

УДК 57.013; 576.52

С.В. Горобець¹, Ю.М. Чиж¹, О.В. Ковальов^{1,2}, І.О. Шпетний³

¹Національний технічний університет України "КПІ", Київ, Україна

²КП "УЖКГ", Чернігів, Україна

³Сумський державний університет, Суми, Україна

ЕФЕКТИВНІСТЬ МАГНІТОКЕРОВАНОГО БІОСОРБЕНТУ НА ОСНОВІ ДРІЖДЖІВ *SACHAROMYCES CEREVISIAE* ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

Problems. The problems of magnetically labeled biosorbent (MLBS) associated with a reduction its sorption capacity due to competition of magnetic nano- and micro-particles and heavy metal ions for binding sites on the surface resulting biosorbent.

Objective. The main goal is to investigate the effectiveness of removal of Cu^{2+} ions by magnetically labeled biosorbent based *Sacharomyces cerevisiae* yeast by mixing magnetohydrodynamic (MHD) in crossed electric and magnetic fields and set the optimal technological parameters of the process.

Methods of implementation. The study was conducted at the experimental setup for modification of biosorbent in external electric and magnetic fields.

Results. In experimental studies it was found that the optimum of the pH for the manufacture of magnetically labeled biosorbent by MHD mixing in crossed electric and magnetic fields is $\text{pH} = 2.5$. It is shown that at $\text{pH} = 2.5$ is the maximum extraction of copper cations after 10 minutes at MHD mixing.

Conclusions. The optimal preparation time of MLBS by MHD mixing in crossed electric and magnetic fields, is 6 minutes. We studied magnetic susceptibility of complexes magnetic labels – yeast cell, set the optimum of technological parameters of the process: mixing time, pH value, magnetic field and electric field, studied the stability of the magnetic properties of MLBS.

Keywords: magnetically labelled biosorbent; biosorption; magnetic nanoparticles; crossed electric and magnetic fields.

Вступ

Останніми роками широко використовуються методи видалення іонів важких металів і радіонуклідів зі стічних вод [1–3] та концентрування дороговісних і рідкісних металів з руд мікроорганізмами [4, 5]. Накопичення мікроорганізмами катіонів важких металів із водних розчинів відбувається біосорбцією. Відомо, що мікробна біомаса може утримувати більш значні кількості іонів металів, ніж потрібно для їх метаболізму, що дає перспективу широкого застосування мікроорганізмів у біотехнологічних способах очищення стічних вод від іонів важких металів, токсинів, радіонуклідів та використання мікроорганізмів у біометалургії [4]. Дріжджі *S. cerevisiae* мають значний потенціал в акумуляції широкого діапазону катіонів металів, зокрема Cd^{2+} , Cr^{3+} , Cr^{6+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} і Zn^{2+} [1, 6].

Використання магнітомічених клітин дріжджів для біосорбції іонів важких металів досліджується більше двадцяти років [6–9]. Проблеми створення магнітокерованого біосорбенту (МКБС) пов'язані зі зниженням його сорбційної ємності за рахунок конкуренції магнітних нано- та мікрочастинок й іонів важких металів за сайти зв'язування на поверхні отриманого біосорбенту [6–9]. При отриманні МКБС пере-

важно використовуються механічне перемішування [7] та багатовихрове магнітогідродинамічне перемішування (МГДП) [8, 9] біомаси дріжджів *S. cerevisiae* з магнітними мікрочастинами [7] та наночастинами (магнітною рідиною) [8, 9]. Магнітні наночастилки при отриманні МКБС під час механічного перемішування адсорбуються на поверхні біосорбенту за рахунок сил Ван-дер-Ваальса, і в процесі сорбції іонів металів МКБС відбуваються десорбція та повторна сорбція магнітних наночастинок, що призводить до нестабільності магнітної сприйнятливості МКБС.

Лабораторні дослідження сорбції іонів важких металів магнітоміченими дріжджами показали, що сорбційна ємність МКБС, виготовленого за допомогою багатовихрового МГДП, практично не знижується порівняно з нативними дріжджами, оскільки переважна більшість магнітних наночастинок при отриманні магнітокерованого біосорбенту при багатовихровому МГДП потрапляє в периплазматичний простір та не заповнює сайти зв'язування на поверхні біосорбенту [8, 10, 11]. Але метод багатовихрового МГДП [8, 12] потребує періодичної заміни високоградієнтних феромагнітних насадок у перемішувальному пристрої для надання магнітних властивостей біосорбенту.

Постановка задачі

Метою роботи є визначення оптимальних параметрів одержання МКБС на основі дріжджів *S. cerevisiae* та наночастинок магнетиту методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях, при яких процес десорбції магнітних наночастинок, що використовуються для надання біосорбенту магнітних властивостей, є мінімальним, а також дослідження ефективності вилучення цим МКБС іонів Cu^{2+} .

Матеріали і методи

Відповідно до мети роботи було визначено оптимальні параметри одержання МКБС: швидкість перемішування суспензії дріжджів з магнітною рідиною, силу струму та напруженість зовнішнього магнітного поля, що створюються в перемішувальному пристрої при МГДП, рН середовища і тривалість процесу одержання біосорбенту при МГДП у схрещених електричному та магнітному полях.

Опис установки для модифікації біосорбенту в зовнішніх електричному і магнітному полях. Розроблено експериментальну установку для модифікації біосорбенту в зовнішніх електричному і магнітному полях (рис. 1). Установка складається з комірці 1 з електродами 2, 3, джерела живлення постійного струму 4, універсального вимірювального приладу 5, перемикача полярності електродів 6 і магнітної системи 7.

Комірка являє собою циліндр з немагнітного матеріалу, діаметром 65 мм. Як матеріал

для електродів було вибрано низьковуглецеву феромагнітну сталь (сталь 65 Г, ГОСТ 14959–79). Один із електродів має вигляд циліндра зі сталеві пластиною товщиною 0,3 мм, другий електрод виготовлено зі сталевого стрижня діаметром 3 мм, довжина циліндра і стрижня становила 36 мм.

Електроди 2, 3 закріплено в комірці 1 таким чином, що стрижень розміщений у центрі циліндричної комірки. Вибрана форма електродів і спосіб кріплення при прикладенні зовнішніх електричного і магнітного полів у взаємно перпендикулярних напрямках забезпечує обертальний рух електроліту в комірці.

Електрохімічну комірку 1 зі встановленими електродами 2, 3 поміщали в повітряний зазор електромагніту ЕМ-3. Струм між електродами 2, 3 подавали за допомогою джерела живлення постійного струму Б5-47 4. Вимірювання величини струму проводили універсальним вимірювальним приладом Ц434 5. Перемикачем 6 здійснювали зміну полярності електродів 2, 3.

Швидкість потоку рідини змінювали залежно від величини електричної напруги (інтервал зміни електричної напруги E від 0 до 29,9 В) та величини зовнішнього магнітного поля (інтервал зміни напруженості зовнішнього магнітного поля від 0 до 320 кА/м).

Магнітна система. Електромагнітна система установки (рис. 2) призначена для створення однорідного магнітного поля в зазорі між його полюсними наконечниками 1. У цій установці застосовується малогабаритний електромагніт, що має литий магнітопровід 2. Полюсні наконечники 1 електромагніту в перерізі квадратної форми зі стороною 120 мм. Дві електромагнітні котушки 3 з'єднані паралельно таким чином, щоб магнітне поле, що створюється кожною з них, було спрямоване в один бік. Основа установки 4 має спеціальні пази для переміщення двох електромагнітних котушок 3 для встановлення потрібної ширини зазору між полюсними наконечниками 1 для зміни величини зовнішнього магнітного поля. Конструкція електромагніту дає можливість регулювати робочий зазор у діапазоні 10–150 мм. Для процесу спостереження створена система освітлення, що складається з електролампи 5 на 15 Вт і дзеркала 6. До установки на

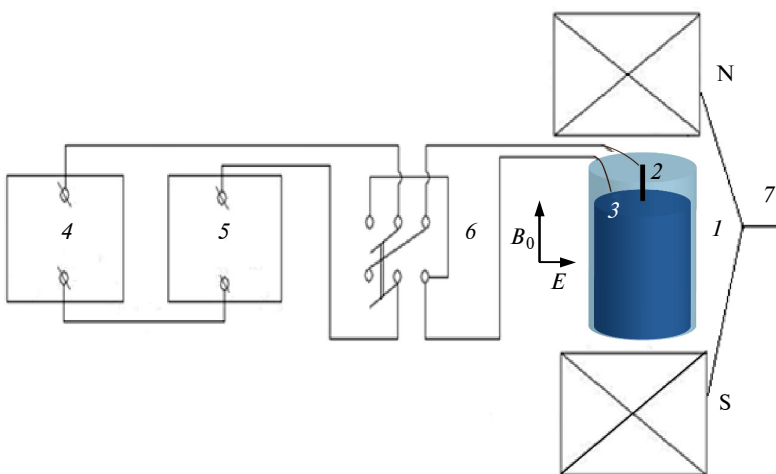


Рис. 1. Схема експериментальної установки для отримання МКБС при МГДП у зовнішніх електричному і магнітному полях: 1 – комірка, 2, 3 – електроди, 4 – джерело живлення постійного струму, 5 – універсальний вимірювальний прилад, 6 – перемикач полярності електродів, 7 – магнітна система

двох немагнітних металевих стрижнях 7 кріпиться відеокамера 8, яка підключена до персонального комп'ютера для візуалізації процесу перемішування.

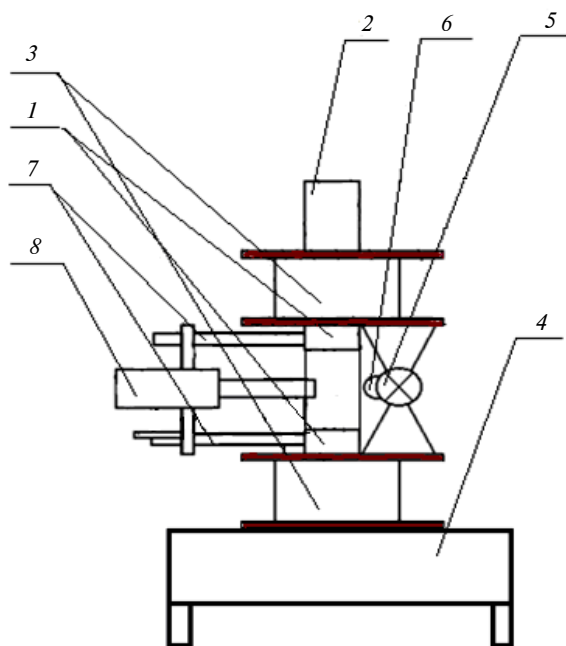


Рис. 2. Схема електромагнітної системи: 1 – полюсні накопичувачі; 2 – литий магнітопровід електромагніту; 3 – електромагнітні котушки; 4 – основа установки; 5 – електролампа; 6 – дзеркало; 7 – немагнітні металеві стрижні, 8 – відеокамера

Методика отримання МКБС при МГДП у схрещених електричному і магнітному полях. Для проведення експериментів використовували дріжджі хлібопекарські пресовані *S. cerevisiae* виробництва ЗАТ “Ензим”. Нативний біосорбент отримували змішуванням дріжджової біомаси *S. cerevisiae* з концентрацією 8×10^9 кл/л з водним розчином необхідної кислотності (біосорбент готували при $\text{pH} = 2,5; 3; 4$).

Біомасу дріжджів змішували з розчином нанорозмірного магнетиту так, щоб відношення маси біосорбенту до маси наночастинок магнетиту становило 100:1, при цьому концентрація дріжджових клітин дорівнювала 8×10^9 кл/л (100 мг сухих дріжджів на 1 л), а концентрація наночастинок магнетиту у вихідному розчині – 1 мг/л. Водний розчин наномангнетиту (Fe_3O_4), стабілізований перхлорною кислотою, був одержаний за допомогою стандартної методики [13]. Максимальна довжина таких частинок становить 22,4 нм, а максимальна ширина – 19,3 нм, тоді як мінімальна ширина – 0,4 нм, а мінімальна довжина – 0,7 нм (рис. 3).

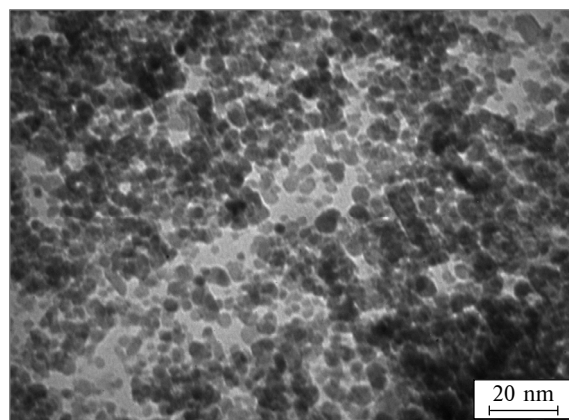


Рис. 3. ТЕМ зображення магнітних наночастинок, отриманих у МП напруженістю 240 кА/м

З метою оптимізації процесу МГДП для інтенсифікації процесу сорбції іонів Cu^{2+} дріжджами досліджували параметри, за яких сорбційна здатність дріжджів при МГДП у схрещених електричному і магнітному полях була б максимальною. Для цього проводили дослідження залежності концентрації іонів міді від часу сорбції за різних pH розчину та величини електричного поля. Отримання МКБС проводили в зовнішньому магнітному полі, напруженістю 240 кА/м, оскільки подальше збільшення напруженості зовнішнього магнітного поля, як і при багатовихровому МГДП, практично не впливало на ступінь вилучення катіонів міді.

Досліджували сорбційну здатність МКБС, виготовленого при $\text{pH} = 2,5; 3; 4$, [9], оскільки за таких значень pH було встановлено таку ж швидкість перемішування біомаси дріжджів з магнітною рідиною при отриманні МКБС, як і при багатовихровому МГДП [8].

На відміну від МГДП, у схрещених зовнішніх електричному та магнітному полях багатовихрове МГДП характеризується тим, що електричний струм в робочому розчині (а відповідно, і електричне поле) створюються спонтанно при перебігу електрохімічних реакцій на поверхні феромагнітних елементів (наприклад, сталевих стрижнів), як це було показано в [14]. Але для обох видів МГДП – багатовихрового і в схрещених зовнішніх електричному і магнітному полях – спостерігається збільшення швидкості робочого розчину зі збільшенням напруженості зовнішнього магнітного поля. Дійсно, зі збільшенням напруженості зовнішнього магнітного поля зростає сила Лоренца, яка діє на одиницю об'єму робочого розчину при протіканні в ньому електричного струму у напрямку, не ко-

лінійному до напрямку прикладеного зовнішнього магнітного поля. Тобто обидва види МГДП мають однакову фізичну природу. Отже, електричне поле було підібрано в такому діапазоні, в якому відбувалася зміна швидкості розчину при багатовихровому МГДП.

Після процесу створення комплексів магнітні наномітки–дріжджова клітина МКБС піддавався фракціонуванню [15]. Як феромагнітні насадки для вилучення немагнітної фракції магнітним сепаратором використовувались сталеві нікельовані сітки з розміром комірок 0,5 мм [15].

Методика імітації біосорбції для дослідження стабільності магнітної сприйнятливості МКБС. Після отримання МКБС методом МГДП у схрещених електричному і магнітному полях перевіряли стабільність магнітної сприйнятливості для встановлення оптимального часу перемішування при отриманні МКБС. Для цього здійснювали процес механічного перемішування отриманого МКБС при параметрах системи, які відтворюють (імітують) процес біосорбції іонів важких металів без додавання іонів міді: рН = 5,5; концентрація біомаси дріжджів – 4 г/л; швидкість перемішування – 180 об/хв, максимальний час перемішування 50 хв [16]. Кожні 10 хв відбирали пробу та центрифугували (центрифуга ЦЛМН-Р10-01 “Елекон”, частота обертання ротора – 1500 об/хв) протягом 10 хв. Магнетит, який був десорбований з поверхні МКБС у процесі перемішування (тобто в процесі імітації сорбції іонів міді [10]), залишався у надосадовій рідині, яку досліджували на магнітну сприйнятливість.

Методика вимірювання магнітної сприйнятливості. Магнітну сприйнятливість визначали на експериментальній установці для вимірювання магнітної сприйнятливості зразків методом, що ґрунтується на використанні радіотехнічного резонансного методу дослідження магнітної сприйнятливості зразків.

Установка містить осцилограф, електронний частотомір обчислювальний, вимірювач добротності та LC-контур. LC-контур складається з конденсатора і соленоїда, виготовленого з мідного проводу. Всередину соленоїда вноситься циліндричний контейнер для зразка. Сигнал від генератора вимірювача добротності подається на LC-контур. За допомогою осцилографа здійснюється візуальне спостереження за сигналом. Частотоміром визначається вели-

чина резонансної частоти контуру. Визначення магнітної сприйнятливості проводили на частотах 12–20 МГц з похибкою, що не перевищує 0,2 % [16].

Методика проведення біосорбції для дослідження ефективності вилучення Cu^{2+} МКБС. Біосорбцію МКБС проводили при механічному перемішуванні розчину протягом 60 хв. Параметри системи описані вище. Початкова концентрація іонів Cu^{2+} – 50 мг/л. Кожні 10 хв відбирали пробу та пропускали через фільтрувальний папір (діаметр пор – 10 нм) для видалення магнітомічених дріжджових клітин.

Методика вимірювання сорбційної здатності МКБС. Визначення концентрації іонів міді проведено за допомогою спектрофотометра ULAB 102. Розчин міді концентрацією до 100 мг/л являє собою безбарвну рідину. Методика визначення наявності іонів Cu^{2+} у розчині основана на реакції цього металу з водним розчином аміаку: $\text{Cu}^{2+} + 4\text{NH}_3 = [\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$, у результаті якої розчин набуває синього відтінку. Довжина хвилі, на якій проводились вимірювання оптичної густини, дорівнювала 590 нм.

Результати і їх обговорення

Дослідження сорбційної здатності МКБС залежно від рН та величини електричного поля при його виготовленні. Досліджували сорбційну здатність магнітокерowanego біосорбенту, виготовленого при рН = 2,5 (рис. 4, а); рН = 3 (рис. 4, б); рН = 4 (рис. 4, в) та електричній напрузі від 0,3 до 0,7 В при МГДП в електричному і магнітному полях.

Проведені дослідження показали, що якщо МКБС отримано при рН = 2,5 (рис. 4, а), то при сорбції іонів міді в процесі механічного перемішування максимальне вилучення катіонів міді відбувається вже через 10 хв, на відміну від МКБС, отриманого при рН 3 (рис. 4, б) та 4 (рис. 4, в), тобто при збільшенні рН, під час отримання МКБС, необхідно збільшувати час перемішування МКБС із середовищем, що очищується, при якому відбувається максимальне вилучення катіонів міді.

Як видно з рис. 4, максимальна сорбційна здатність МКБС спостерігається при напрузі 0,5 В та рН = 2,5, що свідчить про оптимальність цих параметрів для виготовлення МКБС.

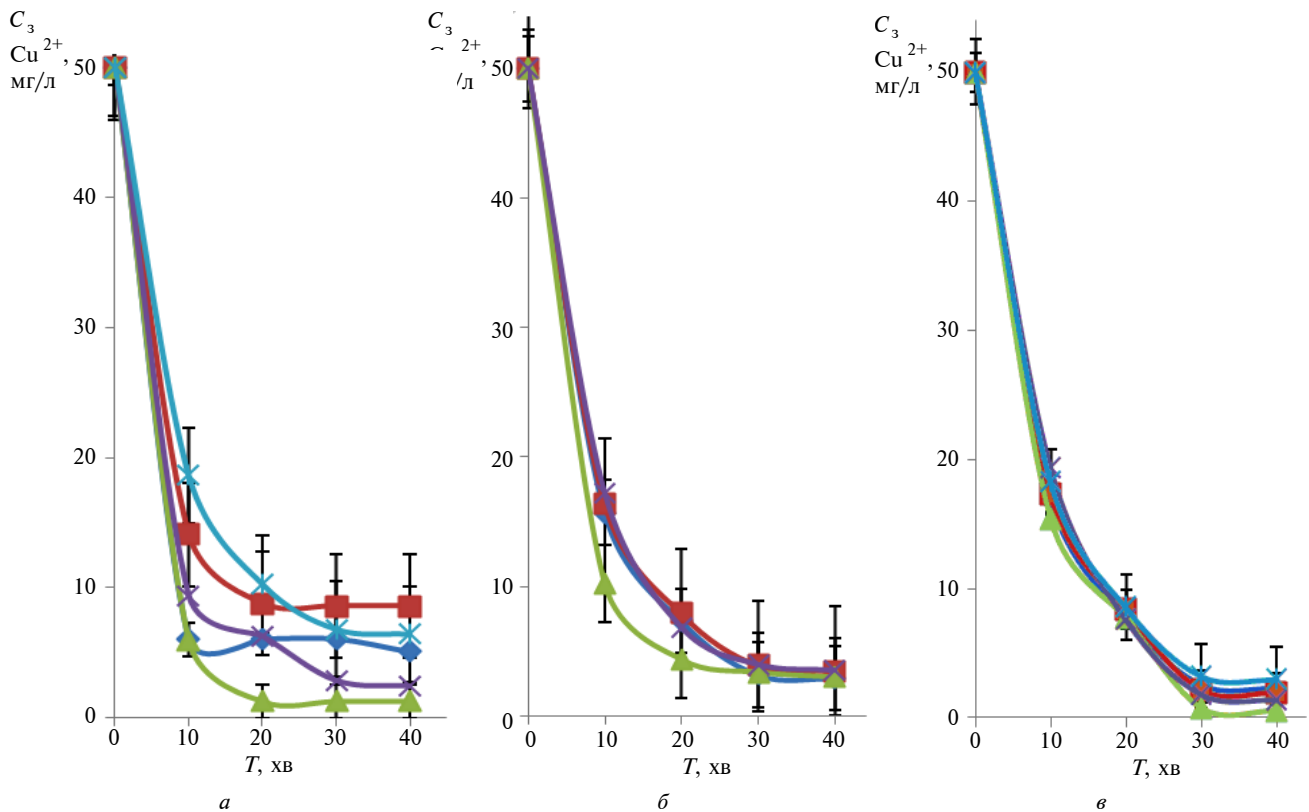


Рис. 4. Сорбційна здатність (C_3) модифікованого МКБС, виготовленого методом МГДП у схрещених магнітному та електричному полях при рН = 2,5 (а), де $U = 0,3$ В, $U = 0,4$ В, $U = 0,5$ В, $U = 0,6$ В, $U = 0,7$ В; рН = 3 (б), де $U = 0,3$ В, $U = 0,4$ В, $U = 0,5$ В, $U = 0,6$ В; рН = 4 (в), де $U = 0,3$ В, $U = 0,4$ В, $U = 0,5$ В, $U = 0,6$ В, $U = 0,7$ В

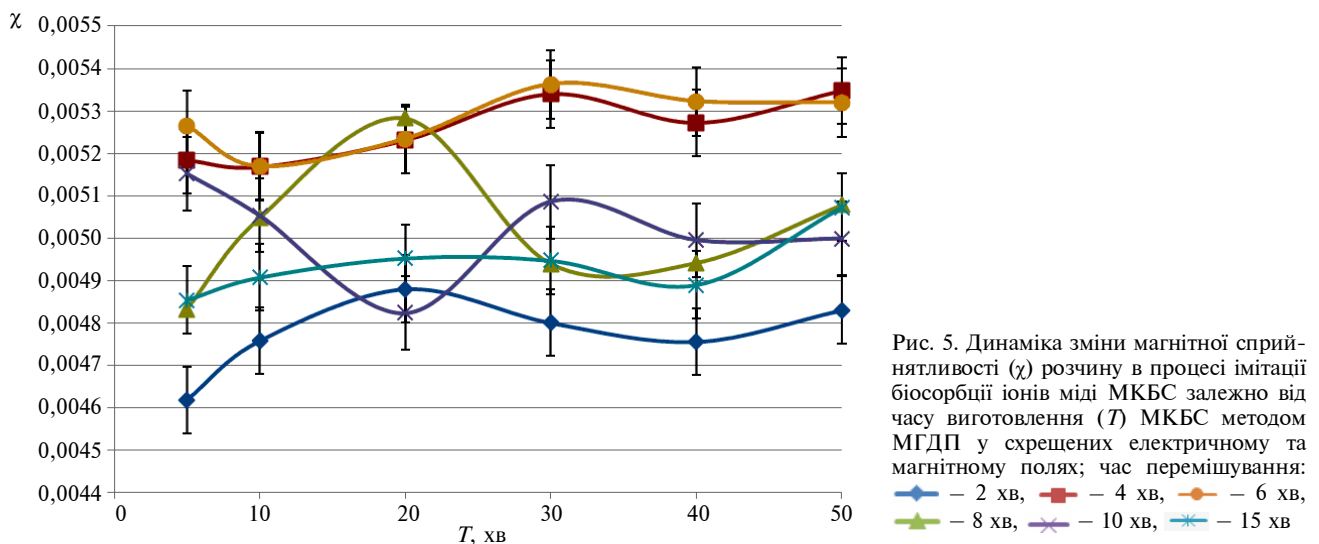


Рис. 5. Динаміка зміни магнітної сприйнятливості (χ) розчину в процесі імітації біосорбції іонів міді МКБС залежно від часу виготовлення (T) МКБС методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях; час перемішування: $U = 2$ хв, $U = 4$ хв, $U = 6$ хв, $U = 8$ хв, $U = 10$ хв, $U = 15$ хв

Визначення оптимального часу перемішування біосорбенту при його виготовленні. Побудовано графік залежності магнітної сприйнятливості розчину впродовж процесу імітації біосорбції МКБС від часу перемішування в МГДП-змішувачі, тобто від часу отримання

МКБС при МГДП у схрещених електричному та магнітному полях (рис. 5).

З рис. 5 видно, що оптимальний час для отримання МКБС методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях становить близько 6 хв, оскільки такий біосорбент має

максимальну (рис. 6) та найбільш стабільну магнітну сприйнятливості (див. рис. 5). З рис. 6 видно, що 2–4 хв МГДП для приготування МКБС недостатньо для приєднання магнітних міток до клітинної стінки біосорбенту і для проникнення магнітних наночастинок у периплазматичну область клітинної стінки дріжджів (див. рис. 5), хоча зміна магнітної сприйнятливості МКБС у процесі імітації сорбції міді мінімальна і становить 3% від середнього значення величини магнітної сприйнятливості.

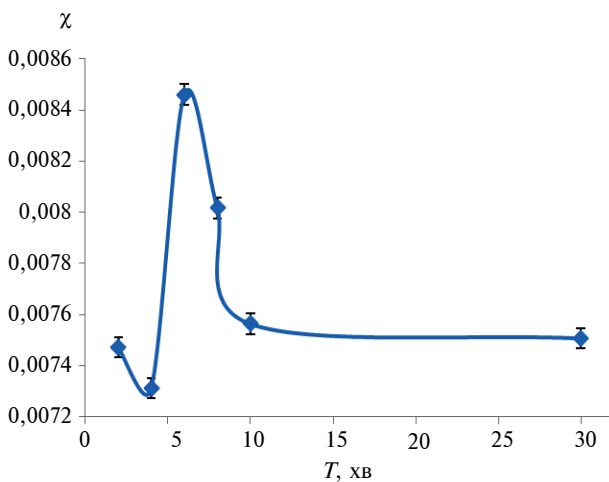


Рис. 6. Динаміка зміни магнітної сприйнятливості (χ) МКБС на основі дріжджів *S. cerevisiae* при його виготовленні методом МГДП у схрещених електричному і магнітному полях

Зміна магнітної сприйнятливості МКБС, час виготовлення якого більше 8 хв при МГДП у схрещених електричному і магнітному полях, в процесі імітації сорбції міді (див. рис. 5) становить 8% від середнього значення величини магнітної сприйнятливості.

Методом растрової електронної мікроскопії на приладі РЕМТ-100 було досліджено топологію поверхні МКБС, приготованих при 6 і

15 хв МГДП у схрещених електричному і магнітному полях (рис. 7).

З рис. 7 видно, що клітини МКБС, отриманого при 6 хв перемішування методом МГДП у схрещених електричному і магнітному полях, мають чітку форму та розміри і практично не відрізняються за морфологією від нативних клітин дріжджів, а при 15 хв перемішування морфологія клітин значно змінюється.

За даними рис. 5–8 можна зробити висновок, що при виготовленні МКБС методом МГДП у схрещених електричному і магнітному полях після 8-ї хвилини імітації сорбції методом механічного перемішування відбувається процес руйнування клітинної стінки, оскільки наночастинок магнетиту не тільки десорбуються в розчин з поверхні біосорбенту, а й потрапляють у розчин з периплазматичної області дріжджів.

Таким чином, оптимальний час для отримання магнітокерованого біосорбенту методом МГДП у схрещених електричному і магнітному полях, з точки зору стабільності магнітних властивостей, становить 6 хв, оскільки такий біосорбент є найбільш стабільним і десорбція магнітних наноміток у процесі механічного перемішування (імітації сорбції іонів міді) перебуває в межах похибки.

МКБС, отриманий методом механічного перемішування, має нестабільні магнітні властивості в процесі біосорбції іонів металів. Це узгоджується з даними [10] про те, що в процесі механічного перемішування біосорбенту з іонами важких металів відбувається пасивна біосорбція.

З рис. 9 видно, що похибка магнітної сприйнятливості розчину після центрифугування (імітована сорбція проводилась біосорбентом, виготовленим методом механічного перемішування) становить 8% і не спостеріга-

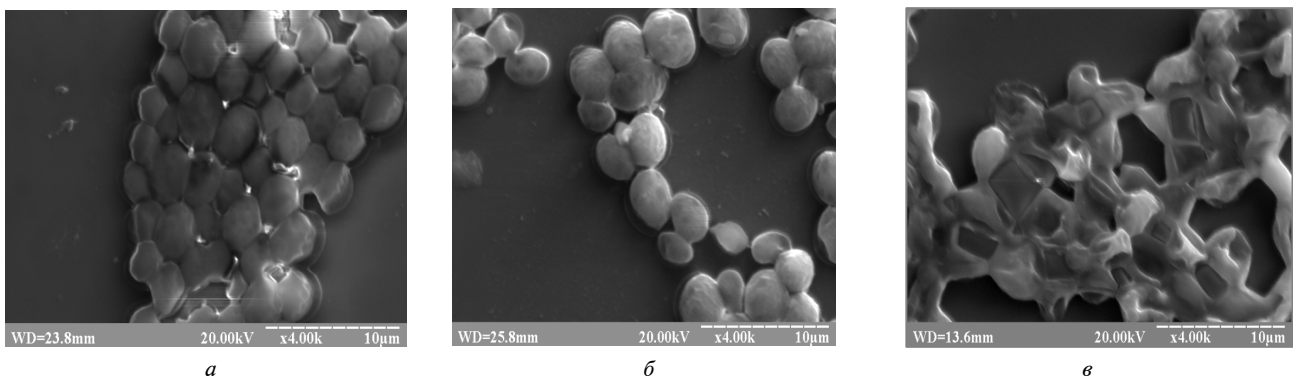


Рис. 7. Електронно-мікроскопічне зображення клітини МКБС, отриманих методом МГДП у схрещених електричному і магнітному полях: а – нативні дріжджі; б – при 6 хв перемішування; в – при 15 хв перемішування

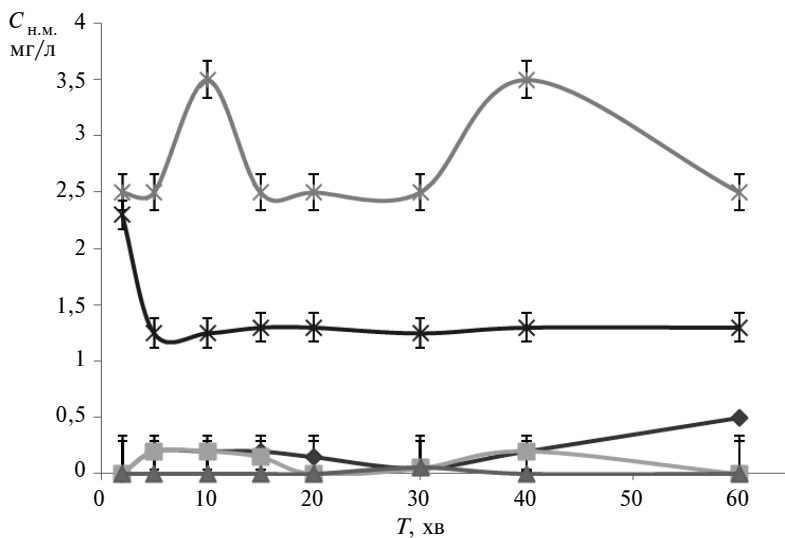


Рис. 8. Динаміка зміни концентрації $C_{н.м.}$ наночастинок магнетиту в розчині в процесі імітації біосорбції іонів міді МКБС методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях протягом: \blacklozenge – 2 хв, \blacksquare – 4 хв, \blacktriangle – 6 хв, \times – 10 хв, \ast – 15 хв

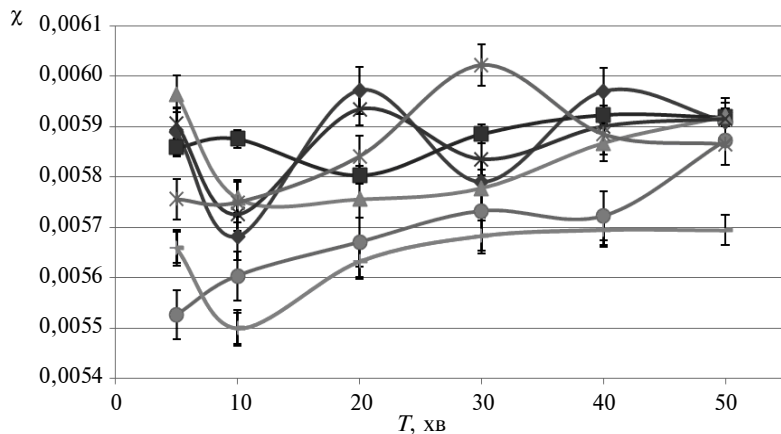


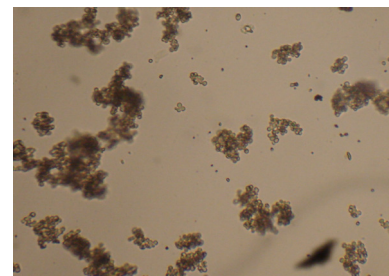
Рис. 9. Динаміка зміни магнітної сприйнятливості розчину (χ) в процесі імітації біосорбції іонів міді МКБС залежно від часу виготовлення (T) МКБС методом механічного перемішування протягом: \blacklozenge – 2 хв, \blacksquare – 4 хв, \blacktriangle – 6 хв, \times – 8 хв, \ast – 10 хв, \bullet – 15 хв, \blacklozenge – 30 хв, \blacksquare – 60 хв

ється ніякої закономірності у зміні магнітної сприйнятливості, а при МГДП ця похибка становить 3 % при 4–6 хв перемішування і 8 % при 8–10 хв приготування біосорбенту. При виготовленні біосорбенту методом МГДП магнітна сприйнятливості на 30 % більша, ніж при механічному перемішуванні. Отже, МКБС, виготовлений методом механічного перемішування, має меншу магнітну сприйнятливості та є нестабільним.

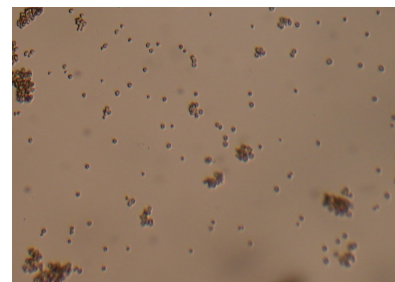
Крім того, як показано у працях [7, 8, 10], локалізація магнітних наночастинок на поверхні

клітини призводить до зменшення кількості активних сайтів зв'язування іонів важких металів та зменшує ефективність вилучення іонів важких металів із робочих середовищ.

Крім того, МКБС, отриманий при МГДП, майже не схильний до кластеризації, тобто має більшу площу поверхні, де звільнюються сайти зв'язування для іонів важких металів, ніж МКБС, отриманий при механічному перемішуванні МКБС, який утворює кластери, що добре видно з рис. 10.



a



b

Рис. 10. Оптичне зображення МКБС, отриманих різними методами перемішування: *a* – механічне перемішування; *b* – МГДП у схрещених електричному і магнітному полях

Висновки

В експериментальних дослідженнях було встановлено оптимальний час приготування МКБС методом МГДП у схрещених електричному і магнітному полях, що становить 6 хв.

Досліджено магнітну сприйнятливості комплексів магнітні мітки–дріжджова клітина. Магнітна сприйнятливості суспензій МКБС лежить у діапазоні $7,3\text{--}8,4 \cdot 10^{-4}$ і найбільша для комплексів, утворених при 6 хв МГДП.

Встановлено, що при виготовленні МКБС методом МГДП магнітна сприйнятливості на 30 % більша, ніж при механічному перемішу-

ванні. Отже, біосорбент, виготовлений методом механічного перемішування, має меншу магнітну сприйнятливості та є нестабільним.

Проведено дослідження сорбційної ємності МКБС залежно від величини рН та від величини електричного поля. В експериментальних дослідженнях було встановлено, що оптимальне значення рН для виготовлення магнітокеро-ваного біосорбенту методом МГДП у схрещених електричному і магнітному полях становить 2,5.

Показано, що при рН = 2,5 відбувається максимальне вилучення катіонів міді вже через 10 хв МГДП, на відміну від рН 3 та 4, тобто при збільшенні рН необхідно збільшувати час перемішування магнітокеро-ваного біосорбенту з очищуваним середовищем, що є нетехнологічним.

У перспективі планується дослідження активної та пасивної біосорбції МКБС, виготовленого при МГДП у схрещених електричному і магнітному полях.

Список літератури

1. *Белорусская научно-техническая программа “Триботехника”* / Ю.М. Плескачевский, В.Н. Савицкий, В.В. Кончиц, В.А. Барабась // *Трение и износ.* – 1995. – **16**, № 3. – С. 404–415.
2. *Сиваченко Л.А., Селезнев Н.Г., Шуляк В.А.* Проблема износа рабочего оборудования дробильно-размольных машин // *Трение и износ.* – 1995. – **16**, № 3. – С. 599–609.
3. *Bao J., Newkirk J.W., Bao S.* Wear-resistant WC composite hard coatings by brazing // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2004. – **13**, № 4. – P. 385–388.
4. *Berns H.* Comparison of wear resistant MMC and white cast iron // *Wear.* – 2003. – **254**. – P. 47–54.
5. *Elevated temperature sliding wear behavior of WCP-reinforced ferrous matrix composites* / Yan-pei Song, Hua Yu, Jun-guang He, Hui-gai Wang // *J. Mater. Sci.* – 2008. – № 4. – P. 38–47.
6. *Серебряков С.П.* Развитие центробежного литья точных отливок. – Ярославль: ЯПИ, 1986. – 80 с.
7. *Степанчук А.М., Степанов О.В., Гончарук О.Й.* Експлуатаційні властивості самофлюсівних сплавів на основі заліза, одержаних з використанням недефіцитної сировини // *Наукові нотатки.* – Луцьк: ЛТДУ, 2004. – Вип. 4. – С. 317–330.
8. *Савельев И. В.* Курс общей физики. – М.: Наука, 1970. – Т. I. Механика, колебания и волны, молекулярная физика. – 511 с.
9. *Шевченко А.И.* Центробежное литье под флюсом. – К.: Наук. думка, 1991. – 192 с.
10. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. – М.: Физматлит, 2001. – Т. VI. Гидродинамика. – 736 с.
11. *Моделирование плотных материалов методом упаковки сферополиэдров* / В.В. Мизгулин, Р.М. Кадушников, В.М. Алиевский, Д.М. Алиевский // *Компьютерные исследования и моделирование.* – 2012. – **4**, № 4. – С. 757–766.
12. *Сергеев В.В., Рудь В.Д., Гуменюк Л.О.* Дослідження щільності стохастичних упаковок часток при застосуванні вібрацій // *Наукові нотатки.* – Луцьк: ЛДТУ. – 2009. – Вип. 14. – С. 279–288.
13. *Степанчук А.Н.* Закономерности прессования порошковых материалов. – К.: УМК ВО, 1992. – 176 с.

References

1. Y.M. Pleskachevsky *et al.*, “The Belarusian scientific and technical program “tribotechnology”, *Friction and Wear*, vol. 16, no. 3, pp. 404–415, 1995 (in Russian).
2. L.A. Sivachenko *et al.*, “Wear problem working, grinding, crushing machines”, *Friction and Wear*, vol. 16, no. 3, pp. 599–609, 1995 (in Russian).
3. J. Bao *et al.*, “Wear-resistant WC composite hard coatings by brazing”, *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 13, no. 4, pp. 385–388, 2004.
4. H. Berns, “Comparison of wear resistant MMC and white cast iron”, *Wear*, no. 254, pp. 47–54, 2003.
5. Yan-pei Song *et al.*, “Elevated temperature sliding wear behavior of WCP-reinforced ferrous matrix composites”, *J. Mater. Sci.*, no. 4, pp. 38–47, 2008.
6. S.P. Serebrjakov, *Development centrifugal casting precision castings*. Yaroslavl, Russia: YaNP, 1986, 80 p. (in Russian).
7. A.M. Stepanchuk, “Performance features self-fluxing alloys based on iron obtained using non-deficient materials”, in *Naukovy Notatky*. Lutsk, Ukraine: LTDU, vol. 4, 2004, pp. 317–330 (in Ukrainian).
8. I.V. Saveliev, *Course of General Physic*, vol. 1, *Mechanics, Fluctuations and Waves, Molecular Physics*. Moscow, Russia: Nauka, 1970, 511 p. (in Russian).
9. A.I. Shevchenko, *Tsentrobeznoye litye pod flux*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 1991, 192 p. (in Russian).
10. L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *Theoretical Physics*, vol. 4. *Hydrodynamics*. Moscow, Russia: Fizmatlit, 2001, 736 p. (in Russian).

11. V.V. Mizgulin *et al.*, "Modeling dense packing materials by Sphere-Polyhedra", *Computer Studies and Modeling*, vol. 4, no. 4, pp. 757–766, 2012 (in Russian).
12. V.V. Sergeev *et al.*, "Research density packaging stochastic particle vibration application", in *Naukovy Notatky*. Lutsk, Ukraine: LTDU, vol. 14, 2009, pp. 279–288 (in Ukrainian).
13. A.N. Stepanchuk, *Laws of Compaction of Powder Materials*. Kyiv, Ukraine: UMK VO, 1992, 176 p. (in Russian).

Горобець С.В., Чиж Ю.М., Ковальов О.В., Шпетний І.О.

ЕФЕКТИВНІСТЬ МАГНІТОКЕРОВАНОГО БІОСОРБЕНТУ НА ОСНОВІ ДРІЖДЖІВ *SACHAROMYCES CEREVISIAE* ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД

Проблематика. Проблеми створення магнітокерovanого біосорбенту (МКБС) пов'язані зі зниженням його сорбційної ємності за рахунок конкуренції магнітних нано- та мікрочастинок й іонів важких металів за сайти зв'язування на поверхні отриманого біосорбенту.

Мета дослідження. Мета роботи – дослідити ефективність вилучення іонів Cu^{2+} МКБС на основі дріжджів *Sacharomyces cerevisiae* методом магнітогідродинамічного перемішування (МГДП) у схрещених електричному та магнітному полях та встановити оптимальні технологічні параметри процесу.

Методика реалізації. Дослідження проводились на експериментальній установці для модифікації біосорбенту в зовнішніх електричному і магнітному полях.

Результати дослідження. В експериментальних дослідженнях було встановлено, що оптимальне значення рН для виготовлення МКБС методом МГДП у схрещених електричному і магнітному полях становить 2,5. Показано, що при рН = 2,5 відбувається максимальне вилучення катіонів міді вже через 10 хв при МГДП.

Висновки. Встановлено оптимальний час приготування МКБС методом МГДП у схрещених електричному і магнітному полях, що становить 6 хв. Досліджено магнітну сприйнятливість комплексів магнітні мітки–дріжджова клітина; встановлено оптимальні технологічні параметри процесу: час перемішування, рН середовища, напруженість магнітного поля та електричного поля. Досліджено стабільність магнітних властивостей МКБС.

Ключові слова. магнітокерований біосорбент; біосорбція; наночастинки магнетиту; схрещені електричне і магнітне поля.

Горобець С.В., Чиж Ю.Н., Ковалев А.В., Шпетний І.А.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОГО БИОСОРБЕНТА НА ОСНОВЕ ДРОЖЖЕЙ *SACHAROMYCES CEREVISIAE* ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Проблематика. Проблемы создания магнитоуправляемого биосорбента (МКБС) связаны со снижением его сорбционной емкости за счет конкуренции магнитных нано- и микрочастиц и ионов тяжелых металлов за сайты связывания на поверхности полученного биосорбента.

Цель исследования. Цель работы – исследовать эффективность извлечения ионов Cu^{2+} МКБС на основе дрожжей *Sacharomyces cerevisiae* методом магнитогидродинамического перемешивания (МГДП) в скрещенных электрическом и магнитном полях и установить оптимальные технологические параметры процесса.

Методика реализации. Исследования проводились на экспериментальной установке для модификации биосорбента во внешних электрическом и магнитном полях.

Результаты исследования. В экспериментальных исследованиях было установлено, что оптимальное значение рН для изготовления МКБС методом МГДП в скрещенных электрическом и магнитном полях составляет 2,5. Показано, что при рН = 2,5 происходит максимальное извлечение катионов меди уже через 10 мин при МГДП.

Выводы. Установлено оптимальное время приготовления МКБС методом МГДП в скрещенных электрическом и магнитном полях, составляющее 6 мин. Исследована магнитная восприимчивость комплексов магнитные метки–дрожжевая клетка; установлены оптимальные технологические параметры процесса: время перемешивания, рН среды, напряженность магнитного поля и электрического поля; исследована стабильность магнитных свойств МКБС.

Ключевые слова: магнитоуправляемый биосорбент; биосорбция; наночастицы магнетита; скрещенные электрическое и магнитное поля.

Рекомендована Радою
факультету біотехнології і біотехніки
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
4 лютого 2015 року