

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКАЦІЇ МАГНІТОМІЧЕНИХ ДРІЖДЖІВ *Saccharomyces cerevisiae* НА ВИЛУЧЕННЯ КАТІОНІВ МІДІ $\text{Cu}^{2+}$

Карпенко Ю. В.

### 1. Вступ

Розробка і вдосконалення методів очистки стічних вод від різних за походженням поллютантів, зокрема катіонів важких металів, таких як мідь, залізо та ін., залишаються актуальними і сьогодні. Дріжджі *S. cerevisiae* не являються найбільш ефективним біосорбентом важких металів, проте їх доступність переважає конкурентів значною мірою. До того ж цей вид дріжджів є добре дослідженим, що спрощує пошук шляхів модифікації або активації біомаси для біосорбції.

Сорбційна ємність по відношенню до катіонів міді  $\text{Cu}^{2+}$  магнітоміченого біосорбенту на основі дріжджів *S. cerevisiae*, отриманого за допомогою багатовихрового магнітогідродинамічного (МГД) перемішування, залежить від кількості прикріпленого нанорозмірного магнетиту  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  [1]. Пасивна біосорбція магнітоміченими дріжджами відбувається очевидно за рахунок стехіометричних співвідношень функціональних груп компонентів клітинної стінки до іонів металів і фізичної адсорбції за рахунок електричних взаємодій [2], а також за рахунок сорбції магнетитом. Магнетит володіє значним електрокінетичним потенціалом [3] і здатний сорбувати катіони міді. Карбоксильні і аміногрупи представлені в манан-білковому шарі і ліпопротеїдах можна розглядати у ролі основних груп, які залучені в пасивній біосорбції. Виникає необхідність виявити, яка кількість функціональних груп, а також компонентів клітинної стінки блокується магнетитом під час багатовихрового МГД перемішування.

### 2. Об'єкт дослідження і його технологічний аудит

Об'єкт дослідження – магнітомічений біосорбент. Магнітомічений біосорбент представляє собою суспензію клітин модифікованих прикріпленням магнітних міток до клітинної стінки за допомогою багатовихрового МГД перемішування. Технологічні характеристики магнітомічених дріжджів наступні:

- відношення маси магнітних міток до маси дріжджів – 1 %;
- сорбційна ємність по відношенню до катіонів міді  $\text{Cu}^{2+}$  – 25 мг/г сухої речовини сорбенту;
- магнітна сприйнятливність –  $5,5 \cdot 10^{-3}$ – $7 \cdot 10^{-3}$ ;
- оптимальне рН при біосорбції – 5,0–5,5;
- тривалість зберігання – 2 доби.

Параметри процесу виготовлення магнітомічених дріжджів (багатовихрове МГД перемішування):

- напруженість зовнішнього магнітного поля – 240–280 кА/м;
- рН робочого середовища – 2,5–3;
- тривалість виготовлення (циклу) – 2 хв.

Одним з основних недоліків магнітоміченого біосорбенту на основі дріжджів *S. cerevisiae* є низька сорбційна ємність у порівнянні з іншими біосорбентами, наприклад, бурими водоростями. Для збільшення сорбційної ємності дріжджів необхідно перш за все з'ясувати вклад компонентів клітинної стінки на пасивну сорбцію катіонів міді. Тому основним напрямком дослідження є виявлення вкладу компонентів клітинної стінки на сорбційну ємність магнітомічених дріжджів.

### **3. Мета та задачі дослідження**

*Мета роботи* – дослідити вплив хімічної модифікації біомаси на сорбційну ємність магнітоміченого біосорбенту на основі дріжджів *S. cerevisiae* і магнетиту Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Дослідити сорбційну ємність магнітомічених дріжджів, модифікованих методами, які дозволяють екстрагувати компоненти клітинної стінки або блокувати функціональні групи з точки зору біосорбції.
2. Порівняти результати з подібними дослідженнями для нативних дріжджів.
3. Дослідити сорбційну ємність виділених компонентів клітинної стінки магнітомічених дріжджів *S. cerevisiae* з точки зору функціональних груп, залучених у біосорбцію, і нанорозмірного магнетиту.

### **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Дослідження з видалення важких металів за допомогою біосорбції продовжуються зокрема в пошуку нових біосорбентів [4]. Дослідники приділяють увагу можливості модифікації клітинної стінки дріжджів для розкриття її потенціалу для видалення катіонів важких металів [5]. Так для розуміння механізмів біосорбції використовують різні методи обробки біомаси, наприклад, термічну [6], хімічну [7], а також методи нашарування необхідних компонентів [8]. Також в [8] відзначається життєздатність клітин після покриття шаром поліелектроліту. Прикріплення магнітних міток до дріжджових клітин відбувається дуже ефективно завдяки методу багатовихрового МГД перемішування [9]. Отриманий таким чином магнітомічений біосорбент знайшов своє впровадження в технології очистки вод гальванічного виробництва від міді і хрому, а також заліза [3].

Функціональні групи представлені на поверхні дріжджової клітини, такі як аміногрупи, карбоксильні, сульфгідрильні, фосфорильні сорбують катіони важких металів [10] з різною ефективністю. Нанорозмірний магнетит [11], який використовується для створення магнітомічених клітин [12], теж сорбує на своїй поверхні катіони металів. Так, в [13] показано, що магнетит є ефективним

сорбентом, проте недоліком є коагуляція частинок, що затрудняє його промислове використання. Промислове впровадження застосування дріжджів *S. cerevisiae* вже розглядається як реальна технологія для очистки стічних вод [14].

## 5. Методи досліджень

*Дріжджі S. cerevisiae.* Для кожного дослідження використовували 25 г пресованих дріжджів виробництва ПрАТ «Компанія Ензим» (Україна) з вологістю 74 %, які були розведені в дистильованій воді. Суспензію перемішували 60 хв при 120 об/хв для відділення з поверхні клітинної стінки продуктів життєдіяльності. Після перемішування суспензію дріжджів центрифугували при 2000 об/хв 10 хв для м'якого осадження клітин, осад промивали дистильованою водою до рН=5,5 – зразок 1.

*Магнітомічений біосорбент.* Для прикріплення магнітних міток до клітин дріжджів була використана магнітна рідина, отримана за методом [11]. Процес виготовлення магнітоміченого біосорбенту проводили за методикою описаною в роботі [3] за допомогою багатовихрового МГД перемішування. Для цього суспензію дріжджів об'ємом 100 см<sup>3</sup> змішували з магнітною рідиною так, щоб співвідношення маси дріжджів до маси магнітних міток складало 100:1. Отриманий розчин переносили в електрохімічну камеру з феромагнітною насадкою і доводили 56 % азотною кислотою HNO<sub>3</sub> до рН=2,5. Камеру встановлювали в робочому просторі магнітної системи, яка генерує постійне магнітне поле з напруженістю 240 кА/м. Перемішування проводили 2 хв. Після перемішування суспензію магнітоміченого біосорбенту направляли на магнітну сепарацію. Магнітну фракцію центрифугували при 2000 об/хв 10 хв, осад промивали дистильованою водою до рН = 5,5. Не магнітну фракцію повторно направляли на попередні етапи. Відмитий магнітомічений біосорбент був об'єднаний в одній ємності – зразок 2.

*Модифікація поверхні біосорбентів.* Половину за об'ємом суспензій зразків 1 і 2 направляли на обробку лугом (зразки 3 і 4 відповідно), а другу половину на обробку ацетоном (зразки 5 і 6 відповідно).

Обробку лугом проводили наступним чином [15]: доводили суспензію біосорбенту 0,1 н NaOH до рН = 10 і перемішували 2 год з одночасним підігрівом до 40 °С. Отриманий розчин залишали на добу при 4 °С, а потім центрифугували при 6000 об/хв 10 хв. Супернатант зливали окремо і вирівнювали рН = 5,5. Декантат відмивали до рН = 7 і направляли на біосорбцію катіонів міді Cu<sup>2+</sup>, або на подальші модифікації функціональних груп.

Екстракцію ліпідів проводили за методом [16] з розрахунку 75 мл ацетону на 1 г сухої маси дріжджів, перемішували 4 год з одночасним підігрівом до 40 °С. Отриманий розчин залишали на добу при 4 °С, а потім центрифугували при 6000 об/хв 10 хв. Як і в попередньому випадку, супернатант і декантат досліджувалися окремо.

Другу половину за об'ємом суспензій зразків 1,2 і екстрактів зразків 3–6 було знову розділено на 2 частини і направлено на хімічну обробку. Одна частина була модифікована формальдегідом з мурашиною кислотою (зразки 7,

8 і 11, 12), а друга – метанолом (зразки 9, 10 і 13–16). Для ліпідів зразків 5 і 6 метилювання аміногруп не виконувалось.

*Метилювання аміногруп.* Обробка формаліном (формальдегідом) має на меті денатурацію білків і блокування аміногруп. Обробку проводили за методом [17]. Для цього 5 г дріжджів розводили в 100 см<sup>3</sup> формальдегіду (НСНО), а потім в 200 см<sup>3</sup> мурашиної кислоти (НСООН). Отриману суміш перемішували 6 год при 150 об/хв з температурою 40 °С. Отримана біомаса була центрифугована при 2000 об/хв 10 хв, декантат був відмитий дистильованою водою з 0,2 М карбонатом натрію і використовувався для біосорбції.

*Етерифікація карбоксильних груп.* Обробку проводили за методом [18]. Нативні або магнітомічені дріжджі були розведені в 300 см<sup>3</sup> метанолу. До суспензії додавали 5 см<sup>3</sup> соляної кислоти в якості каталізатору. Розчин перемішували 6 год при 150 об/хв. Отримана суміш була центрифугована при 2000 об/хв 10 хв, декантат було відмито дистильованою водою з 0,2 М карбонатом натрію.

Обробку біомаси магнітомічених дріжджів і вилучених компонентів з клітинної стінки представлено в табл. 1.

**Таблиця 1**

Схема зразків експерименту

№ зразку	Вид модифікації					
	Прикріплення магнітних міток	Обробка суспензії		Екстракт з біомаси	Блокування функціональних груп	
		Луг	Ацетон		-NH <sub>2</sub>	-COOH
1	×	×	×	—	×	×
2	*	×	×	—	×	×
3	×	*	×	×	×	×
4	*	*	×	×	×	×
5	×	×	*	×	×	×
6	*	×	*	×	×	×
7	×	×	×	—	*	×
8	*	×	×	—	*	×
9	×	×	×	—	×	*
10	*	×	×	—	×	*
11	×	*	×	*	*	×
12	*	*	×	*	*	×
13	×	*	×	*	×	*
14	*	*	×	*	×	*
15	×	×	*	*	×	*
16	*	×	*	*	×	*

**Примітка:** «\*» позначено використану модифікацію, «×» – обробка не виконувалась, «—» – не можливо отримати

*Біосорбція катіонів міді.* Процес вилучення катіонів міді модифікованими зразками проводили з механічним перемішуванням 180 об/хв, тривалістю 60 хв при рН = 5,5. Для видалення відпрацьованого біосорбенту застосовували центрифугування при 10000 об/хв 5 хв. Магнітомічені зразки попередньо видаляли за допомогою магнітної сепарації, оскільки магнетит ефективно сорбує іони амонію, які використовуються для визначення концентрації міді в розчині.

*Високоградієнтна магнітна сепарція біосорбенту.* Для видалення відпрацьованого магнітоміченого біосорбенту розчин пропускали через магнітний сепаратор, який представляє собою ємність з високоградієнтною феромагнітною насадкою у формі сталеві сітки з коміркою 0,5 мм. Сепаратор працює в проточному режимі з продуктивністю 10 дм<sup>3</sup>/год, напруженість зовнішнього магнітного поля 300 кА/м. Вилучена маса магнітоміченого біосорбенту змивається з насадки сепаратора після процесу розділення пропусканням дистильованої води. За необхідності розчин біосорбенту концентрується за допомогою 2–3 послідовних центрифугувань при 2000 об/хв по 10 хв.

*Визначення оптичної густини розчинів.* Концентрацію дріжджів, магнітоміченого біосорбенту, а також магнетиту контролювали за допомогою спектрофотометрії при довжині хвилі 590 нм для всіх трьох видів зразків. Концентрацію катіонів міді (II) як початкову, так і кінцеву, визначали додаванням розчину аміаку і визначенням оптичної густини за синім забарвленням комплексів  $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$  при довжині хвилі 540 нм.

*Розрахунок сорбційної ємності екстрактів.* Для визначення вкладу в сорбційну ємність дріжджів екстрагованих речовин в розрахунках було використано різницю мас сухої речовини дріжджів до і після екстракції. Для розрахунку вкладу блокованих функціональних груп в екстрактах від сорбційної ємності екстракту віднімали сорбційну ємність екстракту з конктреною блокованою функціональною групою.

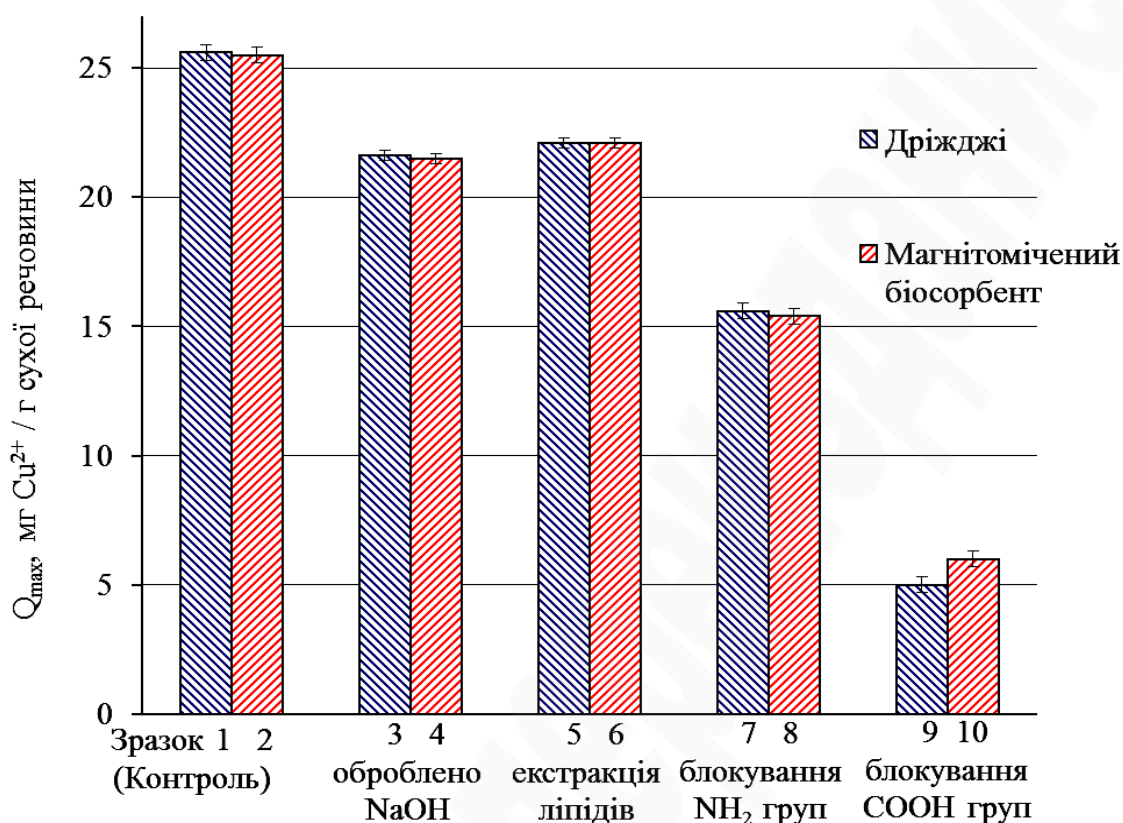
## **6. Результати досліджень**

Максимальна сорбційна ємність біосорбентів, отриманих з нативних і магнітомічених дріжджів шляхом модифікації клітинної стінки, представлені на рис. 1. Магнітомічені дріжджі були отримані методом багатовихрового МГД перемішування з наступними параметрами процесу:

- напруженість зовнішнього магнітного поля установки – 240 кА/м;
- рН робочого середовища – 2,5,
- тривалість процесу – 2 хв.

Співвідношення маси магнітних міток до маси дріжджів – 1 %, магнітна сприйнятливність комплексів магнітні мітки–дріжджова клітина –  $5,6 \pm 0,1 \cdot 10^{-3}$ . Як видно з рис. 1, магнітомічені і нативні дріжджі (зразки 1 і 2) володіють однаковою в межах похибки сорбційною ємністю, по відношенню до катіонів міді –  $25,5 \pm 0,3$  мг  $\text{Cu}^{2+}$ /г сухої речовини сорбенту. Така подібність пояснюється оптимізацією методу виготовлення магнітоміченого біосорбенту. Обробка суспензій нативних і магнітомічених дріжджів лугом NaOH призводить до

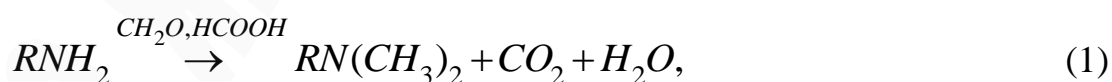
зменшення сорбційних ємностей обох зразків 3 і 4 в однакових кількостях – до  $21,6 \pm 0,2$  мг/г, що свідчить про те, що в структурі клітинної стінки залишаються однакові компоненти.



**Рис. 1.** Максимальна сорбційна ємність  $Q_{\max}$  модифікованих нативних і магнітомічених дріжджів по відношенню до катіонів міді  $\text{Cu}^{2+}$  в залежності від методу модифікації

Подібна ситуація спостерігається і при екстракції ліпідів з клітинної стінки обох біосорбентів за допомогою ацетону – зменшення ємності зразків 5 і 6 до  $22,1 \pm 0,2$  мг/г. Іншими словами, нанорозмірні магнітні мітки не локалізуються в клітинній стінці магнітомічених дріжджів на ліпідах.

З літературних джерел, наприклад [2], відомо, що серед усіх функціональних груп, представлених компонентами клітинної стінки, для біосорбції катіонів металів найбільш важливими є карбоксильні  $-\text{COOH}$  і аміногрупи  $-\text{NH}_2$ . На рис.1 представлено також порівняння сорбційних ємностей нативних і магнітомічених дріжджів у разі блокування цих функціональних груп. Так метилювання аміногруп формальдегідом і мурашиною кислотою за реакцією Ешвайлера-Кларка:

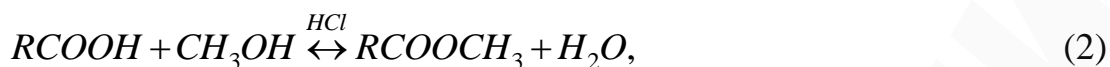


що призводить до зменшення сорбційної ємності по катіонам міді для нативних і магнітомічених дріжджів до  $15,6 \pm 0,3$  і  $15,4 \pm 0,3$  мг/г відповідно. Іншими



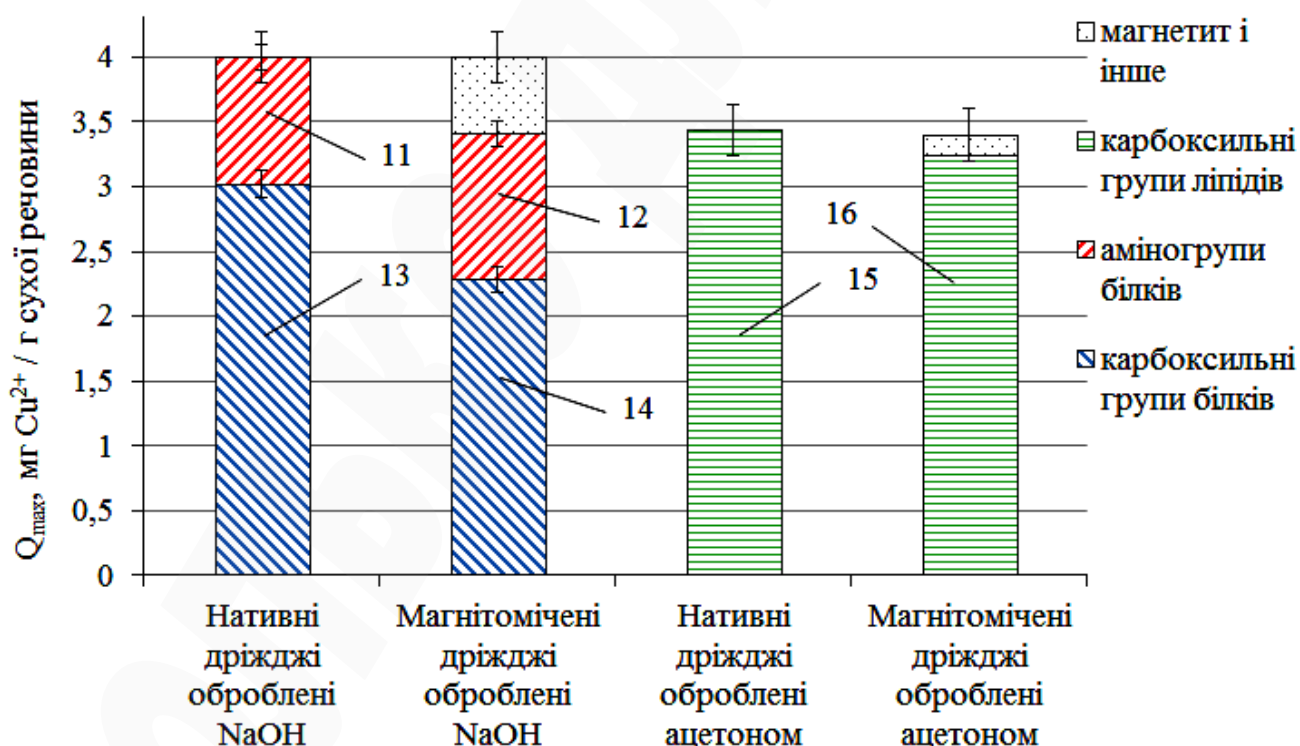
словами, нанорозмірний магнетит не взаємодіє з аміногрупами клітинної стінки дріжджів і не блокує їх в процесі біосорбції катіонів міді.

У випадку етерифікації карбоксильних груп за реакцією:



сорбційна ємність клітинних стінок дріжджів значно зменшується – до  $5 \pm 0,3$  і  $6 \pm 0,3$  мг/г для нативних і магнітомічених дріжджів відповідно. Найменша сорбційна ємність у разі модифікації клітинної стінки метанолом підтверджує той факт, що карбоксильні групи залучені до біосорбції катіонів міді найбільше. Цікавим є те, що сорбційна ємність магнітомічених дріжджів в такій модифікації значно відрізняється від нативних дріжджів. Якщо вважати, що залишкова сорбційна ємність після етерифікації карбоксильних груп представлена всіма іншими компонентами клітинної стінки, то можна припустити, що різниця в сорбційних ємностях належить нанорозмірним магнітним міткам. І до того ж припустити, що магнітні мітки блокують частину карбоксильних груп за рахунок електростатичних взаємодій з ними.

Для того, щоб з'ясувати місце прикріплення і вплив на зв'язування катіонів міді за допомогою нанорозмірних міток магнетиту були проведені дослідження по сорбції катіонів міді виділеними компонентами клітинної стінки магнітомічених дріжджів і порівняно результати з нативними дріжджами. Результати представлені на рис. 2.



**Рис. 2.** Максимальна сорбційна ємність  $Q_{max}$  екстрактів з клітинних стінок нативних і магнітомічених дріжджів по відношенню до катіонів міді  $Cu^{2+}$  в перерахунку на масу сорбенту

Як видно з рис. 2, сорбційна ємність обумовлена амніогрупами компонентів клітинної стінки вилучених за допомогою луку NaOH (зразки 11 і 12) однакова для нативних і магнітомічених дріжджів. Навпроти, в тих самих екстрактах карбоксильні групи магнітомічених дріжджів блоковані магнетитом на 15 % (зразок 13 у нативних і зразок 14 у магнітомічених дріжджів). В екстрактах ліпідів з магнітомічених дріжджів (зразок 16) спостерігається зменшення вкладу карбоксильних груп лише у межах похибки, тому зробити висновок про наявність сорбції катіонів міді магнетитом в ліпідах не вдається.

З точки зору техніко-економічної доцільності використання магнітоміченого біосорбенту можна зробити висновок, що у разі співвідношення маси магнітних міток до дріжджів 1 % максимальна сорбційна ємність магнітомічених дріжджів відповідає сорбційній ємності нативних дріжджів. Тобто нанорозмірний магнетит прикріплений до дріжджової клітини блокує еквіваленту кількість сайтів зв'язування катіонів міді до кількості сайтів, яку він надає.

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* Дослідження, які представлені в експериментальній частині, дають інформацію про вклад основних функціональних груп (карбоксильних і аміних) на сорбцію катіонів металів магнітоміченими дріжджами, а також вклад в цю сорбційну ємність нанорозмірного магнетиту. Серед сильних сторін цього дослідження є аналіз вкладу функціональних груп і виділених компонентів клітинної стінки в сорбційну ємність комплексів магнітні мітки – дріжджова клітина, – отриманих методом багатовихрового МГД перемішування. Використання отриманих даних дає часткову інформацію про локалізацію нанорозмірного магнетиту в клітинній стінці і його електростатичну взаємодію з зарядженими функціональними групами, а також кількісний аналіз цих взаємодій. Критерієм оцінки кількості функціональних груп і електростатичних взаємодій в такому випадку являється сорбційна ємність по катіонам міді.

Основною перевагою магнітомічених дріжджів з 1 % по масі магнетиту є те, що їх сорбційна ємність рівна сорбційній ємності нативних дріжджів *S. cerevisiae*, а магнітомічений біосорбент може бути видалений з робочого середовища швидко і ефективно завдяки магнітній сепарації.

*Weaknesses.* Серед слабких сторін цієї роботи є те, що не існує можливості виділити окремо кожний компонент клітинної стінки і дослідити його кількісний вклад в сорбційну ємність. Це пов'язано з тим, що в динамічній структурі клітинної стінки постійно відбуваються різні процеси, зокрема сорбція, хімічні перетворення, комплексоутворення і таке інше. Таким чином не всі функціональні групи приймають участь у вилученні катіонів міді. З іншого боку дослідження виділених компонентів, таких як ліпіди, несе надмірну інформацію щодо їх сорбційної ємності, оскільки останні взаємодіють з іншими компонентами в клітинній стінці, зокрема за рахунок карбоксильних груп.



До негативних факторів проведеного дослідження можна віднести відсутність інформації щодо інших функціональних груп, таких як сульфідні, фосфорильні та ін.

*Opportunities.* Розуміння механізму прикріплення магнетиту до дріжджової клітини, а також біосорбції обмежені. Можливості розкриття суті утворення магнітомічених клітин, отриманих методом МГД перемішування, лежать в теоретичному обґрунтуванні і кількісному аналізі механізмів, які мають місце в клітинній стінці. Зокрема для подальших досліджень необхідні результати електронної парамагнітної резонансної спектроскопії місць локалізації магнетиту.

Впровадження магнітомічених біосорбентів для очистки стічних вод від катіонів важких металів дає можливість проводити тонку доочистку води до концентрацій менше 1 мг/дм<sup>3</sup>. У порівнянні з існуючими біосорбентами дріжджі або відходи дріжджового виробництва більш дешеві. Економічний ефект має порядок 10<sup>4</sup>–10<sup>5</sup> грн/рік, в залежності від об'ємів виробництва.

*Threats.* Складність впровадження отриманих результатів полягає в тому, що отримані результати представлені для оптимальних параметрів як процесу прикріплення магнітних міток до дріжджів, так і для процесу біосорбції катіонів міді. В реальних умовах процес біосорбції відбувається з багатокомпонентних сумішей, а тому можуть бути залучені різні механізми сорбції клітинною стінкою.

Додаткові затрати на очисних спорудах перш за все пов'язані з необхідністю організації технологічних стадій виготовлення магнітоміченого біосорбенту та магнітної сепарації відпрацьованого сорбенту.

На основі SWOT-аналізу результатів можна охарактеризувати наступні основні напрями досліджень: комплексний аналіз факторів, що впливають на сорбційну здатність та стабільність магнітних характеристик магнітомічених дріжджів, дослідження біосорбції з багатокомпонентних сумішей.

## **8. Висновки**

1. Досліджено сорбційну ємність магнітомічених дріжджів, отриманих за допомогою багатовихрового МГД перемішування дріжджів з 1 % магнетиту по масі. Встановлено, що сорбційну ємність магнітомічених дріжджів зменшується після обробки лугом NaOH, ацетоном, формальдегідом з мурашиною кислотою і метанолом з 25,5 мг/г сухого сорбенту до 21,6, 22,1, 15,6 і 5 мг/г відповідно.

2. Порівняно сорбційні ємності нативних і магнітомічених дріжджів *S. cerevisiae*. Встановлено, що максимальна сорбційна ємність нативних і магнітомічених дріжджів змінюється однаково у випадку обробки суспензій лугом, ацетоном або формальдегідом з мурашиною кислотою. А у випадку обробки метанолом у магнітомічених дріжджів сорбційна ємність більша ніж у нативних і складає 6 мг/г сухої речовини.

3. Досліджено сорбційну ємність ліпідів і білків клітинної стінки магнітомічених дріжджів *S. cerevisiae*. Встановлено, що нанорозмірний магнетит не впливає на сорбцію катіонів міді ліпідами клітинної стінки, і

аміногрупами представленими на поверхні дріжджової клітини, а впливає на сорбційну ємність білків, зокрема займає 15 % карбоксильних груп компонентів, виділених за допомогою NaOH з клітинної стінки, які залучені в біосорбції катіонів міді.

### Література

1. Gorobets, S. V. Determination of optimum characteristics of magnetically operated biosorbent based on *Saccharomyces cerevisiae* yeasts [Text] / S. V. Gorobets, N. O. Mykhailenko, Yu. V. Karpenko // Chemistry, physics and technology of surface. – 2013. – Vol. 4, № 2. – P. 219–225.

2. Wang, J. Biosorbents for heavy metals removal and their future [Text] / J. Wang, C. Chen // Biotechnology Advances. – 2009. – Vol. 27, № 2. – P. 195–226. doi:[10.1016/j.biotechadv.2008.11.002](https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.11.002)

3. Gorobets, S. V. Application of Magnetically Labeled Cells *S. cerevisiae* as Biosorbents at Treatment Plants [Text] / S. V. Gorobets, Yu. V. Karpenko, O. V. Kovalev, V. V. Olishevsky // Naukovi Visti NTUU KPI. – 2013. – № 3 (89). – P. 42–47.

4. Abbas, S. H. Biosorption of Heavy Metals: A Review [Text] / S. H. Abbas, I. M. Ismail, T. M. Mostafa, A. H. Sulaymon // Journal of Chemical Science and Technology. – 2014. – Vol. 3, № 4. – P. 74–102.

5. Wang, T. Different biosorption mechanisms of Uranium(VI) by live and heat-killed *Saccharomyces cerevisiae* under environmentally relevant conditions [Text] / T. Wang, X. Zheng, X. Wang, X. Lu, Y. Shen // Journal of Environmental Radioactivity. – 2017. – Vol. 167. – P. 92–99. doi:[10.1016/j.jenvrad.2016.11.018](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.11.018)

6. Geva, P. Increased copper bioremediation ability of new transgenic and adapted *Saccharomyces cerevisiae* strains [Text] / P. Geva, R. Kahta, F. Nakonechny, S. Aronov, M. Nisnevitch // Environmental Science and Pollution Research. – 2016. – Vol. 23, № 19. – P. 19613–19625. doi:[10.1007/s11356-016-7157-4](https://doi.org/10.1007/s11356-016-7157-4)

7. Xu, M. Study on the adsorption of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  and  $\text{Pb}^{2+}$  by magnetic  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yeast treated with EDTA dianhydride [Text] / M. Xu, Y. Zhang, Z. Zhang, Y. Shen, M. Zhao, G. Pan // Chemical Engineering Journal. – 2011. – Vol. 168, № 2. – P. 737–745. doi:[10.1016/j.cej.2011.01.069](https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.01.069)

8. Emanet, M. Boron Nitride Nanotubes and Layer-By-Layer Polyelectrolyte Coating for Yeast Cell Surface Engineering [Text] / M. Emanet, R. Fakhrullin, M. Culha // ChemNanoMat. – 2016. – Vol. 2, № 5. – P. 426–429. doi:[10.1002/cnma.201600044](https://doi.org/10.1002/cnma.201600044)

9. Gorobets, S. V. Intensification of the extraction process of copper and chromium (VI) ions from the solutions in a magnetic field [Text] / S. V. Gorobets, O. Yu. Gorobets, I. Yu. Goyko, T. P. Kasatkina // Functional Materials. – 2004. – Vol. 11, № 4. – P. 793–797.

10. Aronbaev, S. D. Biosorbtsiia tiazhelyh metalov kletochnymi obolochkami drozhzhei *saccharomyces cerevisiae* [Text] / S. D. Aronbaev, A. M. Nasimov, D. M. Aronbaev // Vserossiiskii zhurnal nauchnyh publikatsii. – 2011. – № 1 (2). – P. 13–15.

11. Gorobets, S. V. Self-organization of magnetite nanoparticles in providing *Saccharomyces cerevisiae* Yeasts with magnetic properties [Text] / S. V. Gorobets, O. Yu. Gorobets, I. V. Demianenko, R. N. Nikolaenko // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2013. – Vol. 337-338. – P. 53–57. doi:[10.1016/j.jmmm.2013.01.004](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.01.004)
12. Gorobets, S. Analysis of effectiveness of magnetically labeled biosorbent obtained through the mechanical and magnetohydrodynamic stirring [Text] / S. Gorobets, O. Gorobets, Y. Chyzh, O. Kovalev, V. Perizhok, V. Golub // *EUREKA: Physics and Engineering*. – 2016. – № 5. – P. 37–43. doi:[10.21303/2461-4262.2016.00165](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2016.00165)
13. Liu, J. Coating Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Magnetic Nanoparticles with Humic Acid for High Efficient Removal of Heavy Metals in Water [Text] / J. Liu, Z. Zhao, G. Jiang // *Environmental Science & Technology*. – 2008. – Vol. 42, № 18. – P. 6949–6954. doi:[10.1021/es800924c](https://doi.org/10.1021/es800924c)
14. Soares, E. V. Cleanup of industrial effluents containing heavy metals: a new opportunity of valorising the biomass produced by brewing industry [Text] / E. V. Soares, H. M. V. M. Soares // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2013. – Vol. 97, № 15. – P. 6667–6675. doi:[10.1007/s00253-013-5063-y](https://doi.org/10.1007/s00253-013-5063-y)
15. Kushnirov, V. V. Rapid and reliable protein extraction from yeast [Text] / V. V. Kushnirov // *Yeast*. – 2000. – Vol. 16, № 9. – P. 857–860. doi:[10.1002/1097-0061\(20000630\)16:9<857::aid-yea561>3.0.co;2-b](https://doi.org/10.1002/1097-0061(20000630)16:9<857::aid-yea561>3.0.co;2-b)
16. Tobin, J. M. Investigation of the mechanism of metal uptake by denatured *Rhizopus arrhizus* biomass [Text] / J. M. Tobin, D. G. Cooper, R. J. Neufeld // *Enzyme and Microbial Technology*. – 1990. – Vol. 12, № 8. – P. 591–595. doi:[10.1016/0141-0229\(90\)90132-a](https://doi.org/10.1016/0141-0229(90)90132-a)
17. Kapoor, A. Heavy metal biosorption sites in *Aspergillus niger* [Text] / A. Kapoor, T. Viraraghavan // *Bioresource Technology*. – 1997. – Vol. 61, № 3. – P. 221–227. doi:[10.1016/s0960-8524\(97\)00055-2](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(97)00055-2)
18. Azevedo, R. B. Morphological study of *saccharomyces cerevisiae* cells treated with magnetic fluid [Text] / R. B. Azevedo, L. P. Silva, A. P. C. Lemos, S. N. Bao, Z. G. M. Lacava, I. Safarik, M. Safarikova, P. C. Morais // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2003. – Vol. 39, № 5. – P. 2660–2662. doi:[10.1109/tmag.2003.815547](https://doi.org/10.1109/tmag.2003.815547)