого заповнення адсорбційного шару. Той факт, що ширина першого підрівня в 5 об. % рідинній системі менша, ніж для 10%, можна пояснити неповним покриттям поверхні кремнію магнітними частинками. Формально це явище необхідно розглядати як проникнення розчинника на перший підрівень.

Аналіз проведених експериментів показує, що адсорбційні властивості полярних та неполярних магнітних рідинних систем подібні. Доведено, що збільшення концентрації магнітних частинок як в полярній, так і в неполярній МРС приводить до більш щільного заповнення адсорбційного шару.

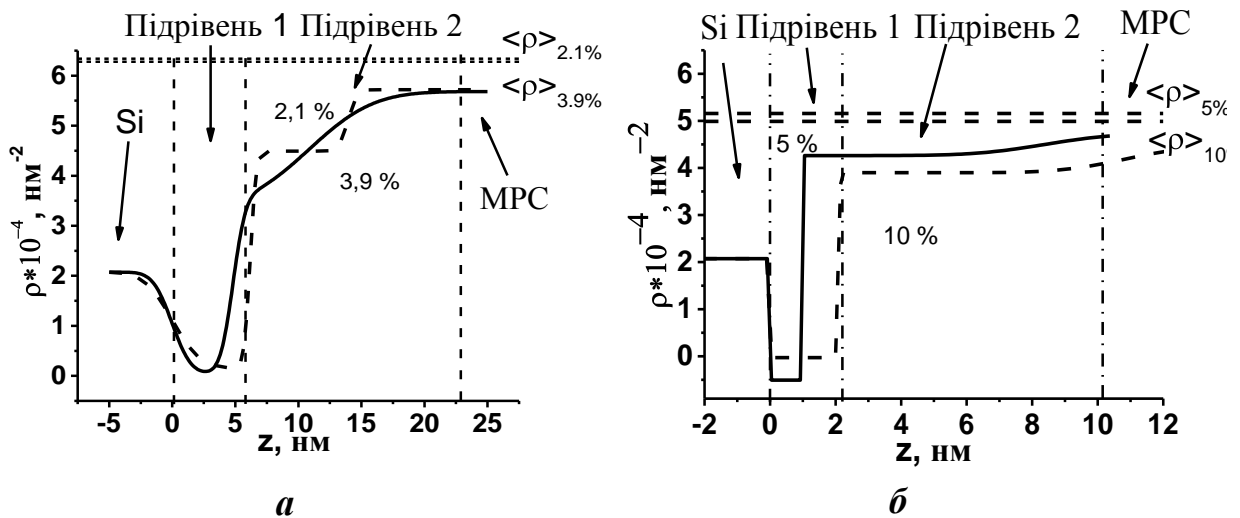


Рис. 6. Глибинні профілі густини довжини розсіяння нейтронів для інтерфейсів кремній / полярна МРС (а) та кремній / неполярна МРС (б) для двох об'ємних часток магнетиту в МРС: $\varphi_m = 2.1\%$ (суцільна лінія), $\varphi_m = 3.9\%$ (пунктирна лінія) в полярній рідинній системі та $\varphi_m = 5\%$ (суцільна лінія), $\varphi_m = 10\%$ (пунктирна лінія) в неполярній рідинній системі. Горизонтальні пунктирні лінії відповідають розрахованому середньому значенню густини довжини розсіяння в об'ємі рідинної системи

Для того, аби вивчити вплив структури об'ємної фази магнітної рідинної системи на її адсорбційні властивості, були проведені експерименти з нейтронної рефлектометрії для двох рідинних систем. Перша з них була виготовлена на основі важкої води з наночастинками наномагнетиту і була стабілізована подвійним шаром олеату натрію. Другий досліджуваний ферофлюїд був виготовлений з першого шляхом додавання до нього поліетиленгліколя (ПЕГ). Об'ємна структура МРС досліджувалася за допомогою малокутового розсіяння нейтронів. Вимірювання були виконані на малокутовому інструменті Yellow Submarine на стаціонарному реакторі ВВР-М Будапештського нейтронного центру (м. Будапешт, Угорщина). При цьому розсіювання на немодифікованій МРС відповідало розсіюванню на частинках з радіусом інерції $R_g = 17$ нм, що відображається за малих значень модуля вектору переданого імпульсу в існуванні так званого Гіньє режиму. Знайдений радіус частинок перевищує очікуваний для випадку окремих частинок, тому слід визнати, що в немодифікованій МРС існує певна частина компактних і структурно стабільних агрегатів. У водній МРС після модифікації за допомогою ПЕГ ступінь агрегації збільшується, що впливає на криву малокутового розсіяння нейтронів. Зауважимо, що до низьких значень q інтенсивність розсіяння нейтронів має степеневу поведінку $I(q) \sim q^{-2.7}$. Це вказує на фрактальний тип організації агрегатів з масовою фрактальною розмірністю $D = 2.7$. Так, як розмір агрегатів знаходиться за межами роздільної здатності приладу, то розмір агрегатів можна лише оцінити. Оцінка дає $L \sim 30$ нм.

Рефлектометричні криві для модифікованої ПЕГ рідинної системи адекватно описуються відомим законом Френеля, тобто за допомогою моделі двох нескінченних однорідних середовищ. Це означає, що не існує адсорбції на поверхню кремнію з модифікованого поліетиленгліколем ферофлюїду. Разом з тим, для немодифікованої МРС спостерігається адсорбційний шар.

На рис. 7 зображено об'ємну структуру немодифікованої магнітної системи на основі води та об'ємну структуру її модифікації, проведеної за допомогою поліетиленгліколю, що була отримана за допомогою малокутового розсіяння нейтронів. Аналіз рис. 7 показує, що в немодифікованому варіанті існують як поодинокі наночастинки, так і їх агрегати.

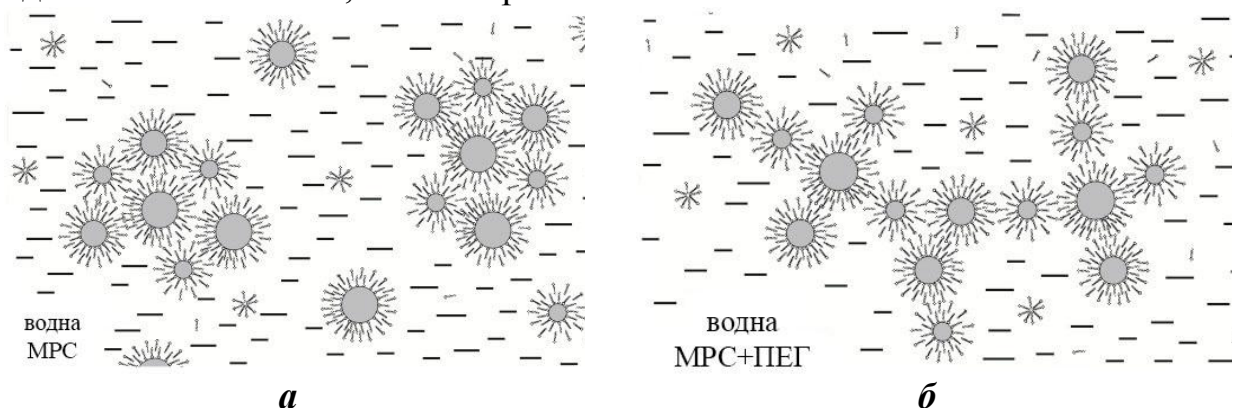


Рис. 7. Об'ємна структура немодифікованих (а) та модифікованих (б) ферофлюїдів, яка отримана за допомогою малокутового розсіяння нейтронів

На рис. 8 зображено структуру немодифікованої магнітної системи на основі води та її структуру у випадку модифікації поліетиленгліколем, що була знайдена

за допомогою нейтронної рефлектометрії. Як бачимо, на границі ферофлюїд-кремній у випадку немодифікованої магнітної рідинної системи існує адсорбційний шар, який складається з окремих наночастинок, в той час як у випадку цієї модифікованої магнітної рідинної системи цей шар відсутній.

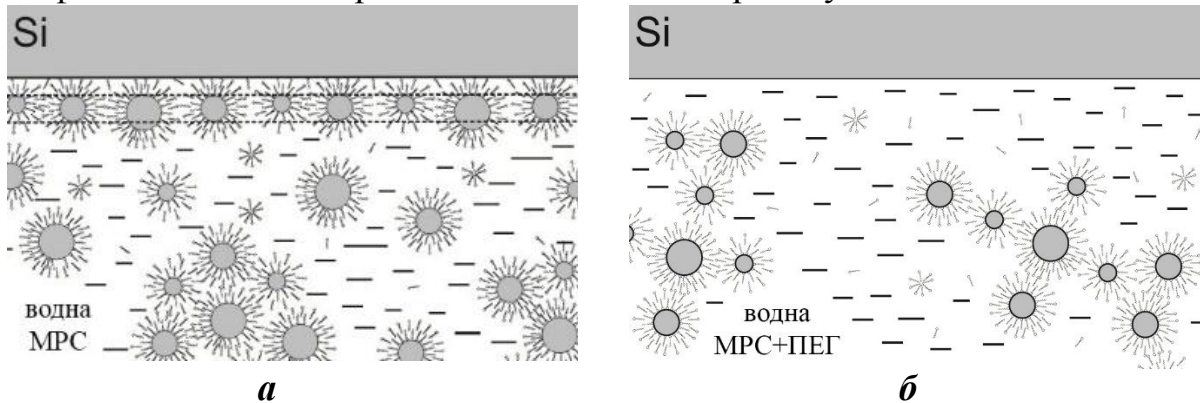


Рис. 8. Структура немодифікованих (а) та модифікованих (б) ферофлюїдів на границі поділу з кремнієм за даними нейтронної рефлектометрії

Порівняння структури в об'ємі та на інтерфейсах тверде тіло / рідинна система дозволяє зробити висновок про наявність кореляції між об'ємною структурою MPC і адсорбційними властивостями інтерфейсу. Таким чином, взаємодія між гідрофільним шаром оксиду кремнію на поверхні кремнію і поодинокими наночастинками водної MPC приводить до утворення одного адсорбційного шару з магнітних наночастинок. Після модифікації поліетиленгліколем досліджуваної магнітної рідинної системи вказаний адсорбційний шар відсутній. На нашу думку, це зв'язано з тим, що в модифікованій MPC, у порівнянні з немодифікованою MPC, всі наночастинки агрегують і утворюють новий вид розвинених кластерів. При цьому процес агрегації розповсюджується на всі вільні частинки, відсутність яких не дозволяє формуванню адсорбційного шару.

Для аналізу впливу магнітної компоненти рідинної системи на її адсорбційні властивості досліджена MPC, що синтезована на основі H_2O з наночастинками фериту кобальту з концентрацією наночастинок $\varphi_m \sim 3\%$, які оточені стабілізаційним шаром, що складався з лауринової кислоти та натрій н-додецилсульфату.

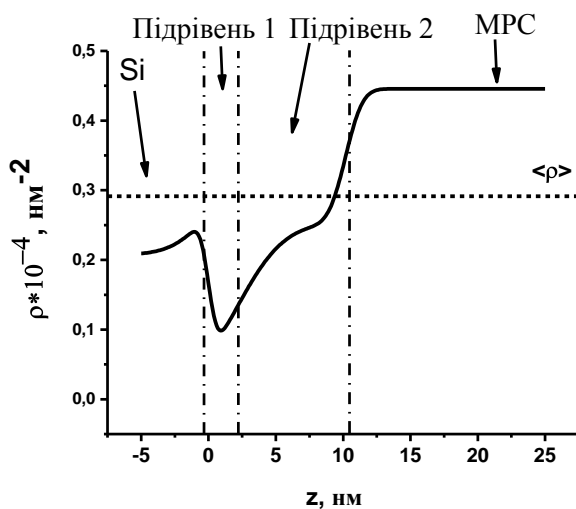


Рис. 9. Профіль довжини густини розсіяння нейтронів на границі кремній-магнітна рідинна система, що синтезована на основі води з наночастинками фериту кобальта, які вкриті стабілізаційним шаром лауринової кислоти, а потім ще шаром натрій н-додецилсульфату

Для дослідження адсорбції в даному ферофлюїді використовувався аналіз коефіцієнту відбиття після додавання до МРС $D_2O \sim 50\%$. За такого контрасту створюється умова для повного відбивання нейтронів. Глибинний профіль густини довжини розсіяння нейтронів, що найбільше відповідає експериментальним рефлектометричним даним, наведено на рис. 9. Для апроксимації результатів була використана двошарова модель. У цьому експерименті виявлено, що перший підрівень моношару складається з поверхнево-активної речовини. Другий – з наночастинок, які покриті ПАР з неповною упаковкою. Цей підрівень має велику шорсткість. Отриманий результат корелює з відповідним дослідженням об'ємної структури рідинної системи. Магнітні наночастинки мають еліпсоїдну форму з середнім розміром $d \approx 8$ нм, який відповідає товщині адсорбційного шару. Що стосується шорсткості другого підрівня, то вона може бути пояснена розорієнтуванням наночастинок-еліпсоїдів. Аналіз рис. 9 показує, що структура досліджуваної МРС з феритом кобальту на границі поділу з кремнієм подібна до структури МРС, в якій магнітною компонентою є магнетит. Така подібність дозволяє зробити висновок, що адсорбційні властивості різних магнітних систем подібні, якщо вони мають рівну магнітну складову, але при цьому зберігаються всі інші компоненти МРС.

У роботі проведено дослідження самоорганізації наночастинок на поверхні кремнію для трьох магнітних рідинних системи з різною стабілізацією. При цьому, в першій рідинній системі магнітні наночастинки були покриті подвійним стабілізаційним шаром з олеату натрію. Друга рідинна система мала подвійний стабілізаційний шар, але на відміну від першої МРС, з олеату натрію складався лише перший шар, а другий – з олеїнової кислоти. Третя МРС мала іонний тип стабілізації. Як магнітний компонент у всіх трьох МРС використовувався магнетит. Для вказаних МРС було проведено рефлектометричне дослідження їх структури на границі поділу з твердим тілом. Апроксимація результатів виконувалась з використанням двошарової моделі для стеричної стабілізації та одношарової моделі у випадку іонної стабілізації. Отримані внаслідок апроксимації експериментальних даних глибинні профілі густини довжини розсіяння нейтронів наведені на рис. 10.

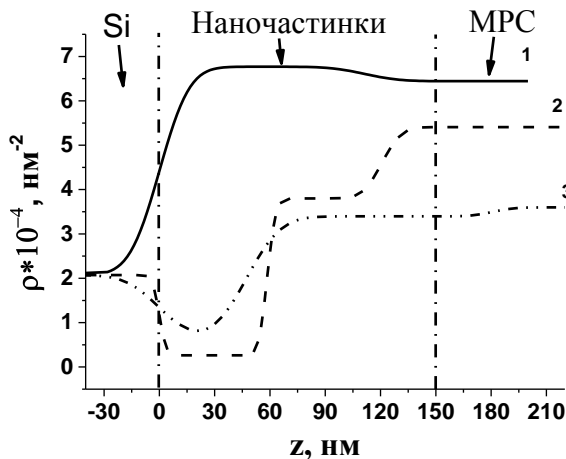


Рис. 10. Профілі густини довжини розсіяння нейтронів для магнітних систем зі стабілізацією: 1 – іонною, 2 – стеричною з подвійним шаром олеату натрію, 3 – стеричною з шаром олеату натрію та шаром олеїнової кислоти

Аналіз рис. 10 показує, що для магнітних рідинних систем зі стеричною стабілізацією спостерігається подібна до попередніх результатів структурна організація біля границі поділу. Разом з тим, для рідинної системи, в якій магнітна наночастинка оточена оболонкою з олеату натрію, маємо два шари. Перший шар відповідає шару ПАР з проникненням розчинника. У зв'язку з тим, що досліджувана рідинна система має малу концентрацію ПАР, адсорбційний шар покриває не всю поверхню кремнію. Це підтверджують знайдені внаслідок апроксимації параметри другого шару він є незаповненим шаром наночастинок.

Для магнітної рідинної системи, подвійним стабілізуючим шаром якої є шар з олеату натрію та шар з олеїнової кислоти, маємо щільніше заповнений адсорбційний шар наночастинок. Проведений експеримент показує, що за меншої концентрації вільних молекул ПАР перший шар має більшу густину довжини розсіяння аніж розрахованої для ПАР (див. рис. 10). Це свідчить про більшу ступінь проникнення розчинника в перший шар.

Для магнітної рідинної системи з іонною стабілізацією було знайдено адсорбцію частинок магнетиту на поверхні кремнію. За такої стабілізації навколо магнетиту стабілізаційна оболонка не існує, тому на кремній адсорбуються самі магнітні наночастинки. За даними нейтронного експерименту, густина довжини розсіяння в адсорбційному шарі збігається з розрахованою густиною довжини розсіяння нейтронів для магнетиту. З цього випливає, що при іонній стабілізації адсорбційний шар повністю заповнений частинками магнетиту. Оцінка товщини шару в цьому випадку складає 10 нм і збігається із середнім розміром наночастинок магнетиту, що свідчить про наявність єдиного адсорбційного шару магнітних наночастинок.

Отримані дані для МРС з різним типом стабілізації дозволяють говорити про певну подібність у організації магнітних наночастинок на границі ферофлюїду з кремнієм. У всіх трьох випадках отримуємо єдиний адсорбційний шар. Разом з тим, зміну параметрів шару, що адсорбується, не можна однозначно пов'язати з використанням того, чи іншого типу стабілізації, так як при зміні характеру стабілізації змінюється і структурна організація частинок в об'ємі.

ВИСНОВКИ

1. Методами нейтронної та рентгенівської рефлектометрії досліджена структура адсорбційних наносхарів на границях поділу магнітної рідинної системи з кремнієм та з повітрям. З аналізу рефлектометричних даних отримані довжини густин розсіяння нейтронів та інші характеристики інтерфейсу.
2. Знайдено, що на границі поділу з кремнієм як полярних, так і неполярних ферофлюїдів утворюється моношар, який складається з поодиноких магнітних наночастинок. Агрегати, які в цей час знаходяться в об'ємі магнітної рідинної системи, на границі поділу не спостерігаються.
3. Досліджено вплив концентрації магнітних наночастинок в магнітних рідинних системах на характеристики адсорбційного шару на границі поділу ферофлюїд-тверде тіло. Показано, що збільшення концентрації магнітних наночастинок в об'ємі як полярних, так і неполярних ферофлюїдів аж до границі їх стабільності приводить до збільшення щільності їх адсорбційного шару.

4. Досліджено вплив зовнішнього магнітного поля на самоорганізацію наночастинок на границі поділу ферофлюїд-кремній. Доведено, що за концентрації наночастинок 0.8 об. % в магнітних рідинних системах вплив зовнішнього магнітного поля до 500 ерстед на структуру адсорбційного шару на поверхні кремнію відсутній.
5. Методами нейтронної рефлектометрії та малокутового розсіяння нейтронів показано, що модифікація магнітних рідинних систем за допомогою поліетиленгліколю приводить до утворення в об'ємі ферофлюїдів розгалужених агрегатів з фрактальною розмірністю 2.7, в той час як на границі поділу цих систем з кремнієм адсорбційний шар не утворюється.
6. Досліджено вплив хімічного складу магнітних наночастинок на адсорбцію на границі поділу ферофлюїду з кремнієм. Доведено, що зміна хімічного складу магнітних наночастинок при збереженні інших характеристик магнітної рідинної системи не змінює їх адсорбційні властивості.
7. Досліджено вплив типу стабілізації ферофлюїду на інтерфейс ферофлюїд-тверде тіло. Показано, що для різних типів стабілізації магнітних рідинних систем існує певна подібність в організації магнітних частинок на границі з кремнієм.
8. Знайдена шарувата структура, що утворена магнітними частинками, з періодом 4 нм на границі поділу ферофлюїдів з повітрям, яка пов'язана з випаровуванням рідинної основи магнітної системи.
9. Показано, що зміна структури приповерхневого шару на границі магнітної рідинної системи з повітрям, яка відбувається під дією прикладеного магнітного поля, залежить від концентрації магнітних частинок у ферофлюїді.
10. Знайдено, що вплив магнітного поля, яке прикладене перпендикулярно до поверхні ферофлюїду, на інтерфейс магнітна рідинна система-повітря більш суттєвий, ніж при паралельній орієнтації поля.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. On the adsorption properties of magnetic fluids: impact of bulk structure / M. Kubovcikova, V. Zavisova, **I.V. Gapon**, V.I. Petrenko, O. Soltwedel, L. Almasy, M.V. Avdeev, P. Kopcansky // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016. – V.427. – P. 67-70.
2. Consideration of diffuse scattering in the analysis of specular neutron reflection at the magnetic fluid-silicon interface / **I.V Gapon**, V.I. Petrenko, M.V. Avdeev, L.A. Bulavin, Yu.N. Khaydukov, O. Soltwedel, V. Zavisova, I. Antal, P. Kopcansky // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2015. – V. 9, Iss. 2. – P. 320-325.
3. Comparative structure analysis of magnetic fluids at interface with silicon by neutron reflectometry / M.V. Avdeev, V.I. Petrenko, **I.V. Gapon**, L.A. Bulavin, A.A. Vorobiev, O. Soltwedel, M. Balasoiu, L. Vekas, V. Zavisova, P. Kopcansky // Applied Surface Science. – 2015 – V. 352. – P. 49–53.
4. Нейтронные исследования феррожидкостей / М.В. Авдеев, В.И. Петренко, А.В. Феоктистов, **И.В. Гапон**, В.Л. Аксенов, Л. Векаш, П. Копчанский // Укр. фіз. журн. – 2015 –Т. 60 – С. 728-736.

5. Structure analysis of aqueous ferrofluids at interface with silicon: neutron reflectometry data / **I.V. Gapon**, V.I. Petrenko, L.A. Bulavin, M. Balasoïu, M. Kubovcikova, V. Zavisova, M. Koneracka, P. Kopcansky, M.V. Avdeev // Journal of Physics: Conf. Series. – 2017 – V. 848 – P. 012015 (5).
6. Structure stability of magnetic fluids in bulk and interfaces: combined analysis of small-angle neutron scattering and neutron reflectometry / **I.V. Gapon**, V.I. Petrenko, L.A. Bulavin, A.A. Vorobiev, O. Soltwedel, M. Balasoïu, L. Vekas, V. Zavisova, P. Kopcansky, M.V. Avdeev // III Intern. Conf. on «Small angle neutron scattering». – Dubna. – June 6-9, 2016. – P. 100.
7. Subtraction of diffuse scattering in analysis of specular neutron reflection at the interface magnetic fluids silicon/ **I.V. Gapon**, V.I. Petrenko, M.V. Avdeev, L.A. Bulavin, Yu.N. Khaedukov, O. Soltwedel, V. Zavisova, P. Kopcansky // The Intern. Conf. «Physics of liquid matter: modern problems (PLMMP-2016)». – Kyiv, Ukraine. – May 27-30, 2016. – С. 163.
8. Исследование магнитных жидкостей на рефлектометре ГРЕИНС реактора ИБР-2 / И.В. Гапон, В.И. Петренко, М.В. Авдеев, Л.А. Булавин // 50-я Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния. – С-Пб. – 14-19.03.2016. – С. 26.
9. Comparative structure analysis of magnetic fluids at interfaces by neutron and x-ray reflectometry / **I.V. Gapon**, M.V. Avdeev, V.I. Petrenko, L.A. Bulavin, A.A. Vorobiev, O. Soltwedel, M. Balasoïu, L. Vekas, V. Zavisova, P. Kopcansky // Book of Abstracts «Multifunctional nanoparticles, magnetically controllable fluids, complex flows, engineering and biomedical applications». – Timisoara, Romania – June 25-26, 2015 – P. 11.
10. Reflectometry studies of the structure and stability of ferrofluids at the solid-liquid and air-liquid interfaces / **I.V. Gapon**, V.I. Petrenko, M.V. Avdeev, L.A. Bulavin, O. Soltwedel, M. Balasoïu, L. Vekas, V. Zavisova, P. Kopcansky // Book of Abstracts: WORKSHOP on Condensed matter research by means of neutron scattering methods. – Constanta, Romania – July 4-7, 2015 – P. 22.
11. Recent results from the GRAINS reflectometer at IBR-2 reactor / M.V. Avdeev, **I.V. Gapon**, V.I. Petrenko, L.A. Bulavin, O.V. Tomchuk, A.V. Nagornyi, V.I. Bodnarchuk // 15th International Balkan Workshop on Applied Physics. – Constanta, Romania– July 2-4, 2015 – P. 53.
12. Структурные особенности водных феррофлюидов по данным нейтронной рефлектометрии / **И.В. Гапон** // XIX межд. научн. конф. молодых ученых и специалистов (ОМУС-2015) к 100-летию Ф.Л. Шапиро. – Дубна – 16-20.02.2015 – С. 86.
13. Влияние структурных параметров наночастиц на адсорбционные свойства магнитных жидкостей на границе раздела с твердым телом / **И.В. Гапон**, В.И. Петренко, Л.А. Булавин, М.В. Авдеев // XLIX Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния – С-Пб – 16-21 марта 2015 – С. 21.
14. Structure of magnetic fluids at interface with silicon investigated by neutron and X-ray reflectometry / **I.V. Gapon**, P. Kopcansky, O. Soltwedel, M.V. Avdeev, L.A. Bulavin, V.I. Petrenko // International Conference Condensed Matter Research at the IBR-2 –Dubna. – October 11-15, 2015 –С. 127.
15. Subtracting diffuse scattering in analysing specular neutron reflection at the ferrofluids/silicon interface / **I.V. Gapon**, M.V. Avdeev, V.I. Petrenko L.A. Bulavin,

Yu.N. Khaydukov, O. Soltwedel, V. Zavisova, P. Kopcansky // Book of Abstracts: Central European Training School on Neutron Techniques 2014 (CETS-2014) – Budapest, Hungary. – May 19-23, 2014. – P. 6.

16. Structure of water magnetic fluids at the interface with silicon by neutron reflectometry / **I.V. Gapon**, L.A. Bulavin, V.I. Petrenko, P. Kopcansky, O. Soltwedel, M.V. Avdeev // Intern. Conf. Condensed Matter Research at the IBR-2 – Dubna. – June 24-27, 2014. – P. 15.

17. Учет диффузного рассеяния при исследовании жидкостных наносистем / И.В. Гапон // XVIII Междунар. научная конференция молодых ученых и специалистов (ОМУС-2014) к 105-летию Н.Н. Боголюбова. – Дубна. – 24-28.02.2014. – С. 74.

18. Effect of poly(ethyleneglycol) on the structure of water-based magnetic fluids at the interface with silicon by neutron reflectometry / **I.V. Gapon**, L.A. Bulavin, M.V. Avdeev, V.I. Petrenko, P. Kopcansky, M. Koneracka, V. Zavisova, V.L. Aksenov // Book of Abstracts BIOFC 2013. – Kosice, Slovakia. – August 26-28, 2013 – P. 12.

19. Влияние структурных параметров наночастиц на адсорбционные свойства магнитных жидкостей на границе раздела с твердым телом / **И.В. Гапон**, М.В. Авдеев, Л.А. Булавин, В.И. Петренко, А.В. Нагорный, L. Vecas, А.А. Воробьев, В.Л. Аксенов // XLVII Школа ПИЯФ по физике конденсированного состояния. – С-Пб. – 11-16 марта 2013 – С. 108.

АНОТАЦІЯ

Гапон І.В. Структура магнітних рідинних систем на границі поділу з твердим тілом. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико–математичних наук за спеціальністю 01.04.14 – теплофізика та молекулярна фізика. – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, 2017.

Дисертація присвячена дослідженню структури магнітних рідинних систем на границі поділу з твердим тілом. Основна увага приділяється виявленню взаємозв'язку між параметрами магнітної рідинної системи та її адсорбційними властивостями. Досліджено структуру адсорбційних наночастинок на границі МРС-кремній для полярної та неполярної МРС. Показано, що як для полярних, так і неполярних МРС на границі поділу МРС-кремній утворюється моношар, який складається з поодиноких магнітних частинок, а не їх агрегатів. Досліджено зміну структурних параметрів адсорбційного шару зі зміною концентрації магнітних частинок. Показано існування зв'язку між об'ємною структурою та адсорбційними властивостями модифікованої поліетиленгліколем МРС. Доведено, що зміна хімічного складу магнітної рідинної системи або її типу стабілізації не змінює адсорбційних властивостей. Показано вплив зовнішнього магнітного поля на організацію частинок в околі границь поділу МРС-повітря та МРС- кремній.

Ключові слова: магнітні рідинні системи, малокутове розсіяння нейтронів, нейтронна рефлектометрія, адсорбція, рідинна система, ферофлюїд.

АННОТАЦИЯ

Гапон И.В. Структура магнитных жидкостных систем на границе раздела с твердым телом. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико–математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и молекулярная физика. – Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, 2017.

Диссертация посвящена исследованию структуры магнитных жидкостных систем на границе раздела с твердым телом. Магнитные жидкостные системы (МЖС), или феррофлюиды - это такие коллоидные системы, состоящие из жидкой основы, в которую включены магнитные полидисперсные частицы с характерным размером нескольких нанометров. Каждая магнитная частица в системе покрывается слоем поверхностно-активных веществ, которые не дают частицам контактировать между собой и объединяться в агрегаты. Магнитные жидкостные системы широко применяются в различных областях, в частности имеют высокую перспективу использования в медицине.

Для проведения исследования структурной организации частиц на границе раздела с твердым телом при помощи нейтронной рефлектометрии была разработана специальная ячейка. С ее помощью было исследовано структуру адсорбционных нанослоев на границе МЖС-кремний для полярной и неполярной МЖС. Было показано, что как для полярных, так и неполярных МЖС на границе раздела МЖС-кремний образуется монослой, который состоит из отдельных магнитных частиц, а не с их агрегатов.

Проведен ряд рефлектометрических экспериментов по влиянию концентрации магнитных наночастиц на адсорбционные свойства для полярной и неполярной магнитной жидкостной системы. Анализ данных экспериментов показывает, что адсорбционные свойства полярных и неполярных магнитных жидкостных систем подобные. Доказано, что увеличение концентрации магнитных частиц, как полярной, так и неполярной МЖС приводит к большему заполнению адсорбционного слоя.

Из сравнения структуры в объеме и на интерфейсах твердое тело / жидкостная система можно сделать вывод о четкой корреляции между объемной структурой МЖС и адсорбционными свойствами интерфейса. Таким образом, взаимодействие между гидрофильным слоем оксида кремния на поверхности кремния и одиночными наночастицами водной МЖС приводит к образованию одного адсорбционного слоя магнитных наночастиц. После модификации, исследуемой магнитной жидкостной системы полиэтиленгликолем, указанный адсорбционный слой отсутствует. Этот факт объясняется тем, что в модифицированной МЖС по сравнению с немодифицированной МЖС все частицы агрегируют и образуют новый вид развитых кластеров. При этом процесс агрегации захватывает все свободные частицы, отсутствие которых препятствует формированию адсорбционного слоя.

Исследование адсорбции МЖС с частицами из феррита кобальту на границе раздела с кремнием, показало наличие структурной организации частиц, подобной организации частиц МЖС с магнитной компонентой магнетитом. Такое сходство позволяет сделать вывод, что адсорбционные свойства различных магнитных систем подобные, несмотря на то, что они имеют различную магнитную составляющую, но при этом сохранены все другие свойства МЖС.

Полученные данные для МЖС с различным типом стабилизации позволяют говорить о определенном сходстве в организации магнитных частиц на границе с кремнием. Было проверено адсорбцию магнитных частиц с МЖС на поверхность кремния для трех используемых стабилизаций: стерическая с двойным слоем олеата натрия, стерическая со слоем олеата натрия покрытым слоем олеиновой кислоты та электростатическая стабилизация. Во всех трех случаях получаем единственный адсорбционный слой. Вместе с тем, изменение параметров адсорбируемого слоя, нельзя связывать с использованием того или иного типа стабилизации, так как при изменении ее характера меняется и структурная организация частиц в объеме.

Ключевые слова: магнитные жидкостные системы, малоугловое рассеяние нейтронов, нейтронная рефлектометрия, адсорбция, жидкостная система, феррофлюид.

SUMMARY

Gapon I.V. The structure of the magnetic liquid at interface with solids. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Philosophy degree (Candidate of Science in Physics and Mathematics) by specialty 01.04.14 - thermophysics and molecular physics. - Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, 2017.

This research focuses on the structure of the magnetic fluid at interface with solids. Main attention was paid to identify the relationship between parameters of magnetic liquid system (MFS) and its adsorption properties. The structure of adsorbed nanolayers on the border MFS-silicon for polar and nonpolar MFS. It is shown that both polar and nonpolar MFS at interface MFS-silicon division formed a monolayer composed of single magnetic particles. The change of structural parameters of the adsorbed layer from the concentration of magnetic particles. Showing the relationship between three-dimensional structure and adsorption properties of the modified polyethylene MFS. Studied that the chemical composition of the magnetic liquid system or type of stabilization does not change the adsorption properties. The influence of an external magnetic field to organize the particles in the vicinity of the free surface and the silicon surface.

Keywords: magnetic liquid system, small angle neutron scattering, neutron reflectometry, adsorption, liquid system, ferrofluid.