

НЕЙТРОННІ ТА ТЕРМОДИНАМІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНИХ РІДИННИХ СИСТЕМ, СТАБІЛІЗОВАНИХ МОНОКАРБОНОВИМИ КИСЛОТАМИ

А. В. Нагорний^{1,2}, В. І. Петренко^{1,2}, Л. А. Булавін², Л. Альмаші³, В. І. Ковальчук²,
К. О. Мороз², С. П. Недяк²

¹Об'єднаний інститут ядерних досліджень, Дубна, Росія,

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
фізичний факультет, Київ, Україна,

³Інститут твердого тіла та оптики, Фізичний дослідницький центр Вігнера АН Угорщини
(Отримано 19 грудня 2013 р.; в остаточному вигляді — 02 вересня 2014 р.)

У статті подано результати нейтронних та термодинамічних досліджень магнітних рідинних систем, стабілізованих різними монокарбонowymi кислотами. У результаті нейтронних досліджень встановлено, що в досліджуваному діапазоні концентрацій молекул олеїнової та міристинової кислот агрегація в рідинній системі не відбувається. Показано, що за наявності магнітних частинок у рідинній системі сила притягання між молекулами поверхнево-активної речовини зменшується.

Проаналізовано P - V - T дані, а саме: баричні та температурні залежності густини, ізобаричний коефіцієнт теплового розширення, ізотермічний приріст ентропії, для ферофлюїду магнетит-лауринова кислота-вода. Отримані експериментальні дані описано за допомогою напівемпіричного рівняння стану Тейта-Таммана. Встановлено, що досліджений ферофлюїд має істотно менший коефіцієнт теплового розширення порівняно з водою, що пояснюється зміною енергії міжчастинкової взаємодії й перебудовою структури води при додаванні до неї магнітних частинок та поверхнево-активної речовини.

Ключові слова: ферофлюїди, монокарбонowymi кислоти, метод малокутового розсіяння нейтронів, P - V - T метод, рівняння Тейта-Таммана.

PACS number(s): 47.65.Cb, 61.12.Ex, 65.40.Gr

I. ВСТУП

Магнітними рідинними системами (МРС), або ферофлюїдами, називаються колоїдні суспензії магнітних частинок із розміром близько 10 нм, які можуть бути стабілізованими за допомогою поверхнево-активних речовин (ПАР). Як ПАР зазвичай використовують монокарбонowymi кислоти (лауринова, міристинова, олеїнова тощо). Розмір частинок МРС визначає їх однодомений стан і робить такі системи чутливими до зовнішнього магнітного поля. Дослідження структури та фізичних властивостей МРС має як фундаментальне, так і прикладне значення [1–5]. На сьогодні існують МРС із широким спектром властивостей, які створені на основі води, вуглеводнів, рідких металів [6–11]. МРС широко застосовуються у техніці. Вони перспективні також для використання в медицині.

Взаємодія між частинками в МРС регулюється за допомогою зміни фізичних властивостей стабілізуючих шарів ПАР, що вкривають магнітні частинки. Стійкість до агрегації в МРС головно визначається взаємодією ПАР із рідинною основою системи, тому одним із найважливіших факторів, що впливає на стабільність МРС, є концентрація молекул ПАР у рідинній системі. У процесі виготовлення ферофлюїдів добирається оптимальне значення концентрації ПАР, при якій спостерігається найбільша стійкість колоїдної системи до агрегації. Фізичні властивості МРС зу-

мовлені її мікроскопічною будовою, яка своєю чергою залежить від густини системи [12]. Зміна тиску в МРС дає змогу регулювати густину системи й у такий спосіб досліджувати її термодинамічні властивості.

II. МАЛОКУТОВЕ РОЗСІЯННЯ НЕЙТРОНІВ НА ФЕРОФЛЮЇДАХ

МРС магнетит-олеїнова кислота-декалін та магнетит-міристинова кислота-декалін із умістом магнітного матеріалу 7% (за об'ємом), а також хімічно чисті олеїнову та міристинову кислоти надали Центр фундаментальних та прикладних технічних досліджень, відділ Тимішоари Академії наук Румунії. При синтезі магнітних рідинних систем цього типу практично всі молекули ПАР, що є в рідинній системі, адсорбуються на поверхні магнітних наночастинок, тобто концентрація вільної неадсорбованої ПАР в об'ємі МРС є малою величиною [13,14]. Приготування для нейтронного експерименту [15] зразків із надлишком ПАР відбувалося додаванням до вихідної МРС певної кількості кислоти-стабілізатора та дейтерованого декаліну (D-декаліну, $C_{18}D_{20}$) в такий спосіб, аби вміст D-декаліну в рідинній основі становив $\sim 90\%$. У результаті приготування об'ємні концентрації ПАР у розчинах в декаліні становили $(5 \div 30)\%$ для олеїнової кислоти та $(3 \div 10)\%$ для міристинової кислоти. З метою уникнення впливу структурного

фактора (фур'є-образ парної кореляційної функції, яка описує міжчастинкові кореляції) на результатах малокутового розсіяння нейтронів, концентрація магнітного матеріалу в усіх досліджених зразках була незначною і становила 0.75% об.

Експерименти з малокутового розсіяння нейтронів

були виконані на установці SANS-II Лабораторії нейтронного розсіяння Інституту Пауля Шеррера, м. Філіген, Швейцарія. Отримані спектри малокутового розсіяння нейтронів апроксимувалися за допомогою виразу [16]

$$I(q) = I(0) \frac{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} Dn(r) [V(r)F(qr) + \eta V(r + \delta)F(q(r + \delta))]^2 dr}{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} Dn(r) [V(r) + \eta V(r + \delta)]^2 dr} + I_S(0) \exp(-q^2 R_g^2/3) + I_{\text{bkg}}, \quad (1)$$

де перший доданок є інтенсивністю розсіяння на магнітних частинках ферофлюїду, $I(0) = n(\rho_0 - \rho_1)^2(V^2)$ – інтенсивність розсіяння в нульовий кут, n – концентрація магнітних частинок, параметр $\eta = (\rho_1 - \rho_S)/(\rho_0 - \rho_1)$ визначається густиною довжини розсіяння магнітного ядра (ρ_0), оболонки ПАР (ρ_1) і рідинного середовища (ρ_S); $V(r) = (4/3)\pi r^3$ – об'єм сфери радіуса r , δ – ефективна товщина стабілізаційної оболонки ПАР; $F(qr) = 3(\sin(qr) - qr \cos(qr))/(qr)^3$ – формфактор сфери радіуса r ; $Dn(r) = \exp(-\ln^2(r/R_0)/(2S^2))/(Sr\sqrt{2\pi})$ – функція логнормального розподілу за розмірами з характерним радіусом R_0 і стандартним відхиленням S ; R_{\min} і R_{\max} – мінімальний і максимальний розміри магнітних частинок у рідині; другий доданок у (1) відповідає розсіянню на вільних (неадсорбованих) молекулах ПАР у системі, $I_S(0)$ – інтенсивність розсіяння в нульовий кут у випадку вільних молекул кислоти в рідині; R_g – радіус інерції молекули ПАР в декаліні; I_{bkg} – залишковий некогерентний фон.

Експериментальні дані для зразків без надлишку олеїнової та міристинової кислот апроксимувалися згідно з виразом (1), у якому нехтували другим доданком (що відповідає нехтуванню магнітним розсіянням на молекулах кислот). Так визначали параметри розподілу за розмірами R_0 і S , товщину оболонки поверхнево-активної речовини δ , а також параметри $I(0)$, I_{bkg} , η , які входять до моделі “ядро–оболонка”. Для ферофлюїдів з надлишком ПАР в об'ємі МРС параметри R_0 , S і δ фіксувалися. При цьому визначали інтегральні параметри $I(0)$ та R_g разом із рештою характеристик зразка.

Для інтерпретації даних із малокутового розсіяння нейтронів у досліджених системах за відсутності магнітних частинок використовували апроксимацію Гіньє.

З аналізу концентраційних залежностей інтегральних параметрів $I(0)$ та R_g вільних молекул кислот в об'ємі МРС та в розчиннику (декаліні) можна оцінити характер ефективної взаємодії між молекулами ПАР. У [15–19] показано, що для малих молекул справед-

ливий вираз

$$I(0)/\Phi \approx C(1 + \Phi B_2), \quad (2)$$

де Φ – об'ємна доля молекул у розчині, C – стала, що пов'язана з ефективним об'ємом частинок, B_2 – безрозмірний аналог другого вір'яльного коефіцієнта в парному потенціалі взаємодії [20,21]

$$B_2 = v^{-1} \int (g(r) - 1) dV, \quad (3)$$

де v – об'єм, який займає частинка в розчині, $g(r)$ – парна кореляційна функція для частинок ПАР. Знак параметра B_2 вказує на характер взаємодії: притягання, якщо $B_2 > 0$, і відштовхування, якщо $B_2 < 0$. Аналогічний вираз для концентраційної залежності радіуса інерції має вигляд

$$R_g^2 \approx R_{g0}^2 + \Phi B_2 \ell^2 / (1 + B_2 \Phi), \quad (4)$$

де R_{g0} – істинне значення радіуса інерції, ℓ^2 – квадрат відстані, на якій дві частинки в розчині корелюють.

На рис. 1 зображено експериментальні криві малокутового розсіяння нейтронів для вихідних зразків МРС без додавання надлишку ПАР з умістом магнетиту 0.75% об. Спектри розсіяння від згаданих ферофлюїдів отримано для двох різних нейтронних контрастів, коли рідинна основа систем виготовлялася шляхом додавання D-декаліну в такий спосіб, що вихідна його частка становила 90% та 10% щодо H-декаліну. Апроксимація одержаних кривих здійснювалася за допомогою формули (1), у якій було знехтувано другим доданком через відсутність неадсорбованих молекул ПАР (надлишок ПАР не додавався) у об'ємі рідинної системи.

Ізотопічне заміщення в розчиннику додатково дало змогу точніше визначити параметри розподілу за розмірами R_0 , S та ефективну товщину стабілізаційної оболонки δ , які становили: $R_0 = 3.8(3)$ нм, $S = 0.36(1)$ і $\delta = 1.4(3)$ нм – для МРС, стабілізованої молекулами олеїнової кислоти, $R_0 = 2.8(1)$ нм, $S = 0.26(1)$ і

$\delta = 1.4(2)$ нм — для МРС, стабілізованої молекулами міристинової кислоти. Усереднення за розмірами проведено в масштабах $(1 \div 14)$ нм. Отримані в обох випадках параметри розподілу за розмірами наночастинок магнетиту збігаються зі значеннями параметрів для аналогічних МРС, одержаних раніше у [22].

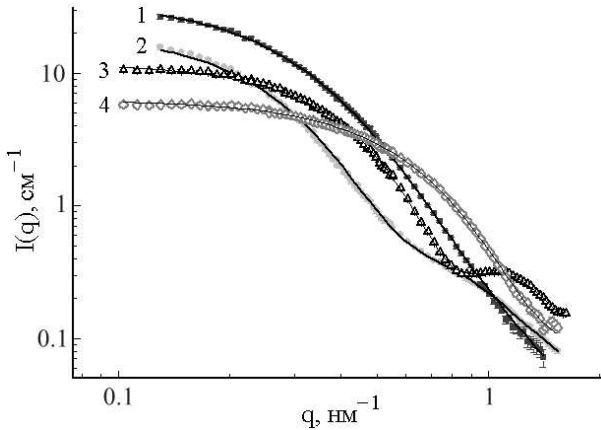
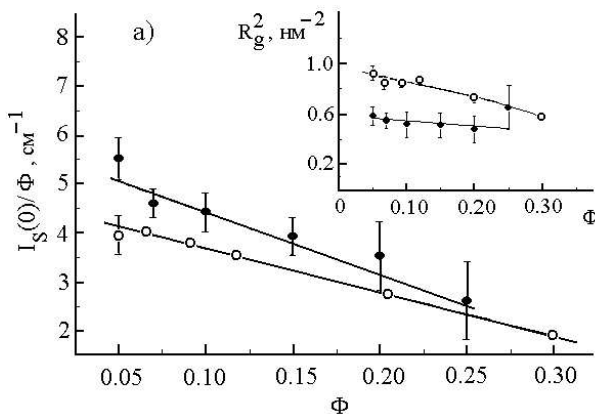


Рис. 1. Спектри малокутового розсіяння нейтронів на МРС, стабілізованих молекулами олеїнової (1, 2) та міристинової (3, 4) кислот, що не містили надлишку ПАР. Криві (2, 3) відповідають зразкам ферофлюїдів 90% вмістом дейтерованого декаліну, а криві (1, 4) – зразки з 10% вмістом D-декаліну.

Подальше вивчення структури МРС полягало в аналізі експериментальних даних для ферофлюїдів, у яких був надлишок молекул стабілізатора. Для ви-



мірювань були приготовані зразки МРС на основі D-декаліну (90% від об'єму розчинника) з різним надлишковим умістом кислоти-стабілізатора: $(5 \div 25)\%$ об. — олеїнової кислоти та $(5 \div 25)\%$ об. — міристинової кислоти. Обрахунок кривих малокутового розсіяння нейтронів для МРС з надлишком відповідної монокарбонової кислоти за формулою (1), у якій при підгонці параметрів приймалися сталими відповідні значення R_0 , S і δ , знайдені вище. Експерименти з малокутового розсіяння нейтронів на ферофлюїдах з надлишком молекул ПАР детально описані в роботах [23,24]. У результаті апроксимації згідно з (1) одержано набір значень інтегральних параметрів R_g^2 , $I_S(0)$ для неадсорбованих молекул кислот у МРС залежно від їх концентрації в рідинній системі. Отримані структурні параметри МРС збігаються з результатами праць [22,23].

Таким же чином, за допомогою апроксимації Гіньє, отримано набір значень цих же параметрів у випадку, коли олеїнова та міристинова кислоти були в розчині з D-декаліном, але без магнітних наночастинок в об'ємі рідини. Усі розрахунки здійснювались аналогічно до аналізу нейтронних спектрів для схожих розчинів [25]. Дейтерований розчинник використано для збільшення нейтронного контрасту між молекулами олеїнової та міристинової кислот та розчинника, а також для зменшення некогерентного фону.

На рис. 2 зображені залежності нормованої на концентрацію інтенсивності розсіяння в нульовий кут $I_S(0)/\Phi$ та квадрата радіуса інерції R_g^2 неадсорбованих молекул олеїнової та міристинової кислот.

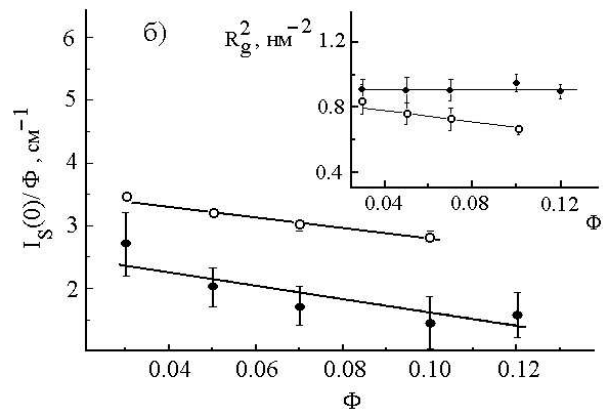


Рис. 2. Залежності параметрів Гіньє для молекул олеїнової (а) та міристинової (б) кислот від концентрації надлишку ПАР у відповідній МРС (●) та в декаліні (○).

Знайдені значення безрозмірного аналога другого віріального коефіцієнта становили: $B_2 = -1.95$ у розчині олеїнової кислоти в декаліні та $B_2 = -2.2$ у МРС, що значно більше, ніж $B_2 = -8$ для потенціалу твердих сфер. Для випадку з надлишком міристинової кислоти $B_2 = -2.5$ в об'ємі МРС та $B_2 = -2.3$ у розчині міристинової кислоти в декаліні. Отже, можна зробити висновок, що в парному потенціалі взаємодії між молекулами олеїнової та міристинової кислот значну роль відіграють сили притягання. Залежнос-

ті, показані на рис. 2, вказують на те, що взаємодії між молекулами кислот у декаліні та МРС відрізняються не дуже суттєво, проте між молекулами кислоти у МРС спостерігається додаткове відштовхування, про що свідчить занижене значення коефіцієнта B_2 . Це явище може бути пов'язане з так званим “деплеційним” притяганням [26] — коли в системі виникає ефективно притягання за рахунок вилучення відносно маленьких молекул ПАР із простору між відносно великими магнітними частинками.

III. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФЕРОФЛЮІДІВ

P - V - T дослідження МРС магнетит-лауринова кислота-вода із умістом магнетиту 2.4% у ферофлюїді виконані за допомогою методу сільфонного п'єзометра з диференціальним трансформаторним датчиком лінійних переміщень. До складу експериментальної установки [12] входять системи створення та вимірювання високого тиску, система термостатування та вимірювання температури, робоча камера та ре-

еструвальна частина. Установа дає змогу отримувати P - V - T дані рідинної системи в інтервалі тисків (0.1 ÷ 101.3) МПа та температур (290 ÷ 330) К. Дані про густину системи на лінії рівноваги рідина-пара одержувались за допомогою пікнометричного методу з похибкою вимірювань $\pm 0.04\%$.

На рис. 3 а) показані знайдені експериментально значення густини МРС, які порівнюються з аналогічними даними для води, отриманими на тій же установці.

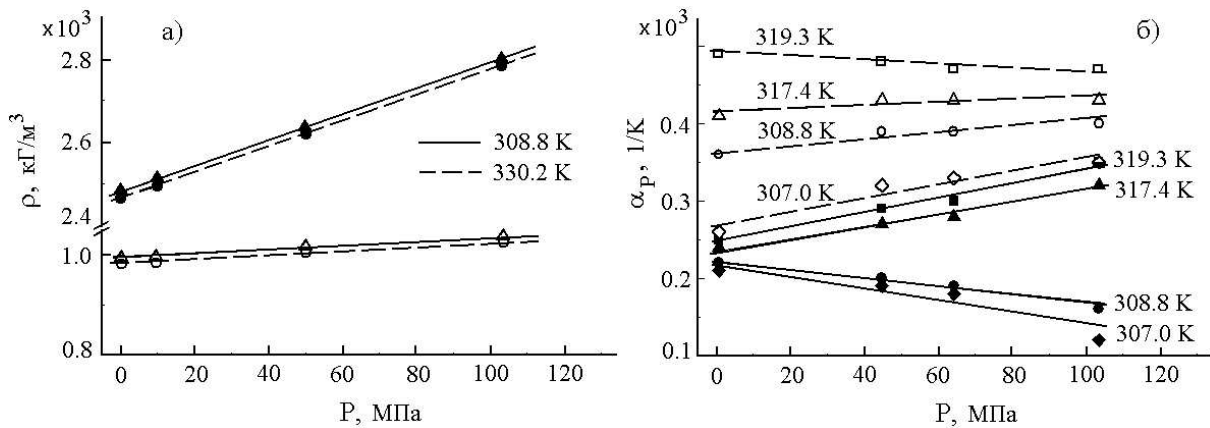


Рис. 3. Баричні залежності: а) густини МРС магнетит-лауринова кислота-вода (●, ▲) та води (○, △); б) ізобаричного коефіцієнта теплового розширення МРС (темні символи) та води (світлі символи).

Як бачимо з рис. 3 а), для досліджуваних температур густина МРС при збільшенні тиску зростає значно швидше, ніж густина води. Як відомо з результатів, отриманих для простих рідин, нанорозмірних рідинних систем із умістом фулеренів, зростання стисливості системи може бути пов'язане зі змінами структури та зміною форми ефективного потенціалу міжчастинкової взаємодії [12]. Зокрема, однією із причин може стати ослаблення сил відштовхування між молекулами в МРС порівняно з водою.

Використовуючи отримані P - V - T дані, ми розраховували ізобаричний коефіцієнт теплового розширення для води та дослідженої МРС за формулою

$$\alpha_P = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P. \quad (5)$$

Обчислені значення α_P для води та МРС наведені на рис. 3 б). Аналіз рисунка показує, що величина коефіцієнта теплового розширення МРС магнетит-лауринова кислота-вода в кілька разів менша за відповідну величину для води. Таке зменшення коефіцієнта теплового розширення в дослідженому інтервалі температур пов'язане зі збільшенням енергії міжмолекулярної взаємодії в рідинній системі при додаванні магнетиту у воду за рахунок додаткової дії сил притягання між внесеними магнітними частинками. Зростання густини та величини α_P дослідженої МРС дозволяє припустити існування перебудов у системі, що

приводять до зменшення вільного об'єму у структурі води при додаванні магнетиту.

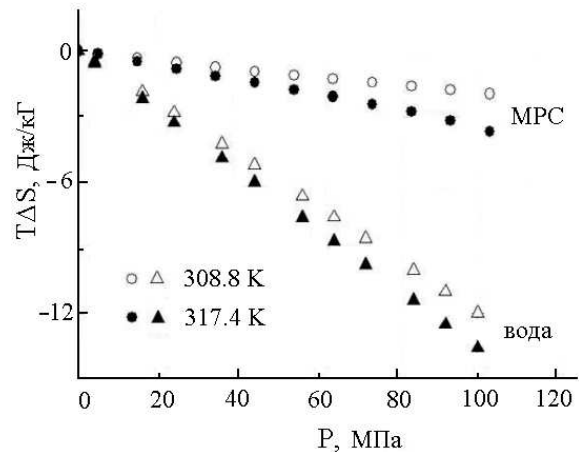


Рис. 4. Баричні залежності ізотермічного приросту ентропії для МРС магнетит-лауринова кислота-вода і для води.

Отримані експериментальні дані були використані для розрахунку ізотермічного приросту ентропії

$$T\Delta S = -T \int_{P_0}^P \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P dP. \quad (6)$$

На рис. 4 показані результати обчислень величини $T\Delta S$ для МРС магнетит–лауринова кислота–вода і для води.

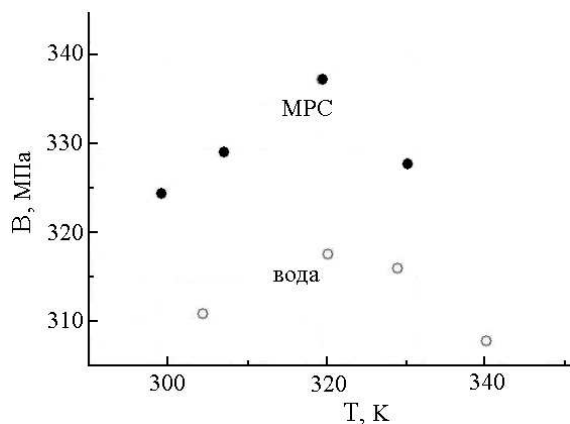


Рис. 5. Значення параметра B рівняння стану Тейта–Таммана при різних температурах для МРС магнетит–лауринова кислота–вода (●) та для води (○).

Порівняння баричних залежностей $T\Delta S$ у системі магнетит–лауринова кислота–вода та у воді показує, що зростання тиску значно менше впливає на ізотермічний приріст ентропії в МРС, ніж у воді. Таким чином, опираючись на результати, одержані для приростів ентропії та коефіцієнта теплового розширення, також можна зробити припущення, що істотна зміна коефіцієнта теплового розширення при додаванні до води магнетиту, оточеного лауриновою кислотою, пов'язана з дією двох чинників, а саме: одночасною зміною сил міжчастинкової взаємодії та зміною молекулярної структури в рідинній системі порівняно зі структурою води. Отримані експериментально значення густини системи магнетит–лауринова кислота–вода були описані за допомогою напівемпіричного рівняння стану Тейта–Таммана

$$\frac{1}{V_0} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T = -\frac{A}{B + P}, \quad (7)$$

де A і B – сталі рівняння Тейта–Таммана, V – об'єм системи, V_0 – об'єм системи при атмосферному тиску, P – тиск. У результаті обробки експериментальних даних для води та МРС знайдено сталі рівняння (7) та проведено їх порівняння. Із статистичного обґрунтування рівняння Тейта–Таммана випливає, що величина B у рівнянні (7) пропорційна глибині потенціальної ями ефективного потенціалу міжчастинкової взаємодії, а значення параметра A обернено пропорційне крутизні відштовхувальної гілки цього потенціалу [12]. Як показав експеримент, значення A від температури не залежить, причому для води ця величина становить 0.137, а для системи магнетит–лауринова кислота–вода вона дорівнює 0.42. На відміну від сталої A , величина параметра B в рівнянні (7) залежить від температури. На рис. 5 зображені температурні залежності параметра B рівняння стану Тейта–Таммана для системи магнетит–лауринова кислота–вода та для води.

Таким чином, використовуючи модельну апроксимацію системи тотожних частинок зі сферично-симетричним ефективним потенціалом міжчастинкової взаємодії, з аналізу отриманих значень параметрів рівняння (7) можна зробити висновок, що для дослідженої МРС характерні менші значення похідної у відштовхувальній гілці ефективного потенціалу міжчастинкової взаємодії та більша його глибина, порівняно з потенціалом міжчастинкової взаємодії молекул у воді.

IV. ВИСНОВКИ

Методом малокутового розсіювання нейтронів вивчено неполярні МРС з надлишком олеїнової та міристинової кислот. Аналіз експериментальних даних дозволяє зробити висновок, що досліджені МРС із надлишковим умістом ПАР у розглянутому діапазоні концентрацій залишаються агрегаційно стійкими. Оцінено міжмолекулярну взаємодію для молекул олеїнової та міристинової кислот. Показано, що сили притягання між молекулами ПАР у рідинних системах за наявності магнітних частинок зменшуються, на відміну від розчину відповідних кислот у декаліні. Установлено збільшення сил притягання між неадсорбованими молекулами олеїнової кислоти у МРС порівняно з МРС, яка стабілізована міристиновою кислотою. Продемонстровано, що взаємодія рідина–ПАР відіграє значну роль при стабілізації досліджених рідинних систем з надлишковим умістом ПАР.

Аналіз P – V – T даних для системи магнетит–лауринова кислота–вода та води за допомогою рівняння стану Тейта–Таммана дає підстави зробити висновок, що для дослідженої МРС порівняно з водою, спостерігається зменшення крутизни гілки ефективного потенціалу міжмолекулярної взаємодії, яка відповідає за міжмолекулярне відштовхування. Водночас, установлене збільшення параметра B в рівнянні Тейта–Таммана для МРС порівняно з водою свідчить про збільшення глибини потенціальної ями ефективного потенціалу міжчастинкової взаємодії приблизно на 10%. З іншого боку, збільшення концентрації магнітних частинок у ферофлюїдах (що відповідає зростанню тиску в системі) приводить до збільшення коефіцієнта теплопровідності [27]. Отже, досліджена МРС магнетит–лауринова кислота–вода має суттєво менший коефіцієнт теплового розширення порівняно з водою, що пояснюється зміною енергії міжчастинкової взаємодії й перебудовою структури води при додаванні до неї магнітних частинок.

Таким чином, дослідження ферофлюїдів з використанням методу малокутового розсіювання нейтронів і методу P – V – T показали, що додавання до рідини магнітних частинок і утворення в такий спосіб магнітної рідинної системи суттєво змінює фізичні властивості рідинного середовища за рахунок зміни ефективного потенціалу міжчастинкової взаємодії.

-
- [1] R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1985).
- [2] I. Anton, I. De Sabata, L. Vekas, *J. Magn. Magn. Mater.* **85**, 219 (1990).
- [3] B. Berkovsky, V. Bashtovoi, *Magnetic Fluids and Applications Handbook* (Begell House, New York, 1996).
- [4] L. Vekas, M. V. Avdeev, D. Bica, *Nanoscience and Its Applications in Biomedicine* (Donglu Shi, Springer Verlag, 2009).
- [5] U. Häfeli, M. Zborowski, *J. Mag. Mag. Mater.* **321**, 1335 (2009).
- [6] M. A. Willard *et al.*, *Int. Mater. Rev.* **49**, 125 (2004).
- [7] G. Baldi *et al.*, *Langmuir* **7**, 4026 (2007).
- [8] T. R. Pisanic *et al.*, *Biomaterials* **16**, 2572 (2007).
- [9] A. S. Arbab, W. Liu, J. A. Frank, *Exp. Rev. Med. Dev.* **4**, 427 (2006).
- [10] A. Ito *et al.*, *J. Biosci. Bioeng.* **100**, 1 (2005).
- [11] A. K. Gupta, M. Gupta, *Biomaterials* **26**, 3995 (2005).
- [12] І. І. Адаменко, Л. А. Булавін, *Фізика рідин та рідинних систем* (АСМІ, Київ, 2006).
- [13] М. В. Авдеев, В. Л. Аксенов, *Усп. фіз. наук* **180**, 1009 (2010).
- [14] В. Л. Аксенов *и др.*, *Кристаллография* **56**, 848 (2011).
- [15] Л. А. Булавін, Т. В. Кармазіна, В. В. Клепко, В. І. Слісенко, *Нейтронна спектроскопія конденсованих середовищ* (Академперіодика, Київ, (2006).
- [16] В. І. Петренко *та ін.*, *Журн. фіз. дослідж.* **12**, 3201 (2008).
- [17] V. Yu. Bezzabotnov *et al.*, *Phys. Chem.* **96**, 976 (1992).
- [18] G. Jancsy *et al.*, *Pure Appl. Chem.* **66**, 515 (1994).
- [19] L. Cser *et al.*, *Physica B: Cond. Matt.* **180**, 848 (1992).
- [20] M. V. Avdeev *et al.*, *J. Coll. Interf. Sc.* **334**, 37 (2009).
- [21] F. Bonneté, D. Vivarés, *Acta Cryst. D.* **58**, 1571 (2002).
- [22] V. I. Petrenko *et al.*, *Ukr. J. Phys.* **53**, 229 (2008).
- [23] J. Blouistine *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 087803 (2006).
- [24] В. І. Петренко *и др.*, *Поверхность. Рентген., синхротрон. нейтрон. исслед.* **2**, 92 (2009).
- [25] А. В. Нагорный *и др.*, *Физ. тверд. тела* **56**, 1 (2014).
- [26] V. I. Petrenko *et al.*, *Coll. Surf. A* **337**, 91 (2009).
- [27] Л. А. Булавін, Д. А. Гаврюшенко, В. І. Ковальчук, В. Ф. Королович, *Яд. фіз. енергет.* **11**, 405 (2010).

NEUTRON AND THERMODYNAMIC STUDIES OF MAGNETIC FLUIDS STABILIZED BY MONOCARBOXYLIC ACIDS

A. V. Nagornyi^{1,2}, V. I. Petrenko^{1,2}, L. A. Bulavin², L. Almásy³, V. I. Kovalchuk², K. O. Moroz², S. P. Nedyak²

¹*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia,*

²*National Taras Shevchenko University of Kyiv,*

Physics Department, Kyiv, Ukraine ³*Institute for Solid State Physics and Optics,*

Wigner Research Center for Physics HAS, Budapest, Hungary

The results of neutron and thermodynamic studies of a non-polar magnetic fluid stabilized by surfactants (monocarboxylic acids) are presented in the paper. As a result of the study of neutrons it was revealed that in the investigated range of concentrations of oleic and myristic acids the aggregation in the liquid system does not occur due to the liquid-surfactant interaction. It is shown that in the presence of magnetic particles in a liquid system the force of attraction between the molecules of the surfactant decreases.

Experimental P - V - T data for the ferrofluid based on lauric acid, such as baric and temperature dependence on density, isobaric thermal expansion coefficient, and isothermal entropy increment are described by means of the semi-empirical Tait-Tammann equation. It has been established that the investigated ferrofluid has a significantly lower thermal expansion coefficient as compared with water due to a change in energy of interparticle interaction and the changing of water structure when the magnetic particles add to water.