



Ukrainian Journal of Natural Sciences
№ 14
Український журнал природничих наук
№ 14

ISSN: 2786-6335 print
ISSN: 2786-6343 online

ХІМІЯ

УДК 544.7;546.3;549.5

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.13>

СОРБЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОРОЗМІРНОГО Fe_3O_4 ЩОДО ІМУНОГЛОБУЛІНУ ЛЮДИНИ Іg

Н. В. Кусяк¹, К. П. Свиридчук², О. В. Ходюк³, А. П. Кусяк⁴, П. П. Горбик⁵

Проведено дослідження сорбційних характеристик нанорозмірного магнетиту (Fe_3O_4) щодо імуноглобуліну людини нормального (Ig). Синтезовані зразки Fe_3O_4 схарактеризовані комплексом фізико-хімічних методів: досліджено розмір і морфологію (TEM/SEM-EDX), проведено якісний аналіз (ГЧ-Фур'є спектроскопія), рентгенівський дифракційний аналіз (XRD), визначено питому площу поверхні (S_{BET}), величину дзета-потенціалу.

Потенціометрично досліджено кислотно-основні властивості поверхні в модельному фізіологічному середовищі – 0,9% розчині NaCl (pH 6,86), досліджено процеси сорбції та встановлено сорб-

¹ кандидат хімічних наук,
доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
докторант
(Інститут хімії поверхні імені О.О. Чуйка НАН України, м. Київ)
e-mail: nkusyak@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0143-3399

² магістр,
асистент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: sviridyukk-97@ukr.net
ORCID: 0009-0000-1258-7644

³ магістр,
асистент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: sasahoduk1@gmail.com
ORCID: 0009-0008-9653-7641

⁴ кандидат хімічних наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник відділу наноматеріалів
(Інститут хімії поверхні імені О.О. Чуйка НАН України, м. Київ)
e-mail: a_kusyak@ukr.net
ORCID: 0000-0003-1005-5497

⁵ доктор фізико-математичних наук,
професор, зав. відділу наноматеріалів
(Інститут хімії поверхні імені О.О. Чуйка НАН України, м. Київ)
e-mail: phorbyk@ukr.net
ORCID: 0000-0002-0533-4427

ційну активність поверхні наночастинок Fe_3O_4 щодо Ig. Так, значення ζ -потенціалу для частинок Fe_3O_4 свідчить про достатню стабільність дисперсії в діапазоні pH ~ 2–5, і втрату її за pH ~ 7. Встановлено, що на поверхні Fe_3O_4 переважають нейтральні центри, які однаково характеризуються як кислотними, так і основними властивостями. Проведено аналіз кінетичних залежностей (моделі псевдопершого та псевдодругого порядків) та ізотерм сорбції (моделі Ленгмюра та Фрейндліха) Ig із використанням лінійного і нелінійного моделювання. Одержані параметри вказують на можливість застосування кінетичної моделі псевдопершого порядку для коректного опису залежності сорбції від часу та придатності моделі Фрейндліха для ізотерм сорбції Ig на поверхні Fe_3O_4 . Максимальна сорбційна ємність (A_{max}) становить $12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Показник Фрейндліха свідчить про неоднорідність геометрії сорбційних центрів, їхню енергетичну нееквівалентність та переважно фізичну природу сорбції. Завдяки високій біосумісності отримані наночастинок магнетиту можуть бути потенційно придатними для створення сорбційних матеріалів та композитів щодо білкових речовин, зокрема імуноглобулінів.

Ключові слова: магнетит, імуноглобулін, сорбційні моделі, моделювання, кислотно-основні властивості.

SORPTION PROPERTIES OF NANOSIZED Fe_3O_4 TOWARD HUMAN IMMUNOGLOBULIN IG

N. V. Kusiak, K. P. Svyrydiuk, A. P. Kusiak, O. V. Khodiuk, P. P. Gorbyk

The sorption characteristics of nanosized magnetite (Fe_3O_4) towards human normal immunoglobulin (Ig) were studied. The synthesized Fe_3O_4 samples were characterized by a complex of physicochemical methods: size and morphology were investigated (TEM/SEM-EDX), qualitative analysis was performed (IR-Fourier spectroscopy), X-ray diffraction analysis (XRD), specific surface area (S_{BET}), and zeta potential were determined. The acid-base properties of the surface were potentiometrically investigated in a model physiological medium of 0,9% NaCl solution (pH 6,86), the sorption processes were investigated and the sorption activity of the surface of Fe_3O_4 nanoparticles towards normal human immunoglobulin (Ig) was established. Thus, the value of the ζ -potential for Fe_3O_4 particles indicates sufficient dispersion stability in the pH range ~ 2–5, and its loss at pH ~ 7. It was found that neutral centers predominate on the Fe_3O_4 surface, which are equally characterized by both acidic and basic properties. The kinetic dependences (pseudo-first and pseudo-second order models) and sorption isotherms (Langmuir and Freundlich models) of Ig were analyzed using linear and nonlinear modeling. The obtained parameters indicate the possibility of using the pseudo-first order kinetic model to correctly describe the dependence of sorption on time and the suitability of the Freundlich model for sorption isotherms of Ig on the Fe_3O_4 surface. The maximum sorption capacity (A_{max}) is $12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. The Freundlich index indicates the heterogeneity of the geometry of the adsorption centers, their energy non-equivalence and, mainly, the physical nature of the sorption. Due to the high biocompatibility, the obtained magnetite nanoparticles may be potentially suitable for creating adsorption materials and composites for protein substances, in particular immunoglobulins.

Key words: magnetite, immunoglobulin, sorption models, modeling, acid-base properties.

Вступ

Використання наноматеріалів як субстратів для іммобілізації органічних речовин медико-біологічного призначення в біологічному середовищі потребує детального вивчення взаємодії таких матеріалів як із препаратами, так і з компонентами біологічного середовища (Peng et al., 2020; Vega-Vásquez et al., 2020). Фізико-хімічні параметри таких матеріалів мають відповідати принципам біосумісності, сорбційної активності, часу перебування в біологічному середовищі, гідрофільності/гідрофобності тощо (Shalmani et al., 2019; Auría-Soro et al., 2019). Важливо розуміти процес

та механізм взаємодії біологічних речовин з поверхнями наночастинок (далі – НЧ) різної природи, вплив на конформацію та функціональну здатність речовин, зокрема білкових (Bağcıoğlu et al., 2019). Ця взаємодія буде визначатися хімічною природою реагентів, фізико-хімічними (поверхневий заряд, реакційні групи, pH_{IP}) та геометричними (розмір, структура поверхні) властивостями НЧ.

Серед біологічних реагентів ключове місце належить білковим речовинам, тому дослідження поведінки НЧ щодо них є важливими. Досліджено, що швидко та легко зв'язування білків із поверхнею НЧ зумов-

лено електростатичною взаємодією, водневими зв'язками, гідрофобними взаємодіями й утворенням координаційних зв'язків. Ступінь та специфічність взаємодії визначаються трьома основними факторами, комбінація яких контролює сорбцію. Першим фактором є характеристики НЧ (природа, форма та розмір) та її поверхні (заряд і гідрофобність). Другим – середовище. Тому зазвичай використовуються складні буферні суміші, іони яких, імовірно, конкурують з біомолекулами за місця сорбції (Blank-Shim et al., 2017). Тому вибір середовища є одним із вирішальних факторів у процесі дослідження. Третім фактором, що впливає на взаємодію, є сам білок і особливості його структури, оскільки білки можуть зазнавати структурних змін через взаємодію з НЧ (Abarca-Cabrera et al., 2021). З метою збереження функціональності молекули важливою є підтримка її нативної структури.

Тому вивчення поведінки поверхні НЧ щодо біологічних речовин є принциповим. Серед біосумісних композитів магніточутливі на основі Fe_3O_4 залишаються одними із ключових (Martins et al., 2021; Islam et al., 2021). Так, у роботах (Cao et al., 2020; Kaveh-Baghbaderani et al., 2021) досліджено іммобілізацію білкових сполук на композитах Fe_3O_4 . Деякі демонструють іммобілізуючу активність щодо IgG (Jofre et al., 2020; Khuyen et al., 2020; Kussyak et al., 2023). IgG визначали також за допомогою електронно-спінової резонансної спектроскопії з використанням НЧ Fe_3O_4 (Tian et al., 2018).

Основною метою цієї роботи було вивчення фізико-хімічних властивостей синтезованого нанорозмірного Fe_3O_4 та процесів сорбційної іммобілізації Immunoglobulinum humanum (Ig). Як середовище під час сорбційних тестів використовувався 0,9% NaCl (ФР) для збереження початкової структури білків, який має простий іонний склад, що спрощує інтерпретацію отриманих результатів. Досліджені особливості кінетики сорбції, необхідні для розуміння взаємодії білка з НЧ Fe_3O_4 .

Матеріал і методи

Монодисперсний нанорозмірний магнетит Fe_3O_4 синтезовано за реакцією Елмора. Постійне перемішування та поступове рівномірне додавання розчину солей заліза (Fe(II) та Fe(III)) до розчину аміаку, взятому в надлишку, зумовлює утворення монодисперсного нанорозмірного магнетиту та сприяє

максимальному виходу продукту реакції. Рентгеноструктурні дослідження проведено методом порошкової рентгенівської дифракції (XRD) (DRON-UM1 з Fe-фільтром CuK_α ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$), у діапазоні 2θ від 20° до 80° із кроком $0,05^\circ$ та експозицією 15 с. Запис інфрачервоних спектрів (Tensor 27 (Bruker Optik GmbH)) проведено в діапазоні $4000\text{--}400 \text{ cm}^{-1}$ (таблетки KBr) з роздільною здатністю 2 cm^{-1} . Морфологічні характеристики і розмір одержаних НЧ досліджено методом електронної мікроскопії (JEOL 1200 EX (Токіо, Японія). Для визначення дзета-потенціалу (Zetasizer Nano ZS (Malvern)) зразки суспендували у ФР за концентрації зразка 2 г л^{-1} .

Проведено дослідження кислотно-основних характеристик поверхні НЧ Fe_3O_4 методом рН-метрії окремих наважок, що дозволяє оцінити інтегральну кислотність поверхні за зміною рН водної суспензії досліджуваних зразків (I-160M). Значення рН ізоелектричної точки ($\text{pH}_{\text{изп}}$) визначали відповідно до методики (Kussyak et al., 2021; Кусьяк та ін., 2025). За допомогою основних рівнянь кислотно-основного балансу експериментально отримані значення $[\text{H}^+]_0$ та $[\text{H}^+]_{\text{екв}}$ були використані для розрахунку концентрацій і відносної частки протонованих $-\text{E}-\text{OH}_2^+$ та депротонованих $-\text{E}-\text{O}^-$ активних центрів поверхні НЧ, розраховано значення їх pK .

Для дослідження сорбції Ig на поверхні НЧ було використано препарат імуноглобулін (нормальний людський, розчин для ін'єкцій 10%, Biopharma). Препарат містить від 9 до 11% білка (антитіла різної специфічності) і являє собою імунологічно активну білкову фракцію із сироватки або плазми людини, очищену та концентровану з використанням відповідних методів. У цій роботі Ig кількісно визначено як загальний. Вплив сумісної сорбції кількох видів антитіл не вивчався. Було виготовлено серію зразків з різною концентрацією Ig у діапазоні $0,15\text{--}1,15 \text{ мг мл}^{-1}$ у ФР з рН 6,86. Сорбцію Ig проводили протягом 2 годин у статичному режимі ($T = 298 \text{ K}$). Кількість сорбованого препарату на поверхні магнетиту визначали шляхом вимірювання концентрації розчинів Ig до та після сорбції. Спектрофотометричні дослідження (Helios Gamma) сорбції Ig проведено за $\lambda = 280 \text{ нм}$, довжина оптичного шляху становить 1 см. Сорбційну ємність (A , мг/г) розраховували за допомогою класичних рівнянь (Kussyak et al., 2022):

$$A = \frac{(C_o - C_{eq}) \cdot V}{m} \quad (1)$$

де A (мг г⁻¹) – кількість сорбованої речовини, C_o та C_{eq} (мг мл⁻¹) – початкова та рівноважна концентрації розчину Іг, V (мл) – об'єм розчину, m (мг) – маса використаного сорбенту.

Аналіз кінетичних характеристик проводили за концентрації Іг 0,6 мг мл⁻¹ у середовищі ФР (рН = 6,86). Одержані експериментальні кінетичні дані проаналізовані на відповідність кінетичним моделями псевдопершого та псевдодругого порядків. Кінетичне рівняння моделі псевдопершого порядку Лагенгрена в диференційній формі:

$$\frac{dA_t}{dt} = k_1 \cdot (A_{eq} - A_t) \quad (2)$$

згідно з яким у даній моделі швидкість сорбції пропорційна різниці між рівноважною сорбцією (A_{eq}) та сорбцією (A_t) у момент часу t . В інтегральній формі:

$$\lg(A_{eq} - A_t) = \lg A_{eq} - \frac{k_1}{2,303} \cdot t \quad (3)$$

де A_{eq} та A_t – сорбційна ємність у стані рівноваги та в момент часу t відповідно (мг/г); k_1 – константа швидкості сорбції моделі псевдопершого порядку (хв⁻¹); t – час (хв).

Побудова графічної залежності в координатах $\ln(A_{eq} - A_t) = f(t)$ дозволяє отримати відповідну лінійну функцію та знайти k_1 та A_{eq} .

Кінетичне рівняння моделі псевдодругого порядку Хо та Маккея в диференційній формі:

$$\frac{dA_t}{dt} = k_1 \cdot (A_{eq} - A_t)^2 \quad (4)$$

де k_2 – константа швидкості псевдодругого порядку (г мг⁻¹ хв⁻¹).

В інтегральній формі:

$$\frac{t}{A_t} = \frac{1}{k_2 \cdot A_{eq}^2} + \frac{1}{A_{eq}} \cdot t \quad (5)$$

Побудова графічної залежності в координатах $t/A_t = f(t)$ дозволяє отримати відповідну лінійну функцію та знайти k_2 . Розраховано початкову швидкість сорбції h_o . Для даних моделей були розраховані теоретичні значення сорбційної ємності ($A_{теор}$) у момент часу t .

Експериментальні ізотерми проаналізовані на відповідність моделями Ленгмюра та Фрейндліха. Для водних розчинів нелінійний математичний вираз моделі ізотерми Ленгмюра:

$$A_{eq} = A_{max} \frac{K_L \cdot C_{eq}}{1 + K_L \cdot C_{eq}} \quad (6)$$

де A_{eq} і A_{max} – рівноважна та гранична сорбційна ємність (мг/г або моль/г);

C_{eq} – рівноважна концентрація сорбату (мг мл⁻¹ або моль мл⁻¹);

K_L – константа Ленгмюра, яка пов'язана із сорбційною здатністю (л мг⁻¹ або л моль⁻¹).

Лінійних математичних рівнянь моделі ізотерми Ленгмюра відомо багато. У роботі для розрахунків використовували два, які найчастіше застосовують:

$$\frac{C_{eq}}{A_{eq}} = \frac{1}{K_L \cdot A_{max}} + \frac{1}{A_{max}} \cdot C_{eq} \quad (7)$$

та

$$\frac{1}{A_{eq}} = \frac{1}{K_L \cdot A_{max}} \cdot \frac{1}{C_{eq}} + \frac{1}{A_{max}} \quad (8)$$

Побудова графічних залежностей лінійного рівняння (7) у координатах $C_{eq}/A_{eq} = f(C_{eq})$, а рівняння (8) у координатах $1/A_{eq} = f(1/C_{eq})$ дозволила знайти K_L та A_{max} .

Моделі ізотерми сорбції Фрейндліха використовується переважно для діапазону середніх концентрацій. Нелінійна форма ізотерми сорбції має вигляд:

$$A_{eq} = K_F \cdot C_{eq}^{\frac{1}{n}} \quad (9)$$

де K_F – константа Фрейндліха, відносна сорбційна здатність сорбенту (мг/г або моль/г); n – показник у рівнянні Фрейндліха, який характеризує інтенсивність сорбційного процесу й розподіл активних центрів на адсорбенті.

Побудова графічної залежності рівняння лінійної форми

$$\ln A_{eq} = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_{eq} \quad (10)$$

у координатах $\ln A_{eq} = f(\ln C_{eq})$ дозволяє отримати відповідне лінійне рівняння та знайти K_F та n .

Результати та їх обговорення

На дифрактограмах XRD (рис. 1-а) магнетиту спостерігаються рефлекси (за $2\theta = 30,1; 35,6; 44; 53,3; 57,4; 62,8$ з міжплощинними відстанями 2,96; 2,52; 2,05; 1,71; 1,60; 1,47), що відповідають кристалічній фазі магнетиту. Смути ІЧ поглинання (рис. 1-б) у діапазоні 570 см⁻¹ (валентні коливання, пов'язані зі зв'язками Fe-O) та 790 см⁻¹, 890 см⁻¹ та 1 628 см⁻¹ (Fe-OH) відповідають магнетиту.

Дані ТЕМ (рис. 2-а) ілюструють сферичну форму НЧ із середнім діаметром $6,76 \pm 1,54$ нм (рис. 2-б) без значної агрегації.

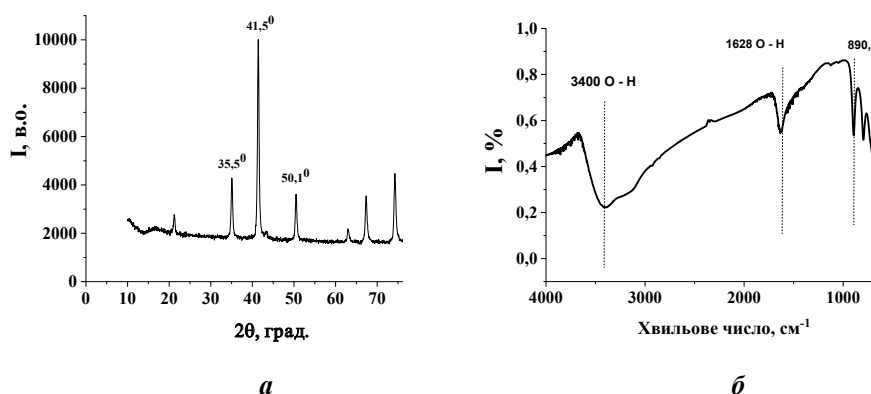


Рис. 1. XRD дифрактограма (а) та ІЧ-спектр (б) зразка Fe_3O_4

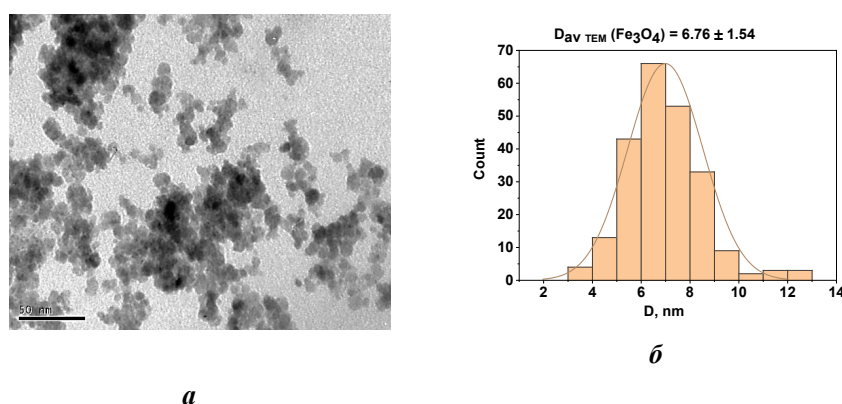


Рис. 2. ТЕМ зображення НЧ Fe_3O_4 (масштаб 50 нм) (а); гранулометричний склад (б)

Дисоціація поверхневих $\equiv\text{E}-\text{OH}$ груп оксидів металів, процеси сорбції іонів H^+ і OH^- у результаті гетеролітичної дисоціації молекул води або адсорбтиву в суспензіях призводять до зміни рН водної суспензії і, як наслідок, поверхневого заряду оксидів. Аналіз залежності гідролітичної сорбції дозволяє з'ясувати кислотно-основну природу поверхневих груп оксиду (Kosmulski, 2016). Так, різниця у значеннях кислотності розчинів до (pH_0) і після (pH_{eq}) гідролітичної сорбції показує зміну $\pm\text{pH}$: $\pm\text{pH} = \text{pH}_0 - \text{pH}_{\text{eq}}$, а точка перетину прямої $\pm\text{pH} = f(\text{pH}_0)$ з віссю pH_0 вказує на значення ізоелектричної точки $\text{pH}_{\text{ІЕТ}}$ (рН, за якого спостерігається рівність сорбції іонів H^+ і OH^-). tg кута нахилу свідчить про обмінну ємність поверхневих груп (рис. 3-а). На основі одержаних експериментальних даних (Кусяк та ін., 2025) були визначені інтегральні показники кислотно-основних властивостей суспензій на основі констант іонізації поверхневих гідроксильних груп, частки негативно (α^-), позитивно (α^+) заряджених і нейтральних (α^0) груп у діапа-

зоні рН ($\alpha^+ - \text{E}-\text{OH}_2^+$, $\alpha^0 - \text{E}-\text{OH}$, $\alpha^- - \text{E}-\text{O}^-$). Розраховано значення іонної сили та коефіцієнт активності. Побудовано діаграму залежності часток поверхневих груп поверхні Fe_3O_4 від рН середовища. Так, за результатами аналізу (див. рис. 3-а) $\text{pH}_{\text{ІЕТ}} = 6,5 - 6,8$ форма кривої гідролітичної сорбції відповідає наявності на поверхні Fe_3O_4 різних типів кислотно-основних активних центрів (рис. 3-б).

Згідно з результатами досліджень, на поверхні Fe_3O_4 переважають нейтральні центри, які однаково характеризуються як кислотними, так і основними властивостями, що дає змогу утворювати центри кислотного й основного типів у діапазоні рН 4–9 з максимальною часткою після рН 6 (Кусяк та ін., 2025). У досліджуваному діапазоні рН частка позитивно заряджених груп $-\text{E}-\text{OH}_2^+$ на поверхні Fe_3O_4 зменшується зі збільшенням рН, найбільше значення 0,84 за рН 4,01, зменшується за рН 4,52. Частка негативно заряджених груп $-\text{E}-\text{O}^-$ на поверхні фіксується після рН 6,5 у дуже

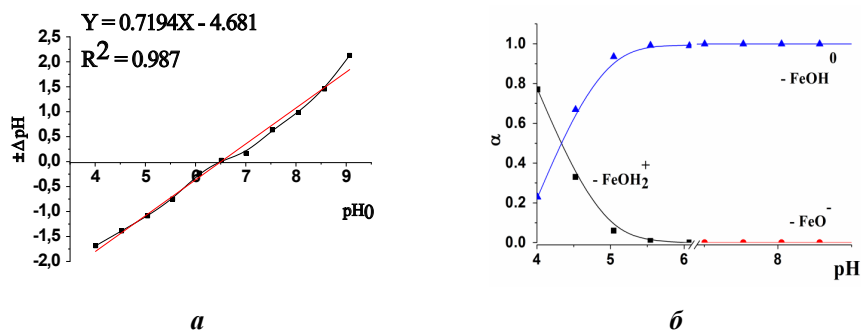


Рис. 3. Залежність $\pm \Delta pH$ від pH_0 (а) та крива гідролітичної сорбції (б) для поверхні Fe_3O_4

малих кількостях: $1,39 \cdot 10^{-6} - 8,84 \cdot 10^{-7}$. Частка теоретично розрахованих позитивно і негативно заряджених центрів більша, ніж експериментально одержаних, оскільки нейтральні групи залежно від pH середовища беруть участь у процесах протонування або депротонування.

Значення ζ -потенціалу для НЧ Fe_3O_4 перебуває в діапазоні $28,7 \pm 1,68 - 27,47 \pm 2,61$ mV (Kusyak et al., 2021; Kusyak et al., 2022)

(рис. 4), свідчить про достатню стабільність дисперсії НЧ у діапазоні pH $\sim 2-5$, яка втрачається за pH ~ 7 .

Кінетичні криві, основні параметри та статистичні показники залежності сорбції Ig у середовищі ФР на зразках Fe_3O_4 від часу наведені на рис. 5 та в таблиці. Значення сорбційної ємності з використанням лінійного і нелінійного моделювання псевдопершого та псевдодругого порядків, а також

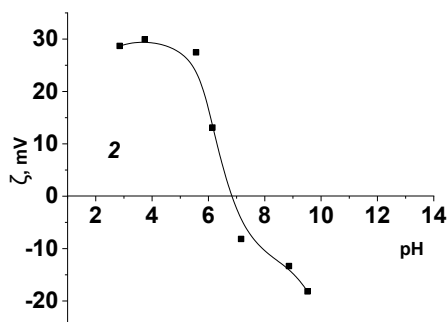


Рис. 4. Залежність електрокінетичного потенціалу НЧ Fe_3O_4 від pH

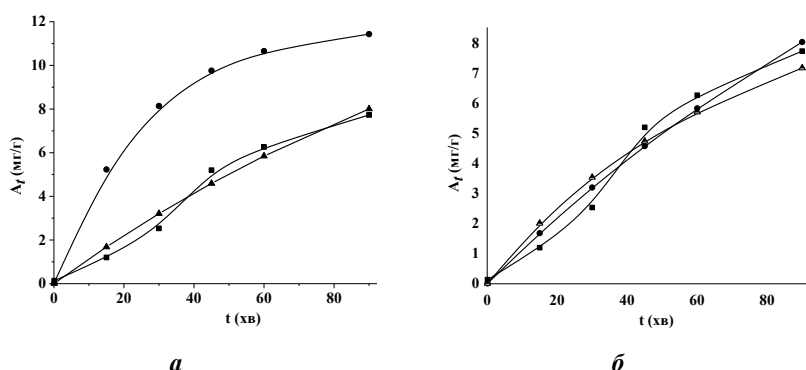


Рис. 5. Залежність сорбції Ig у середовищі ФР на поверхні МН Fe_3O_4 від часу (pH = 6,86) у координатах моделі псевдопершого порядку (а) та моделі псевдодругого порядку (б) ($C_0 = 0,6$ мг/мл, $T = 298$ K) (1 – експериментальна, 2 – лінійне моделювання, 3 – нелінійне моделювання)

Таблиця

Кінетичні параметри моделей псевдопершого та псевдодругого порядків сорбції Іg на поверхні МН Fe₃O₄

Кінетичні моделі порядків	Параметри			Статистичні показники		
				RSS	χ ²	R ²
Псевдопершого	A_{eq} (мг·г⁻¹)	K₁ (хв⁻¹)				
Нелінійне	17,8866	0,00659		1,32836	1,71343	0,97063
Лінійне	11,78003	0,03915		0,60135	0,68494	0,93035
Псевдодругого	A_{eq} (мг·г⁻¹)	K₂ (г·мг⁻¹·хв⁻¹)	h₀ (мг·г⁻¹·хв⁻¹)			
Нелінійне	32,91534	1,08964E-4	0,11805	1,35828	1,71469	0,96997
Лінійне	14,73494	7,14387E-4	0,15511	71,89169	10,0351	0,2514

статистичні показники дозволяють більш точно встановити характер сорбції препарату на поверхні зразків.

Високі значення коефіцієнта кореляції, задовільні параметри та значення A_{теор}, близькі до експериментально отриманих, вказують на можливість застосування кінетичної моделі псевдопершого порядку для коректного опису залежності сорбції від часу.

Результати досліджень сорбції Іg у діапазоні концентрацій 0,15–1,15 мг мл⁻¹ використано для побудови ізотерм, розрахунку параметрів і визначення можливого механізму сорбції за відповідністю моделям Фрейндліха та Ленгмюра (рис. 6).

Згідно з розрахованими з різних лінійних форм, відповідно до рівнянь 7 та 8, даними розбіжність між значеннями K_L та A_{max}, ізотерм Ленгмюра (відповідно криві 3 та 4) може свідчити про нелінійність природи рівнянь, можливий вплив крайніх точок і неповне насичення або непридатність

моделі Ленгмюра для даного діапазону концентрацій. Повна узгодженість одна з одною теоретичних ізотерм Фрейндліха (криві 5, 6) та параметрів K_F і n може свідчити про придатність даної моделі для коректного опису ізотерм сорбції Іg на поверхні НЧ Fe₃O₄. Теоретичне значення A_{max} приблизно 12 мг г⁻¹. Показник n, розрахований з рівняння Фрейндліха, становить 1,658, відповідно, коефіцієнт неоднорідності 1/n поверхні адсорбенту відповідає умові 0 < 1/n < 1, що свідчить про неоднорідність геометрії сорбційних центрів, їхню енергетичну нееквівалентність та переважно фізичну природу сорбції.

Висновки

Комплексом фізико-хімічних методів проаналізовано морфологічні та фізико-хімічні характеристики синтезованих зразків наночастинок Fe₃O₄. Досліджено сорбційну активність поверхні наночастинок Fe₃O₄ щодо імуноглобуліну людини нормального. Проведено аналіз кінетич-

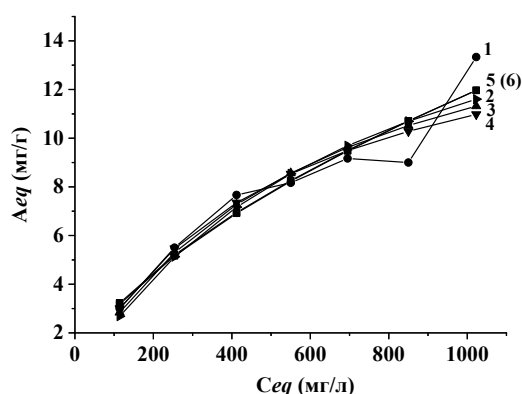


Рис. 6. Експериментальна (1) та теоретично розраховані (2-6) ізотерми сорбції Іg на поверхні МН Fe₃O₄ (C₀ = 0,15–1,15 мг/мл, T = 298 К), одержані з використанням констант Ленгмюра (2–4) та Фрейндліха (5,6) (2, 5 – нелінійне моделювання, 3, 4, 6 – лінійне моделювання)

них залежностей (моделі псевдопершого та псевдодругого порядків) та ізотерм сорбції (моделі Ленгмюра та Фрейндліха) Ig з використанням лінійного та нелінійного моделювання. Одержані параметри вказують на можливість застосування кінетичної моделі псевдопершого порядку для коректного опису залежності сорбції від

часу та придатності моделі Фрейндліха для ізотерм сорбції Ig на поверхні Fe_3O_4 . Максимальна сорбційна ємність ($A_{\max}$) становить $12 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$. Показник Фрейндліха n (1,658) свідчить про неоднорідність геометрії сорбційних центрів, їхню енергетичну нееквівалентність та переважно фізичну природу сорбції.

Список використаної літератури

- Кусяк Н.В., Свиридюк К.П., Кичкирук О.Ю., Листван В.В., Горбик П.П. Кислотно-основні властивості поверхні нанорозмірного Fe_3O_4 . *Український журнал природничих наук*. 2025. № 12. С. 138–145. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.13>
- Abarca-Cabrera L., Fraga-García P., Berensmeier S. Bio-nano interactions: binding proteins, polysaccharides, lipids and nucleic acids onto magnetic nanoparticles. *Biomaterials Research*. 2021. Vol. 25. № 1. P. 12. <https://doi.org/10.1186/s40824-021-00212-y>
- Auria-Soro C., Nesma T., Juanes-Velasco P., Landeira-Viñuela A., Fidalgo-Gomez H., Acebes-Fernandez V., Gongora R., Almendral Parra M.J., Manzano-Roman R., Fuentes M. Interactions of nanoparticles and biosystems: microenvironment of nanoparticles and biomolecules in nanomedicine. *Nanomaterials (Basel)*. 2019. Vol. 9. P. 1365–1385. <https://doi.org/10.3390/nano9101365>
- Bayramoglu G., Salih B., Arica M.Y. Catalytic activity of immobilized chymotrypsin on hybrid silica-magnetic biocompatible particles and its application in peptide synthesis. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2019. Vol. 190. P. 1224–124. <https://doi.org/10.1007/s12010-019-03158-z>
- Blank-Shim S.A., Schwaminger S.P., Borkowska-Panek M. et al. Binding patterns of homo-peptides on bare magnetic nanoparticles: insights into environmental dependence. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. № 1. P. 14047. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13928-6>
- Cao L., Zhao Y., Chu Z., Zhang X., Zhang W. Core-shell magnetic bimetallic MOF material for synergistic enrichment of phosphopeptides. *Talanta*. 2020. Vol. 206. P. 120165. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120165>
- Islam M.M., Akter L., Pervez A.K.M.K., Nabi M.N., Uddin M.M., Arifin Z. Application of combined SWOT and AHP for strategy development: evidence from pottery industry of Bangladesh. *Asian Journal of Management*. 2020. Vol. 11. № 1. P. 30–39. <https://doi.org/10.18488/journal.1005/2020.10.1/1005.1.81.94>
- Jofre C.F., Regiart M., Fernández-Baldo M.A., Bertotti M., Raba J., Messina G.A. Electrochemical microfluidic immunosensor based on TES-AuNPs@ Fe_3O_4 and CMK-8 for IgG anti-Toxocara canis determination. *Analytica Chimica Acta*. 2020. Vol. 1096. P. 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.10.040>
- Kaveh-Baghbaderani Y., Allgayer R., Schwaminger S.P., Fraga-García P., Berensmeier S. Magnetic separation of antibodies with high binding capacity by site-directed immobilization of Protein A-domains to bare iron oxide nanoparticles. *ACS Applied Nano Materials*. 2021. Vol. 4. № 5. P. 4956–4963. <https://doi.org/10.1021/acsanm.1c00487>
- Khuyen H.T., Huong T.T., Huong N.T., Ha V.T.T., Van N.D., Nghia V.X., Anh T.K., Minh L.Q. Luminescence properties of a nanotheranostics based on a multifunctional $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Au}/\text{Eu}[1-(2\text{-naphthoyl})-3,3,3\text{-trifluoroacetone}]_3$ nanocomposite. *Optical Materials*. 2020. Vol. 109. P. 110229. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110229>
- Kosmulski M. Isoelectric points and points of zero charge of metal (hydr)oxides: 50 years after Parks' review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2016. Vol. 238. P. 1–61. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.10.005>
- Kusyak N., Behunova D. M., Yankovych H., Kusyak A., Findoráková L., Melnyk I. Specific aspects of human immunoglobulin interactions with $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{NH}_2$ nanocomposite surface. *Applied Nanoscience*. 2023. Vol. 13. P. 7219–7230. <https://doi.org/10.1007/s13204-023-02883-6>
- Kusyak N., Kusyak A., Petranovska A. et al. Features of adsorption of human Ig on the surface of magnetically sensitive nanocomposites. *Applied Nanoscience*. 2022. Vol. 12. P. 679–689. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01692-z>
- Kusyak N.V., Kusyak A.P., Svyrydiuk K.P., Petranovska A.L., & Gorbyk P.P. Evaluation of the acid-base surface properties of nanoscale Fe_3O_4 and $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ by potentiometric method. *Molecular*

Crystals and Liquid Crystals. 2021. Vol. 719. P. 140–152. <https://doi.org/10.1080/15421406.2021.1878744>

Martins P.M., Lima A.C., Ribeiro S., Lanceros-Mendez S., Martins P. Magnetic nanoparticles for biomedical applications: from the soul of the Earth to the deep history of ourselves. *ACS Applied Bio Materials*. 2021. Vol. 4. № 8. P. 5839–5870. <https://doi.org/10.1021/acsabm.1c00440>

Peng Y., Chen L., Ye S., Kang Y., Liu J., Zeng S., Yu L. Research and development of drug delivery systems based on drug transporter and nano-formulation. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2020. Vol. 15. № 2. P. 220–236. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2020.02.004>

Peng Z., Liu X., Zhang W., Zeng Z., Liu Z., Zhang C., Liu Y., Shao B., Liang Q., Tang W., Yuan X. Advances in the application, toxicity and degradation of carbon nanomaterials in environment: A review. *Environment International*. 2020. Vol. 134. P. 105298. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105298>

Shalmani A.A., Sarihi P., Raoufi M. Nanoparticles and biological environment interactions. In: Rahmandoust M., Ayatollahi M. (eds) *Nanomaterials for Advanced Biological Applications. Advanced Structured Materials*. Springer : Cham, 2019. Vol. 104. P. 1–17. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10834-2_1

Tian S., Jiang J., Zang S., Wang K., Yu Y., Li X., Zhang H., Yu A., Zhang Z. Determination of IgG by electron spin resonance spectroscopy using Fe₃O₄ nanoparticles as probe. *Microchemical Journal*. 2018. Vol. 141. P. 444–450. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.06.001>

Vega-Vásquez P., Mosier N.S., Irudayaraj J. Nanoscale drug delivery systems: from medicine to agriculture. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020. Vol. 8. P. 79. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00079>

References

Kusyak, N.V., Svyrydiuk, K.P., Kychkyruk, O.Yu., Lystvan, V.V., & Gorbyk P.P. (2025). Acid-base properties of nanoscale Fe₃O₄ surface. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, 12, 138–145. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.13> [in Ukrainian].

Abarca-Cabrera, L., Fraga-García, P., & Berensmeier, S. (2021). Bio-nano interactions: binding proteins, polysaccharides, lipids and nucleic acids onto magnetic nanoparticles. *Biomaterials Research*, 25(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s40824-021-00212-y> [in English].

Auría-Soro, C., Nesma, T., Juanes-Velasco, P., Landeira-Viñuela, P., Fidalgo-Gomez, A., Acebes-Fernandez, H., Gongora, V.R., Almendral Parra, M.J., Manzano-Roman, R., & Fuentes, M. (2019). Interactions of nanoparticles and biosystems: microenvironment of nanoparticles and biomolecules in nanomedicine. *Nanomaterials (Basel)*, 9, 1365–1385. <https://doi.org/10.3390/nano9101365> [in English].

Bayramoglu, G., Salih, B., & Arica, M.Y. (2019). Catalytic activity of immobilized chymotrypsin on hybrid silica-magnetic biocompatible particles and its application in peptide synthesis. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 190, 1224–124. <https://doi.org/10.1007/s12010-019-03158-z> [in English].

Blank-Shim, S.A., Schwaminger, S.P., & Borkowska-Panek, M. (2017). Binding patterns of homo-peptides on bare magnetic nanoparticles: insights into environmental dependence. *Scientific Reports*, 7(1), 14047. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13928-6> [in English].

Cao, L., Zhao, Y., Chu, Z., Zhang, X., & Zhang, W. (2020). Core-shell magnetic bimetallic MOF material for synergistic enrichment of phosphopeptides. *Talanta*, 206, 120165. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120165> [in English].

Islam, M.M., Akter, L., Pervez, A.K.M.K., Nabi, M.N., Uddin, M.M., & Arifin, Z. (2020). Application of combined SWOT and AHP for strategy development: evidence from pottery industry of Bangladesh. *Asian Journal of Management*, 11(1), 30–39. <https://doi.org/10.18488/journal.1005/2020.10.1/1005.1.81.94> [in English].

Jofre, C.F., Regiart, M., Fernández-Baldo, M.A., Bertotti, M., Raba, J., & Messina, G.A. (2020). Electrochemical microfluidic immunosensor based on TES-AuNPs@Fe₃O₄ and CMK-8 for IgG anti-Toxocara canis determination. *Analytica Chimica Acta*, 1096, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.10.040> [in English].

Kaveh-Baghbaderani, Y., Allgayer, R., Schwaminger, S.P., Fraga-García, P., & Berensmeier, S. (2021). Magnetic separation of antibodies with high binding capacity by site-directed immobilization of Protein A-domains to bare iron oxide nanoparticles. *ACS Applied Nano Materials*, 4(5), 4956–4963. <https://doi.org/10.1021/acsanm.1c00487> [in English].

Khuyen, H.T., Huong, T.T., Huong, N.T., Ha, V.T.T., Van, N.D., Nghia, V.X., Anh, T.K., & Minh L.Q. (2020). Luminescence properties of a nanotheranostics based on a multifunctional $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Au}/\text{Eu}[1-(2\text{-naphthoyl})-3,3,3\text{-trifluoroacetone}]_3$ nanocomposite. *Optical Materials*, 109, 110229. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110229> [in English].

Kosmulski, M. (2016). Isoelectric points and points of zero charge of metal (hydr)oxides: 50 years after Parks' review *Advances in Colloid and Interface Science*, 238, 1–61. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.10.005> [in English].

Kusyak, N., Behunova, D., Yankovych, H., Kusyak, A., Findoráková, L., & Melnyk, I. (2023). Specific aspects of human immunoglobulin interactions with $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Si}(\text{CH}_3)_3\text{NH}_2$ nanocomposite surface. *Applied Nanoscience*, 13, 7219–7230. <https://doi.org/10.1007/s13204-023-02883-6> [in English].

Kusyak, N., Kusyak, A., Petranovska, A., Gorbyk, P. & Abramov, N. (2022) Features of adsorption of human Ig on the surface of magnetically sensitive nanocomposites. *Applied Nanoscience*, 12, 679–689. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01692-z> [in English].

Kusyak, N.V., Kusyak, A.P., Svyrydiuk, K.P., Petranovska, A.L., & Gorbyk, P.P. (2021). Evaluation of the acid–base surface properties of nanoscale Fe_3O_4 and $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ by potentiometric method. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 719, 140–152. <https://doi.org/10.1080/15421406.2021.1878744> [in English].

Martins, P.M., Lima, A.C., Ribeiro, S., Lanceros-Mendez, S., & Martins, P. (2021). Magnetic nanoparticles for biomedical applications: from the soul of the Earth to the deep history of ourselves. *ACS Applied Bio Materials*, 4 (8), 5839–5870. <https://doi.org/10.1021/acsabm.1c00440> [in English].

Peng, Y., Chen, L., Ye, S., Kang, Y., Liu, J., Zeng, S., & Yu, L. (2020). Research and development of drug delivery systems based on drug transporter and nano-formulation. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 15(2), 220–236. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2020.02.004> [in English].

Peng, Z., Liu, X., Zhang, W., Zeng, Z., Liu, Z., Zhang, C., Liu, Y., Shao, B., Liang, Q., Tang, W., & Yuan, X. (2020). Advances in the application, toxicity and degradation of carbon nanomaterials in environment: A review. *Environment International*, 134, 105298. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105298> [in English].

Shalmani, A.A., Sarihi, P., & Raoufi, M. (2019). Nanoparticles and biological environment interactions. In: Rahmandoust M., Ayatollahi M. (eds) *Nanomaterials for Advanced Biological Applications. Advanced Structured Materials*, Springer, Cham, 104, 1–17. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10834-2_1 [in English].

Tian, S., Jiang, J., Zang, S., Wang, K., Yu, Y., Li, X., Zhang, H., Yu, A., & Zhang, Z. (2018). Determination of IgG by electron spin resonance spectroscopy using Fe_3O_4 nanoparticles as probe. *Microchemical Journal*, 141, 444–450. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.06.001> [in English].

Vega-Vásquez, P., Mosier, N.S., & Irudayaraj, J. (2020). Nanoscale drug delivery systems: from medicine to agriculture. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 79. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00079> [in English].

Отримано: 03.11.2025

Прийнято: 05.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

