

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

КОВАЛЬОВ ОЛЕКСІЙ ВІКТОРОВИЧ

УДК 57.05; 577.32 :537.662; 616-004.6

**БІОТЕХНОЛОГІЯ ВИЛУЧЕННЯ ІОНІВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ТА
ІНШИХ ДОМІШОК СУХИМ МАГНІТОМІЧЕНИМ БІОСОРБЕНТОМ
НА ОСНОВІ *SACCHAROMYCES CEREVISIAE***

03.00.20 – біотехнологія

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі біоінформатики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Горобець Світлана Василівна**, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, завідувач кафедри біоінформатики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Карпенко Олена Володимирівна**, Відділення фізико-хімії горючих копалин Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України, завідувач відділу хімії та біотехнології горючих копалин;

кандидат технічних наук **Кравченко Олександр Валерійович**, ДП «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства» Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, завідувач відділення житлово-комунального господарства.

Захист відбудеться «09» лютого 2018 р. о 13-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.28 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 4, ауд. 258).

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37). Відгуки на автореферат просимо надсилати за адресою: 03056, Україна, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 1, кімната 158, відділ вченого секретаря КПІ імені Ігоря Сікорського.

Автореферат розісланий «__» грудня 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.002.28, д.б.н., доц.



Галкін О.Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Актуальним напрямком, визначеним Водним кодексом України, є захист водних ресурсів. Важливими завданнями є зменшення як загального забруднення довкілля, так і забруднення водою недостатньо очищеними стічними водами, поліпшення контролю якості їх очищення (Водний кодекс України).

Інтенсивний розвиток промисловості, енергетики і транспорту, хімізація сільського господарства спричиняють значні забруднення довкілля, тому очищення стічних вод від забруднення іонами важких металів, біогенними елементами (нітритів, нітратів, азоту амонійного, фосфатів) хлоридів, є важливою проблемою сучасності. В світовій практиці для доочищення стічних вод широко використовуються біосорбенти та іонообмінні смоли. Оскільки вартість іонообмінних смол на порядок перевищує вартість біосорбентів, використанню останніх приділяється значна увага. При цьому 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 важких металів, біогенних елементів, та інших домішок.

Економічно вигідним підходом є використання в якості біосорбенту біомаси дріжджів, яка є вторинним продуктом харчових виробництв, що в свою чергу сприяє розв'язанню екологічної проблеми – утилізації відходів. Проте відомі біологічні способи потребують вдосконалення, оскільки мають недоліки: значна тривалість процесу, висока вартість, складність вилучення відпрацьованого біосорбенту з робочого розчину тощо. Перспективним напрямком вирішення цих проблем є використання магнітомічених біосорбентів, але їх впровадження для очищення стічних вод обмежується відсутністю методів магнітомічення біосорбенту для забезпечення гомогенності і стабільності магнітної сприйнятливості, відсутності кластеризації. У зв'язку з цим, дисертаційна робота присвячена встановленню оптимальних біотехнологічних параметрів очистки стічних вод сухим магнітоміченим біосорбентом (ММБС) на основі дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* шляхом розробки методу магнітомічення біосорбенту, який забезпечує гомогенність та стабільність магнітної сприйнятливості, відсутність кластеризації ММБС, скорочення тривалості процесу очищення за рахунок використання високоградієнтної магнітної сепарації, тобто вилучення ММБС у швидкісному режимі.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі біоінформатики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках наступних науково-дослідних робіт «Механізми інтенсифікації процесу сорбції іонів важких металів модифікованим магнітокерованим біосорбентом для очищення стічних вод» НДР 2515ф (номер державної реєстрації 0112U000957); «Механізми інтенсифікації процесу сорбції іонів важких металів сухим магнітокерованим біосорбентом для очищення

стічних вод» 2866ф (номер державної реєстрації 0115U000401). Дисертант брав участь у виконанні наведених робіт як виконавець.

Мета і задачі дослідження.

Метою роботи є визначення оптимальних біотехнологічних параметрів очистки стічних вод сухим магнітоміченим біосорбентом, отриманим способом магнітогідродинамічного перемішування (МГДП) суспензії дріжджів *S. cerevisiae* магнітними наночастинками в схрещених електричному і магнітному полях.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **задачі**:

1. Розробити новий метод отримання сухого ММБС з контрольованою магнітною сприйнятливістю на основі магнітогідродинамічного перемішування суспензії клітин дріжджів з магнітними наночастинками в схрещених електричному та магнітному полях.
2. Визначити та порівняти магнітну сприйнятливість сухого ММБС, її стабільність і гомогенність за нового та традиційного методів виготовлення ММБС при різній концентрації магнітних наночастинок в його складі.
3. Встановити раціональні параметри (рН робочого розчину, час перемішування, величину зовнішнього магнітного та електричного полів, дисперсність, магнітну сприйнятливість, сорбційну ємність та ефективність біосорбції іонів міді, заліза, фосфатів, нітритів, азоту амонійного сухим ММБС) за використання сухого ММБС, отриманого з застосуванням нового та традиційного методів виготовлення ММБС.
4. Визначити та порівняти ефективність біосорбції сухим ММБС: іонів міді, заліза, фосфатів, нітритів, азоту амонійного за нового та традиційного методів виготовлення ММБС.
5. Розробити біотехнологічну схему очищення стічних вод з використанням сухого ММБС.

Об'єкт дослідження – біотехнологічні параметри вилучення іонів важких металів та інших домішок сухим ММБС на основі дріжджів *S. cerevisiae*.

Предмет дослідження – закономірності процесу штучного магнітомічення дріжджів *S. cerevisiae* наночастинками магнетиту, процесу біосорбції іонів важких металів сухим магнітоміченим біосорбентом, фізико-хімічні закономірності сорбції забруднюючих речовин з водних систем сухим магнітоміченим біосорбентом на основі дріжджів *S. cerevisiae*.

Методи дослідження. В експериментах використано фізичні, хімічні, фізико-хімічні та мікробіологічні методи. Фотоколориметрію та титриметрію використано для визначення основних показників забруднення стічних вод (ХСК, залізо загальне, нітрити, фосфати); рН-метрію – для визначення рН розчинів та параметрів процесу магнітомічення; методи мікроскопічного дослідження (оптична мікроскопія, скануюча електронна мікроскопія (СЕМ), трансмісійна електронна мікроскопія (ТЕМ), атомно-силова мікроскопія (АСМ), магнітосилова мікроскопія (МСМ) – для дослідження розмірів частинок ММБС; радіоспектроскопічний метод, магнітометричний метод – для аналізу отриманого ММБС; метод регресивного аналізу та математичної статистики здійснювали із застосуванням програмного забезпечення (Math lab, Math Cad v.14.0, IMAGEJ, Visual Studio 2015, Excel) та стандартних методик.

Наукова новизна одержаних результатів. В ході виконання дисертаційних досліджень *вперше одержані наступні результати.*

Розроблено новий метод отримання сухого ММБС з стабільною магнітною сприйнятливістю та високою сорбційною ємністю на основі дріжджів *S. cerevisiae*, що ґрунтуються на модифікації клітин при МГДП наночастинок магнетиту та клітин дріжджів у схрещених електричному і магнітному полях.

Встановлено раціональні параметри режиму виготовлення сухого ММБС зі стабільною та гомогенною у процесі біосорбції магнітною сприйнятливістю, а саме: рН робочого розчину, тривалість перемішування, концентрація магнітних наноміток в складі ММБС, напруженість магнітного поля, напруга між електродами в змішувачі, дисперсність ММБС.

Показано, що сорбційна ємність сухого ММБС, отриманого за нового методу, майже у 2 рази вища, ніж для ММБС, отриманого за традиційними методами.

Показано, що десорбція магнітних наночастинок практично не відбувається у процесі біосорбції іонів важких металів сухим ММБС, виготовленим на основі нового методу.

Виявлено, що кластеризація ММБС практично відсутня за нового методу його виготовлення у порівнянні з традиційними методами, середній розмір кластеру ММБС містить 1-3 дріжджові клітини (на відміну від 10-100 клітин за традиційних методів), тобто збільшення ефективності біосорбції сухим ММБС, отриманим новим методом, відбувається внаслідок зменшення його дисперсності та відповідно збільшення площі поверхні.

Практичне значення одержаних результатів. Запропоновано раціональні параметри отримання сухого магнітоміченого біосорбенту на основі дріжджів *S. cerevisiae* методом магнітогідродинамічного перемішування у схрещених електричному та магнітному полях. Розроблено біотехнологію використання біосорбенту у промислових умовах для вилучення іонів важких металів та інших домішок.

Отримано два патенти України на корисну модель.

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи: на прикладі стоків м. Славутич Київська обл. (акт № 41 від 22.03.2017 р.); з Славутицьким відділом лабораторних досліджень об'єкту з особливим режимом роботи ДУ «Київський обласний лабораторний Центр МОЗ України» (акт № 36 від 24.03.2017 р.); з Державною екологічною інспекцією в Чернігівській області (акт № 07-04/564 від 31.03.2017р.).

В роботі доведено доцільність та ефективність використання сухого ММБС для очистки стічних вод від іонів заліза, азоту амонійного, нітритів, фосфатів та досягається результатами дослідно-промислового експерименту на очисних спорудах м. Славутича Київська обл.

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі в дисциплінах «Програмні засоби промислової біотехнології» для студентів напряму підготовки 6.051401 – біотехнологія та «Основи використання високоградієнтної магнітної сепарації в біології та медицині» для студентів напряму підготовки 8.05140102 – Молекулярна біотехнологія.

Особистий внесок здобувача. Дисертантом виконано критичний аналіз

стану проблеми, комплекс теоретичних та експериментальних досліджень для розробки технології ефективного очищення стічних вод від біогенних елементів та інших забруднювачів. Особисто здобувачем напрацьовано експериментальні дані, оформлено результати роботи у вигляді статей, патентів на корисну модель, тез доповідей. Планування основних напрямків роботи, аналіз результатів та підготовка публікацій за результатами досліджень виконано за участі наукового керівника д.т.н., проф. Горобець С.В., спільно проведено обговорення результатів дослідження та сформовано висновки.

Апробація результатів роботи. Основні результати дисертаційної роботи оприлюднені на таких наукових конференціях: VI Всеукраїнській науково-практичній конференції «Біотехнологія XXI століття» (м. Київ, 2012р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Технології очищення води. Технічні, біологічні та екологічні аспекти» (м. Київ, 2013р.); VIII Всеукраїнській науково-практичній конференції, присвяченої 200-й річниці з дня народження Т.Г.Шевченка (м. Київ, 2014 р.); IX Міжнародній науково-практичній конференції (м. Київ – с. Жукін, 2014 р.); IX Всеукраїнській науково-практичній конференції присвяченій 170 річниці від дня народження Іллі Мечникова (м. Київ, 2015 р.); Collection of international scientific papers “Ukraine – EU. Modern technology, business and law” (Kosice, Slovakia 2015 р.); X Всеукраїнській науково-практичній конференції присвяченій 135-й річниці від дня народження Олександра Флемінга (м. Київ, 2016 р.); XI Всеукраїнській науково-практичній конференції «Біотехнологія XXI століття» (м. Київ, 2017 р.).

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 20 наукових праць, у тому числі 8 статей у наукових фахових виданнях, з них 1 стаття у виданні іноземної країни, 5 статей у вітчизняних журналах, які представлено у міжнародних наукометричних базах даних, 2 статті у інших наукових виданнях, 2 патенти України на корисну модель, 10 тез доповідей на конференціях.

Структура дисертації. Робота складається із анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних літературних джерел, додатків. Робота викладена на 144 сторінках тексту, містить 39 рисунків та 29 таблиць, список використаних літературних джерел із 130 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, визначені об'єкт, предмет і методи дослідження, наведено наукову новизну, практичне значення одержаних результатів та особистий внесок здобувача. Надаються відомості про апробацію результатів дисертації, публікації. Викладено основні положення дисертації, що виносяться на захист.

У першому розділі наведено аналіз літературних даних щодо методів магнітомічення біосорбентів та їх ефективності для вилучення іонів важких металів, біогенних елементів, ХСК та інших домішок. В останні роки особлива увага приділяється використанню магнітомічених клітин дріжджів для біосорбції іонів важких металів.

Дріжджові клітини не мають достатньої магнітної сприйнятливості для їх

ефективного вилучення з розчину магнітними сепараторами навіть з великою напруженістю зовнішнього магнітного поля сепаратора. Завдяки тому, що поверхня дріжджових клітин має від'ємний заряд, який дозволяє їй шляхом електростатичній взаємодії захоплювати катіони металів або дипольні молекули, існує можливість прикріплення до дріжджових клітин магнітних нанорозмірних частинок – наномагнетит, який при певних умовах має позитивний заряд.

Дослідженнями методів магнітомічення біооб'єктів, які використовуються для видалення забруднень, займаються такі зарубіжні вчені як: Bai J., Bahaj A., Horska K., Jianlong W., Patzak M., Pospiskova K., Safarik I., Safarikova M., Volesky B., Wang J. та ін. Аналіз фахової літератури показав, що на даний момент не існує методів магнітомічення біооб'єктів, які б забезпечували гомогенність магнітної сприйнятливості ММБС та ефективно вилучення забруднювачів. Всі методи виготовлення магнітомічених біосорбентів характеризуються значною кластеризацією біосорбенту, значним відсотком наночастинок у біосорбенті (20-50%), нерівномірністю магнітомічення та низькою ефективністю біосорбції забруднюючих речовин, значний час отримання біосорбенту (10-30 хв). Тому отримання сухого ММБС перш за все спрямоване на зниження рівня кластеризації за рахунок нового методу отримання біосорбенту в схрещених електричному та магнітному полях, зниження відсотку магнітних наноміток, забезпечення гомогенності, високої ефективності біосорбції забруднюючих речовин, значного зниження часу отримання біосорбенту.

Тому актуальними задачами досліджень є отримання сухого ММБС на основі дріжджів *S. cerevisiae* у лабораторних умовах; проведення дослідження ефективності сорбції отриманого сухого ММБС по відношенню до іонів Cu^{2+} та стічної води; визначення магнітної сприйнятливості ММБС, отриманого за нового та традиційних методів перемішування; визначення сорбційної ємності ММБС, отриманого за різних методів перемішування; перевірка стабільності магнітних властивостей сухого ММБС. Також була поставлена задача встановлення оптимальних біотехнологічних параметрів очистки стічних вод сухим ММБС на основі дріжджів *S. cerevisiae*, який би забезпечував зниження рівня кластеризації та гомогенність магнітомічення.

Другий розділ містить характеристику основних методів і методик дослідження сухого ММБС, отриманого різними методами перемішування. Для перевірки сорбційної ємності та ефективності ММБС використовували водний розчин CuSO_4 і стічну воду каналізаційних очисних споруд м. Славутича. Перевіряли залишкову концентрацію іонів Cu^{2+} в розчині та залишковий вміст забруднюючих речовин: заліза, фосфатів, нітритів, азоту амонійного у стічній воді.

Для встановлення оптимальних параметрів процесу магнітомічення (напруженість зовнішнього магнітного та електричного поля, тривалість процесу магнітомічення, величина рН, співвідношення у системі магнітні мітки – біосорбент), використовувались методи оптичної мікроскопії, трансмісійної електронної мікроскопії, скануючої електронної мікроскопії, магнітної силової мікроскопії, атомно-силової мікроскопії, методи регресійного

аналізу та математичної статистики.

У третьому розділі представлено новий метод отримання ММБС у схрещених електричному та магнітному полях. Здійснено порівняння сорбційної ємності та ефективності вилучення забруднюючих речовин (мідь, залізо, азот амонійний, фосфати та ін.) з застосуванням експериментальної установки для магнітного мічення нативних клітин дріжджів *S. cerevisiae* (установка №1) та вдосконаленої експериментальної установки (установка №2).

Експериментальна установка №1 для виготовлення магнітоміченого біосорбенту методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях складається з магнітної системи, комірки, електродів та джерела живлення. Зміну полярності здійснювали перемикачем полярності електродів. За допомогою вольтметра-амперметра слідували за параметрами процесу магнітомічення.

Незважаючи на високу ефективність цього методу (установка №1), він має недоліки:

1. Нестабільність роботи перемішуючого пристрою внаслідок відсутності постійного контролю рН та швидкості перемішування, що пов'язано з процесами окиснення катоду й аноду в ході роботи перемішуючого пристрою.
2. Необхідність регулярної заміни електродів, яка спричинена їх електрохімічною взаємодією з робочим розчином, рН якого 2,5.

Тому в дисертаційній роботі була поставлена задача покращення якості отримання ММБС на основі дріжджів *S. cerevisiae* шляхом вдосконалення установки №1. На рис.1 приведена експериментальна установка №2 для магнітомічення нативного біосорбенту в схрещених електричному та магнітному полях. Поставлена задача вирішується тим, що перемішування біомаси дріжджів *S. cerevisiae* та наночастинок магнетиту у схрещених електричному та магнітному полях, проводяться при:

1. постійному контролю рН середовища, що забезпечує сталу швидкість перемішування;
2. періодичній зміні напрямку електричного струму у пристрої для того, щоб на електродах процес розчинення змінювати на процес осадження, що дозволяє подовжити термін служби апарату;
3. періодичному видаленні продуктів корозії з катоду та аноду апарату шляхом обробки катоду та аноду ортофосфатною кислотою.

Для отримання ММБС, за допомогою удосконаленої установки, схема якої наведена на рис.1, рідину, що містить суміш дріжджів *S. cerevisiae* та наночастинок магнетиту, поміщали у робочий об'єм апарату (1) в схрещених магнітному та електричному полях. Кислотність робочого розчину підтримували за допомогою дозатора нітратної кислоти з ємності (8) для підтримання рН на рівні 2,5, який контролювали за допомогою іономіра (9), швидкість перемішування контролювали зміною напруги. Періодично (кожні 15 хв) змінювали напрямок електричного струму за допомогою перемикача полярності (5).

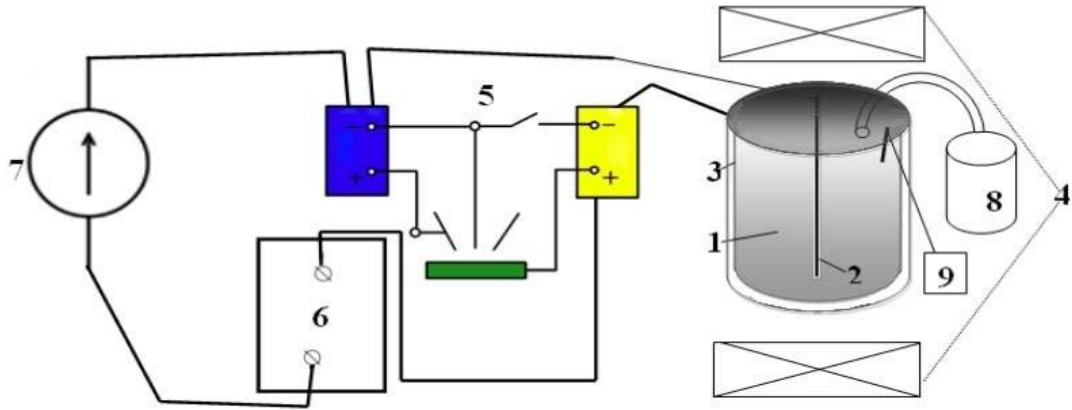


Рис.1 – Схема експериментальної установки №2 для магнітомічення нативного біосорбенту у схрещених електричному та магнітному полях: 1 – робочий об'єм апарату; 2 – електрод, вбудований у кришку апарату; 3 – електрод циліндричної форми; 4 – магнітна система; 5 – перемикач полярності електродів; 6 – джерело живлення постійного струму; 7 – вольтметр-амперметр 8 – ємність нітратної кислоти з дозатором; 9 – іонімір для контролю рН

На рис. 2 показано ефективність сорбції іонів Cu^{2+} ММБС, виготовленим з використанням установок №1 та №2.

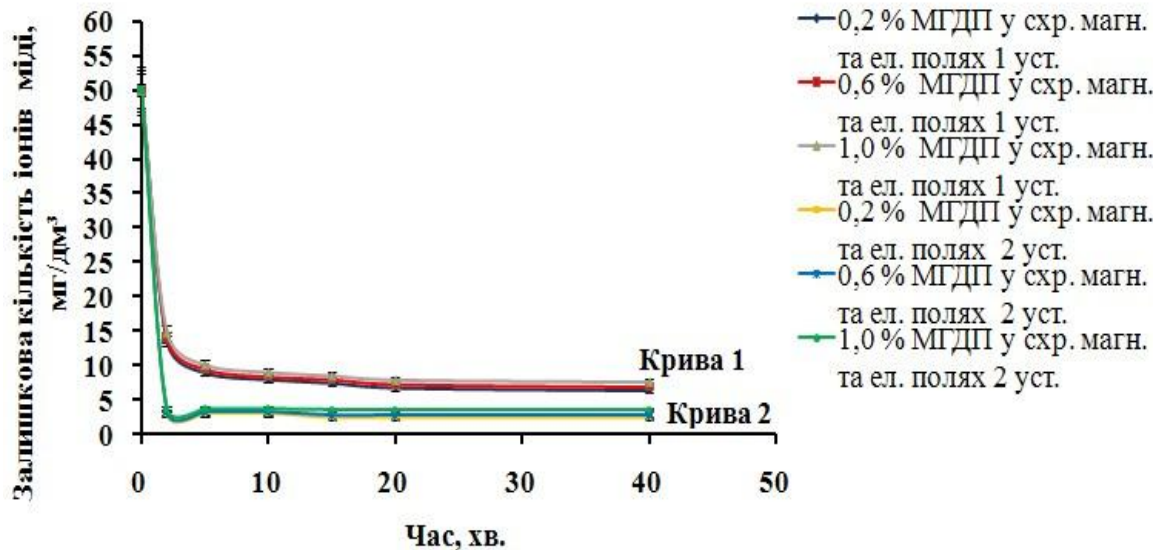


Рис.2 – Кінетика сорбції іонів міді сухим ММБС, виготовленим на експериментальній установці №1 (крива 1) та експериментальній установці №2 (крива 2), методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях, концентрація магнітних наноміток – 1%; 0,6%; 0,2%

Отриманий ММБС шляхом МГДП в схрещеному електричному та магнітному полях з контролем швидкості перемішування, рН розчину, обробки поверхні електродів ортофосфатною кислотою (установка №2) має високу сорбційну ємність (рис. 2, крива 2). При цьому ефективність сорбції іонів Cu^{2+} досягає 93% на 2 хв, в той час як на установці №1 ефективність сорбції іонів Cu^{2+} – 85% на 6 хв.

У четвертому розділі визначено магнітну сприйнятливість сухого ММБС, проведено теоретичні та експериментальні дослідження магнітної сприйнятливості сухого ММБС.

Отримана залежність магнітної сприйнятливості сухого ММБС на основі дріжджів *S. cerevisiae*, виготовленого МГДП в схрещених магнітному та електричному полях, та за механічного перемішування від концентрацій магнітних наночастинок (табл.1) та часу перемішування (табл.2).

Для дослідження величини магнітної сприйнятливості готували сухий ММБС при таких параметрах:

- механічне перемішування, тривалість – 2 хв, 6 хв, 15 хв, концентрація наночастинок магнетиту по масі – 0,2%; 0,6%; 1,0%, температура сушіння 105°C.
- МГДП в схрещених магнітному та електричних полях, тривалість – 2 хв, 6хв, 15 хв, концентрація наночастинок магнетиту по масі – 0,2%; 0,6%; 1,0%, температура сушіння 105 °С.

Після висушування до постійної маси ММБС подрібнювали, проводили сорбцію та здійснювали визначення магнітної сприйнятливості ММБС. Дані по магнітній сприйнятливості сухого ММБС представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Залежність магнітної сприйнятливості сухого ММБС, виготовленого за механічного перемішування, та методом МГДП у схрещених магнітному та електричному полях від концентрацій наночастинок магнетиту від тривалості перемішування 2 хв

Концентрація наночастинок магнетиту,%	Тип перемішування	Магнітна сприйнятливість
1,0	Механічне перемішування	0,003±0,001
	МГДП у схрещених електричному та магнітному полях	0,0052±0,0001
0,6	Механічне перемішування	0,003±0,001
	МГДП у схрещених електричному та магнітному полях	0,0042±0,0001
0,2	Механічне перемішування	0,003±0,001
	МГДП у схрещених електричному та магнітному полях	0,0041±0,0001

Встановлено, що магнітна сприйнятливість ММБС, виготовленого методом МГДП у схрещених магнітному та електричному полях, у 1,3 – 1,7 рази вища магнітної сприйнятливості сухого ММБС, виготовленого за механічного перемішування при різній концентрації магнітних наночастинок.

Крім того, сухий ММБС, виготовлений методом МГДП у схрещених магнітному та електричному полях, є більш стабільним, при різній концентрації магнітних наночастинок, на відміну від сухого ММБС, виготовленим за механічного перемішування.

Дані по магнітній сприйнятливості сухого ММБС від тривалості перемішування представлені в таблиці 2.

Таблиця 2

Залежність магнітної сприйнятливості сухого ММБС від тривалості перемішування, виготовленого за механічного перемішування та методом МГДП в схрещених магнітному та електричному полях за концентрації магнітних наночастинок 1%

Тривалість перемішування, хв.	Тип перемішування	Магнітна сприйнятливість
2	Механічне перемішування	0,003±0,001
	МГДП у схрещених електричному та магнітному полях	0,0052±0,0001
6	Механічне перемішування	0,003±0,001
	МГДП у схрещених електричному та магнітному полях	0,0052±0,0001
15	Механічне перемішування	0,003±0,001
	МГДП у схрещених електричному та магнітному полях	0,0047±0,0001

Встановлено, що максимальна магнітна сприйнятливості при отриманні ММБС на установці №2 досягається вже на 2 хв.

При цьому середньоквадратичне відхилення магнітної сприйнятливості від її середнього значення, яке характеризує стабільність магнітних властивостей ММБС, для сухого ММБС, виготовленого методом МГДП в схрещених електричному та магнітному полях, з концентрацією наночастинок магнетиту 1% складає 2,5 %, для сорбенту з концентрацією наночастинок магнетиту 0,6% – 3,5%, для сорбенту з концентрацією наночастинок магнетиту 0,2 % – 5 % (табл.2).

Середньоквадратичне відхилення магнітної сприйнятливості від середнього значення для ММБС, виготовленого за механічного перемішування, яке характеризує стабільність магнітних властивостей ММБС, для сорбенту з концентрацією наночастинок магнетиту 1 % складає 29 %, для сорбенту з концентрацією наночастинок магнетиту 0,6 % – 31 %, для сорбенту з концентрацією наночастинок магнетиту 0,2 % – 35 % (табл.2).

Ці результати свідчать про вищу стабільність ММБС, виготовленого методом МГДП в схрещених електричному та магнітному полях, в порівнянні з ММБС, виготовленого традиційними методами за різної тривалості перемішування та ефективності сорбції.

У п'ятому розділі визначено залишкову кількість іонів Cu^{2+} та сорбційну ємність сухого ММБС. Для дослідження готували сухий ММБС при таких параметрах:

- механічне перемішування, рН 2,5, концентрація (масова) наночастинок магнетиту – 1,0 %, 0,6 %, 0,2 %, температура сушіння – 105 °С.
- МГДП у схрещених магнітному та електричних полях, рН=2,5, U=0,5 В, концентрація по вазі наночастинок магнетиту – 1,0 %, 0,6 %, 0,2 %, температура сушіння 105 °С.

Після висушування до постійної маси біосорбент подрібнювали за допомогою лабораторного млина, а після визначали ефективність сорбції при різних дозах витрати магнетиту (1г на 100 мл розчину, 0,6 г на 100 мл розчину, 0,2г на 100 мл розчину) та визначали залишкову кількість іонів Cu^{2+} в розчині після перемішування (рис. 3).

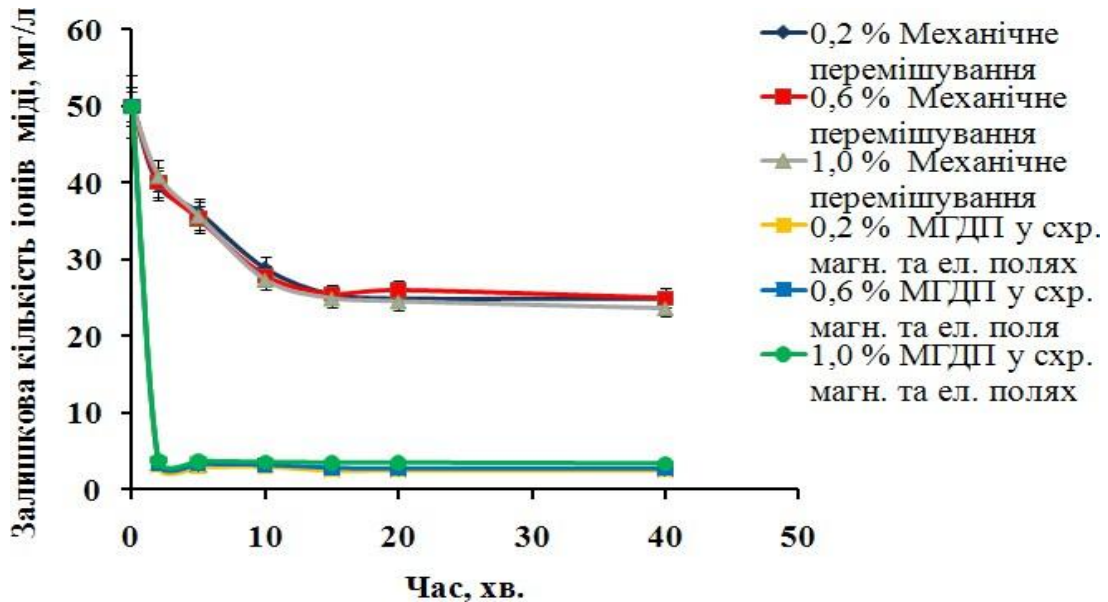


Рис. 3 – Кінетика залежності залишкової кількості іонів міді для сухого ММБС, виготовленого за механічного перемішування та методом МГДП у схрещених магнітному та електричному полях (початкова концентрація міді 50 мг/л)

Як видно з рис.3 залишкова кількість іонів міді для сухого ММБС, виготовленого методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях, майже у 8,3-11,8 разів нижча, ніж при механічному перемішуванні.

Для аналізу сорбційної ємності сухого ММБС, виготовленого за механічного перемішування та методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях за різних початкових концентрацій міді (від 10 до 200 мг/л) побудовано ізотерми Ленгмюра (рис.4).

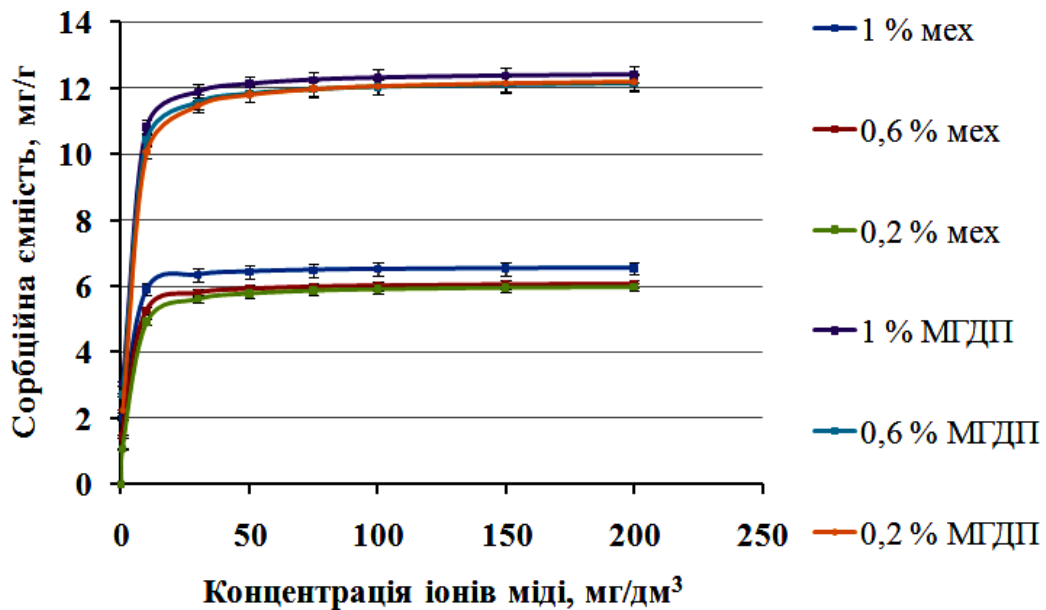


Рис. 4 – Ізотерми Ленгмюра для сорбції іонів міді сухим ММБС, виготовленим за механічного перемішування та методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях

З рис. 4 видно, що сорбційна ємність сухого ММБС, виготовленого методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях, майже у 2 рази вища, ніж при механічному перемішуванні.

Ефективність вилучення іонів міді для сухого ММБС залежить від концентрації наночастинок магнетиту та тривалості перемішування та приведена в таблиці 3.

Таблиця 3

Залежність ефективності сорбції іонів міді від концентрації наночастинок магнетиту сухим ММБС, виготовленим методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях, та за механічного перемішування

Концентрація наночастинок магнетиту, %	Тип перемішування	Ефективність вилучення іонів міді, %
1,0	Механічне перемішування	60±1
	МГДП у схрещених електричному та магнітному полях	93±1
0,6	Механічне перемішування	60±1
	МГДП у схрещених електричному та магнітному полях	94±1
0,2	Механічне перемішування	60±1
	МГДП у схрещених електричному та магнітному полях	95±1

Визначено ефективність сорбції сухого ММБС, виготовленого з різною концентрацією наночастинок магнетиту. Ефективність біосорбції для сорбенту, виготовленого методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях, становить – 93-95 %, для ММБС, для виготовленого за механічного перемішування – 60 %.

З табл. 3 видно, що зі зменшенням концентрацій магнітних наночастинок ефективність сорбції іонів міді збільшується, тобто підвищення концентрації наночастинок незначно збільшує кластеризацію біосорбенту.

Оскільки ефективність вилучення забруднень біосорбентом залежить від його дисперсності досліджено розміри частинок ММБС. Для цього готували ММБС за таких параметрів:

- механічне перемішування, рН=2,5, концентрація магнітних наноміток – 1,0 %, 0,6 %, 0,2 %, температура сушіння 105 °С, час перемішування 30 хв. (рис.5 г,д,є).

- МГДП у схрещених електричному та магнітному полях, рН=2,5, U=0,5 В, концентрація магнітних наноміток – 1,0 %, 0,6 %, 0,2 %, температура сушіння 105°С, час перемішування 2 хв. (рис. 5 а,б,в).

Після висушування до постійної маси ММБС подрібнювали та просіювали через сита з розмірами 0,1 та 1,0 мм. На рис.5 представлено біосорбент після подрібнення та просіювання через сита розміром 0,1 мм та 1,0 мм.

Дисперсність частинок сухого ММБС після подрібнення та просіювання через сита розміром 0,1 мм визначено за допомогою програмного забезпечення IMAGEJ. Результати представлені у таблиці 4.

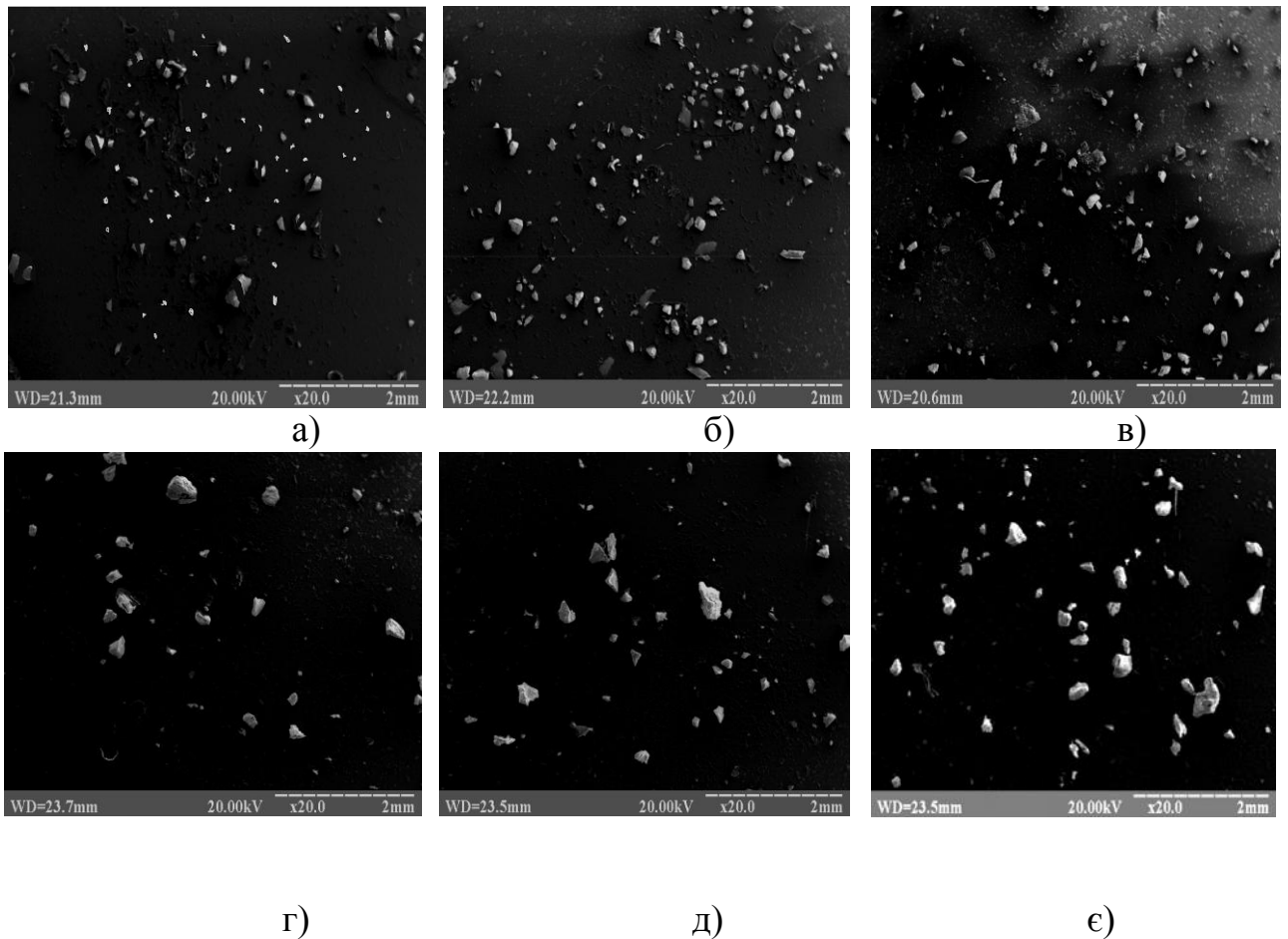


Рис. 5 – Електронно-мікроскопічне зображення ММБС, виготовленого за механічного перемішування та методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях з різним вмістом магнетиту а) МГДП у схрещених електричному та магнітному полях (0,2 % магнетиту); б) 0,6 % магнетиту; в) 1,0% магнетиту; г) механічне перемішування (0,2 % магнетиту); д) 0,6 % магнетиту; е) 1,0 % магнетиту

Таблиця 4

Залежність кількості кластерів від концентрації наночастинок магнетиту, які формуються при виготовленні сухого ММБС за механічного перемішування та методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях

Концентрація наночастинок магнетиту, %	Тип перемішування	Кількість кластерів частинок, од.	Середній розмір кластеру, мм
0,2	Механічне перемішування	451	0,006±0,001
	МГДП у схрещеному електричному та магнітному полях	2162	0,002±0,001
0,6	Механічне перемішування	239	0,012±0,001
	МГДП у схрещеному електричному та магнітному полях	1353	0,002±0,001
1	Механічне перемішування	186	0,016±0,001
	МГДП у схрещеному електричному та магнітному полях	736	0,003±0,001

Як свідчать данні табл.4 розміри частинок ММБС, виготовлених методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях, за відповідних концентрацій наночастинок магнетиту у 3-6 разів менші, ніж розміри частинок магнітоміченого біосорбенту, виготовленого за механічного перемішування.

Ефективність вилучення іонів міді сухим ММБС, виготовленим методом МГДП у схрещених магнітному та електричному полях, на 33-35% вище, ніж сухим ММБС, виготовленим методом механічного перемішування.

У шостому розділі запропонована біотехнологічна схема очищення стічних вод м. Славутич, Київська область. Схема фізико-хімічної очистки складається з таких основних етапів:

1. введення в стічну воду неорганічного коагулянту і флокулянту поліакриламідю;
2. відстоювання та фільтруванням через грубозернисту загрузку.

При цьому зі стічних вод видаляється основна частина завислих та більша частина розчинних органічних та мінеральних домішок.

Використання фізико-хімічних методів очистки стічних вод дає можливість скоротити площу очисних споруд в 1,5-2,0 рази та знизити капітальні та експлуатаційні витрати в порівнянні з традиційною біологічною очисткою (аеротенки, біофільтри).

На очисні споруди поступає суміш господарсько-побутових і виробничих стічних вод, що не викликають порушення їх роботи і забезпечують безпеку їх експлуатації.

Таблиця 5

Показники якості очищених стічних вод м. Славутич, очищених традиційним фізико-хімічним методом

№	Найменування показника	Концентрація	ГДС
1.	ХСК	135±3 мгО/дм ³	80,0 мгО/дм ³
2.	Запах	IV бали	I бал
3.	pH	7,62±0,06 од.	6,5–8,5 од.
4.	Азот амонійних солей	17,6±0,5 мг/дм ³	11,3 мг/дм ³
5.	Нітрити	0,45±0,05 мг/дм ³	0,04 мг/дм ³
6.	Фосфати	8,50±0,16 мг/дм ³	4,0 мг/дм ³
7.	Залізо	0,56±0,05 мг/дм ³	0,38 мг/дм ³

Так, навіть, після реагентного традиційного очищення стічних вод в умовах діючої каналізаційно-очисної станції м. Славутич, показник загального забруднення вод – хімічного споживання кисню (ХСК) перевищує гранично допустимий скид (ГДС) у 1,7 разів, нітрити – у 11 разів, фосфати і залізо відповідно – у 2,1 і 1,5 разів.

Для покращення роботи очисних споруд та підвищення надійності очищення стічних вод запропонована нова схема очистки стічних вод з використанням сухого ММБС.

Проведено дослідно-лабораторний експеримент по внесенню сухого ММБС (табл. 6). При дослідженні вилучення забруднень зі стічної води залежно від концентрації ММБС впродовж 0,5 год виявлено, що зростання дози сухого ММБС від 1 г/дм³ до 5 г/дм³, сприяє ефективному зниженню усіх

досліджених показників. Значення рН після біосорбції залишалось в межах ГДС. Норма витрати сухого сорбенту у світовій практиці складає 3-4 г/дм³.

Таблиця 6

Вплив дози біосорбенту на якість доочищення стічних вод

Найменування проб	Доза ММБС г/дм ³	Показники якості стічних вод						
		ХСК мгО/дм ³	Азот амонійний мг/дм ³	Нітрити мг/дм ³	Залізо загальне мг/дм ³	Фосфати мг/дм ³	Запах, бали	рН, од.
Контроль	-	135,3±3	17,7±0,5	0,46±0,05	0,59±0,05	8,7±0,16	V	7,65±0,06
Проба 1	1,0	122±3	14,9±0,4	0,39±0,04	0,51±0,04	7,7±0,15	III	7,56±0,05
Проба 2	2,0	111±2	13,3±0,3	0,35±0,03	0,48±0,03	6,7±0,14	II	7,51±0,04
Проба 3	3,0	93±2	12,9±0,2	0,15±0,02	0,39±0,02	5,4±0,13	I	7,49±0,03
Проба 4	4,0	78±1	10,1±0,1	0,04±0,01	0,30±0,01	3,4±0,12	I	7,44±0,02
Проба 5	5,0	78±1	10,0±0,1	0,04±0,01	0,30±0,01	3,2±0,11	I	7,43±0,01
ГДС		80,0	11,3	0,04	0,38	4,0	I	6,5-9,5

Як видно з табл.6, збільшення дози ММБС від 1 г/дм³ до 4 г/дм³ забезпечує зменшення концентрації забруднювачів від 17,7 мг/дм³ до 10,1 мг/дм³ для азоту амонійного, від 8,7 мг/дм³ до 3,4 мг/дм³ – для фосфатів і від 135,3 до 78,0 мгО/дм³ – для ХСК. Але збільшення дози від 4 г/дм³ до 5 г/дм³ не приводить до суттєвого позитивного ефекту вище досліджених забруднювачів.

Також в усіх варіантах досліджені показники стічної доочищеної води задовольняють вимогам ГДС.

Таблиця 7

Вплив максимальної дисперсності сухого ММБС та тривалості біосорбції, дозою 4 г/дм³ на якість доочищення стічних вод

Найменування проб	Максимальний розмір частинок, мм	Тривалість, хв.	Показники якості стічних вод						
			ХСК, мгО/дм ³	Азот амонійний, мг/дм ³	Нітрити, мг/дм ³	Залізо загальне, мг/дм ³	Фосфати, мг/дм ³	Запах бали	рН, од.
Контроль	-	-	136,7±3	18,4±0,5	0,48±0,05	0,60±0,05	8,70±0,16	V	7,68±0,06
Проба 1	0,1	10	82±2	10,8±0,3	0,08±0,02	0,33±0,02	4,20±0,15	I	7,49±0,05
Проба 2	0,1	20	71±1	9,8±0,2	0,04±0,01	0,29±0,01	3,10±0,10	I	7,43±0,03
Проба 3	0,1	30	76±2	10,0±0,1	0,04±0,01	0,25±0,01	3,30±0,11	I	7,47±0,04
Проба 4	1,0	10	78±2	10,1±0,1	0,04±0,01	0,30±0,01	3,40±0,12	I	7,44±0,03
Проба 5	1,0	20	75±1	10,4±0,3	0,04±0,01	0,31±0,02	3,30±0,11	I	7,47±0,04
Проба 6	1,0	30	76±1	10,4±0,3	0,04±0,01	0,33±0,02	3,60±0,13	I	7,49±0,05
ГДС	-	-	80,0	11,3	0,04	0,38	4,0	I	6,5-9,5

Результати експериментів представлені у табл. 7 та на рис. 6-8. Встановлено, що оптимальний час біосорбції складає 20 хвилин, а максимальний розмір частинок сухого ММБС – 0,1 мм.

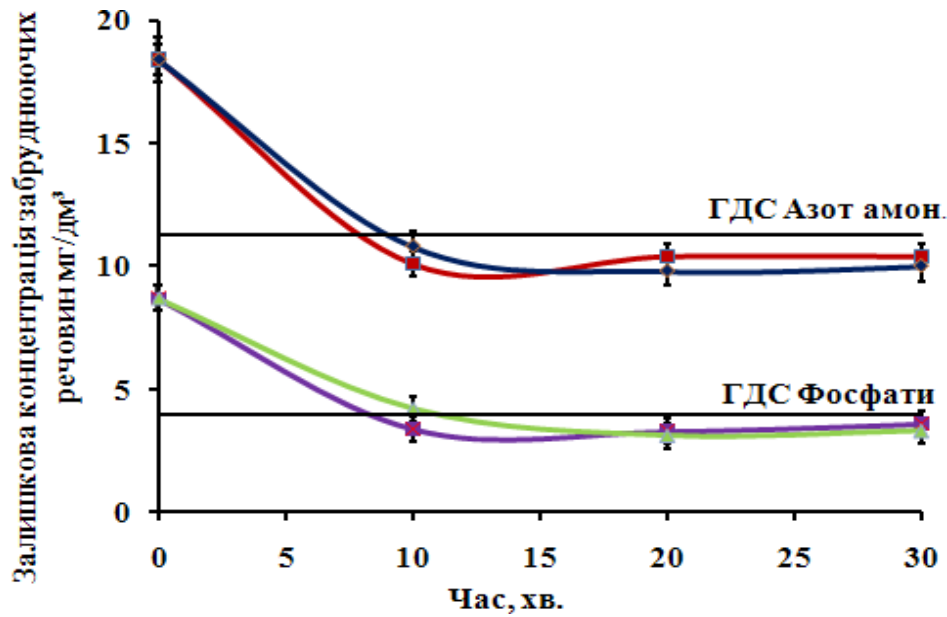


Рис. 6 – Залежність сорбційної здатності сухого ММБС від тривалості біосорбції та максимальної дисперсності щодо: ◆ – азоту амонійного (максимальна дисперсність – 0,1 мм); ■ – азоту амонійного (максимальна дисперсність – 1,0 мм) та ▲ – фосфатів (максимальна дисперсність – 0,1 мм); × – фосфатів (максимальна дисперсність – 1,0 мм)

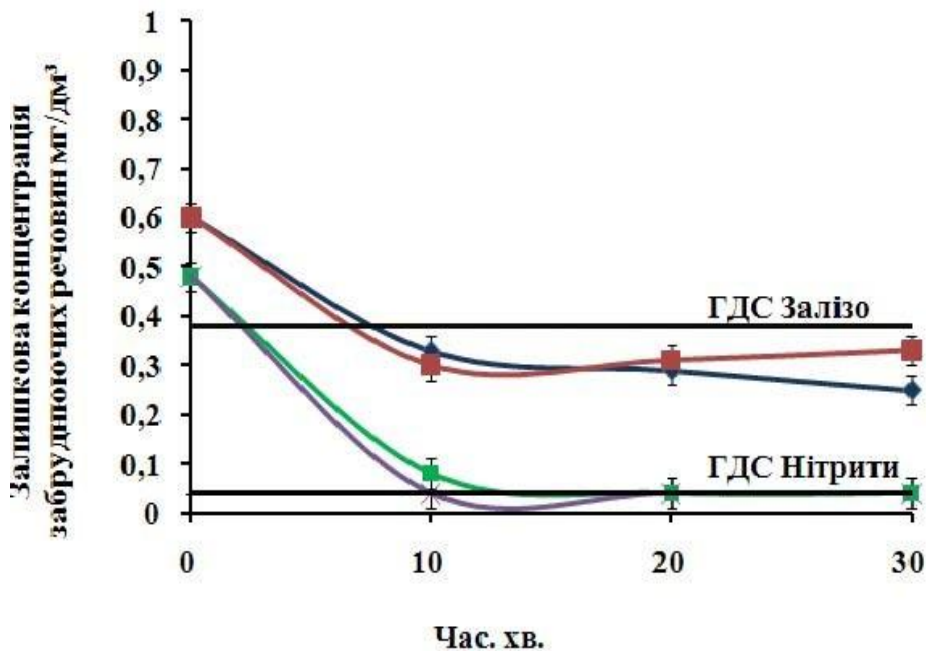


Рис. 7 – Залежність сорбційної здатності сухого ММБС від тривалості біосорбції та максимальної дисперсності щодо: ▲ – нітритів (максимальна дисперсність – 0,1 мм); × – нітритів (максимальна дисперсність – 1,0 мм) та ◆ – заліза (максимальна дисперсність – 0,1 мм); ■ – заліза (максимальна дисперсність – 1,0 мм)

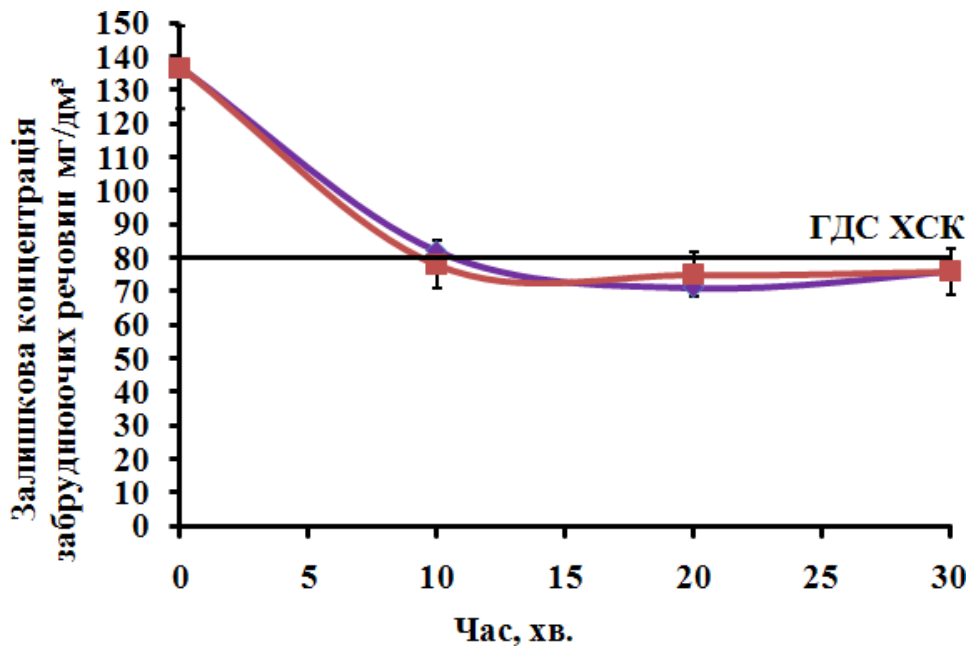


Рис. 8 – Залежність сорбційної здатності сухого ММБС від часу біосорбції та максимальної дисперсності щодо: \blacklozenge – ХСК (максимальна дисперсність – 0,1 мм); \blacksquare – ХСК (максимальна дисперсність – 1,0 мм)

Аналіз залежності сорбційної здатності від часу біосорбції, представлений на рис. 6-8, свідчить, що найбільшій ефективності для азоту амонійного, фосфатів, нітритів, заліза та ХСК досягнуто на початку процесу тривалістю 15-20 хв. В цей період процес стабілізується, а подальше збільшення тривалості процесу недоцільне.

На підставі результатів дослідно-лабораторного експерименту був проведений дослідно-промисловий експеримент із внесенням 3% суспензії в лоток Вентурі перед вертикальними відстійниками, дозою 4 г/дм³(рис.9)

Сухий ММБС (рис.9) готували в ємкості об'ємом 15 м³ та за допомогою насоса-дозатора подавали в лоток Вентурі перед вертикальними відстійниками. Час перебування стічної води у вертикальних відстійниках складає 1,5 години. Доза ММБС залежить від кількості надходження стоків на очисні споруди та становить 4 г/дм³. Осад із вертикальних відстійників (8) поступає самопливом в магнітний сепаратор для вилучення відпрацьованого ММБС, де на високоградієнтних феромагнітних насадках відбувається відділення відпрацьованого ММБС. Мул з магнітного сепаратора потрапляє у відстійник мулу (13), а потім на мулові площадки. При повному завантаженні високоградієнтної феромагнітної насадки відпрацьованим ММБС подача через магнітний сепаратор припиняється та здійснюється регенерація відпрацьованого ММБС при відключенні зовнішнього магнітного поля. Регенерація проводиться розчином нітратної кислоти сепаратора. Після чого відновлений ММБС промивається водою, за допомогою дренажного насоса потрапляє в ємність для ММБС та використовується повторно для сорбції забруднень зі стічної води. Після здійснення регенерації відключається магнітне поле сепаратора. Потім очищена стічна вода потрапляє в РЗПВ(9) та в РЧПВ (10), де відбувається подальша доочистка від забруднюючих речовин. Час знаходження стоків в резервуарах складає 5,5 години. Потім очищена

стічна вода потрапляє в РДС (11), де відбувається її знезараження гіпохлоритом натрію. Доочищена вода по колектору потрапляє в р. Дніпро. Даний експеримент проводився протягом 5 діб. Результати дослідно-промислового експерименту приведені в таблиці 8.

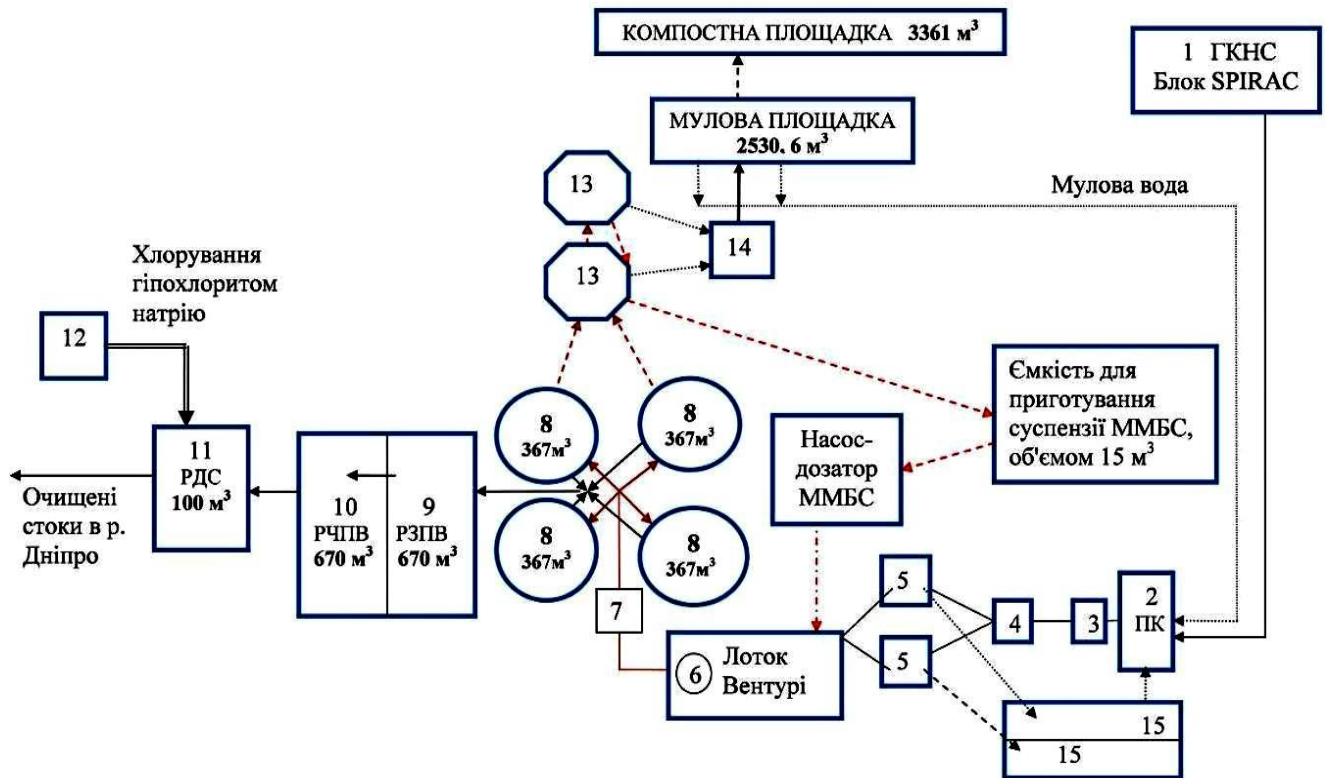


Рис. 9 – Блок-схема очистки стічних вод м. Славутича з використанням магнітоміченого біосорбенту на основі *S. cerevisiae*: 1– головна каналізаційна насосна станція (ГКНС); 2 – приймальна камера (ПК); 3 – вертикальна решітка; 4 – горизонтальна решітка; 5 – пісколовки; 6 – лоток Вентурі та вузол обліку стоків; 7 – камера хлоп'яутворення; 8 – вертикальні відстійники; 9 – резервуар забрудненої промивної води (РЗПВ); 10 – резервуар чистої промивної води (РЧПВ); 11 – резервуар доочищених стоків (РДС); 12– хлораторна; 13 – магнітні сепаратори; 14 – відстійник мулу; 15 – піскові майданчики

Таблиця 8

Результати роботи очисних споруд м.Славутича при внесенні сухого ММБС

№	Найменування показника	Стічні води, які надходять на очисні споруди	Доочищені стічні води, при внесенні сухого ММБС	Ефект очистки, %	Гранично-допустимий скид (ГДС)
1.	ХСК, мгО/дм ³	428±6	76,2±2,0	82,2	80,0
2.	рН, од.	7,59±0,05	7,45±0,03	–	6,5 – 8,5
3.	Азот амонійних солей, мг/дм ³	38,6±0,8	10,8±0,4	72,0	11,3
4.	Нітрити, мг/дм ³	0,48±0,05	0,03±0,01	93,7	0,04
5.	Фосфати, мг/дм ³	8,9±0,18	3,27±0,11	63,2	4,0
6.	Запах, бали	V	I	–	I
7.	Залізо, мг/дм ³	0,62±0,05	0,18±0,01	70,9	0,38

Результати даного експерименту свідчать про позитивний вплив сухого ММБС на роботу очисних споруд м. Славутича. Значно покращився ефект очистки по ХСК, азоту амонійному, нітратам, фосфатам, залізу загальному. Показники доочищеної стічної води не перевищують нормативних показників і відповідають нормам, які встановлені «Дозволом на спеціальне водокористування». Сухий ММБС рекомендовано для постійного використання для доочищення стічних вод м. Славутич. Проведені розрахунки показали, що економічна ефективність від впровадження складає 168 тис. грн. за рік.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено новий метод отримання сухого ММБС з гомогенною контрольованою магнітною сприйнятливістю на основі дріжджів *S. cerevisiae*, що ґрунтується на магнітній модифікації клітин з використанням магнітогідродинамічного перемішування частинок магнетиту та клітин дріжджів в схрещених електричному і магнітному полях.
2. Магнітна сприйнятливість сухого ММБС, виготовленого методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях, є у 1,3-1,7 разів більшою, ніж для ММБС, виготовленого при механічному перемішуванні. Окрім того для ММБС, отриманого за методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях магнітна сприйнятливість є стабільною у процесі перемішування (відхилення від середнього значення – 2,5-5%), тоді як для за механічного перемішування відхилення ММБС від середнього значення становить 29-35%.
3. Встановлені раціональні параметри виготовлення ММБС, отриманого методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях (рН робочого розчину – 2,5; час перемішування – 2 хв.; напруженість магнітного поля – 240 кА/м; величина електричної напруги – 0,5 В). Максимальна магнітна сприйнятливість при отриманні ММБС на установці №2 досягається вже на 2 хв. та складає $0,0052 \pm 0,0001$. Розміри частинок ММБС, виготовлених методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях, за відповідних концентрацій наночастинок магнетиту у 3-6 разів менші, ніж розміри частинок магнітомічених біосорбентів, виготовлених за механічного перемішування. Ефективність вилучення іонів міді сухим ММБС, виготовленим методом МГДП у схрещених магнітному та електричному полях, на 33-35% вище, ніж сухим ММБС, виготовленим методом механічного перемішування.
4. Доведено, що використання сухого ММБС у дозі 4 г/дм^3 при середньому розмірі кластерів 2 мкм і тривалості сорбції 20 хв сприяє ефективному видаленню забруднень з господарсько-побутових стічних вод, зниженню їх вмісту до рівня ГДС, а також нейтралізації запаху з V балів до I балу. Ефект очистки за даних умов складає: по ХСК – 48,1 %; азоту амонійному – 46,7 %; нітратах – 91,7 %; фосфатах – 64,4 %; залізу загальному – 51,7 %. Ефективність вилучення іонів міді з модельного розчину сухим ММБС, виготовленим методом МГДП у схрещених електричному та магнітному полях, становить 93-95 %.

5. Розроблена біотехнологічна схема очищення стічних вод з використанням сухого ММБС. За даними лабораторних досліджень показники доочищеної стічної води не перевищують ГДС.

Розроблений біосорбент можна вилучати у швидкісному режимі за допомогою магнітної сепарації та використовувати повторно, що зменшить собівартість очистки стоків (Акти впровадження: № 41 від 22.03.2017 р., № 36 від 24.03.2017 р., № 07-04/564 від 31.03.2017 р.).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Горобець, С. В. Застосування магнітомічених клітин *S.cerevisiae* як біосорбенту на очисних спорудах [Текст] / С. В. Горобець, Ю. В. Карпенко, О. В. Ковальов, В. В. Олішевський // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2013. – № 3. – С. 42–47. (Здобувач провів аналіз літератури та здійснив експериментальні дослідження, підготовці та оформленні матеріалів до публікації)
2. Gorobets S. Fractal dimension and magnetic susceptibility of magnetically labeled biosorbent based on *Saccharomyces cerevisiae* yeast / [S. Gorobets, O. Gorobets, O. Kovalyov, A. Sopina, Yu. Chyzh, S. Cherepov] // Functional materials. – 2015. – № 2(22). – P. 193–198. (Здобувач провів літературний аналіз та здійснив експериментальні дослідження магнітної сприйнятливості)
3. Горобець, С. В. Ефективність магнітокерованого біосорбенту на основі дріжджів *Sacharomyces cerevisiae* для очищення стічних вод [Текст] / С. В. Горобець, Ю. М. Чиж, О. В. Ковальов, І. О. Шпетний // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2015. – № 3. – С. 14–22. (Здобувач здійснив пошук та узагальнення літературних даних)
4. Gorobets S. Analysis of effectiveness of magnetically labeled biosorbent obtained throught the mechanical and magnetohydrodynamic stirring / [S. Gorobets, O. Gorobets, Yu. Chyzh, O. Kovalyov, V. Perizhok, V. Golub] // EUREKA: Physics and Engineering. – 2016. – №5. – P. 37 – 43 (Здобувач брав участь в узагальненнях, систематизації та аналізі даних літературних джерел і постановці завдань дослідження)
5. Gorobets S. Examining the properties of dry magnetically controlled biosorbent, obtained by the method of mechanical and magneto-hydrodynamic agitation / S. Gorobets, O. Gorobets, O. Kovalyov, K. Hetmanenko, S. Kovalyova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, №6/10 (84). – P. 57–63. (Здобувач брав участь у підборі теоретичному аналізі джерел літератури, експериментальних досліджень, узагальненні результатів, підготовці та оформленні матеріалів до публікації)
6. Горобець С.В. Практичне використання сухого магнітокерованого біосорбенту в системі очищення господарсько-побутових стічних вод [Текст] /С.В. Горобець, О.Ю. Горобець, О.В. Ковальов, Ю.В. Шатохіна, С.О.Ковальова // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2016. – 6/3(32). – С.46–51. (Здобувач брав участь у проведенні пошуку джерел літератури, проведенні експериментів, обробленні результатів, написанні та оформленні статті)
7. Ковальов О. В. Лабораторні дослідження озонування стічних вод [Текст] / О. В. Ковальов, І. М. Іванова // Збірник наукових праць за матеріалами

- VI міжнародної науково-практичної конференції. – Ч.: ЧДЕГУ, 2010. – С. 158–161. (Здобувач здійснив експериментальні дослідження процесу озонування стічних вод)
8. Ковальов О.В. Можливі підходи до вирішення проблеми ефективної очистки стічних вод з метою збереження довкілля [Текст] / О.В.Ковальов, О.М. Семака, О.О. Шевченко, І.М. Іванова // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2011. – №2 (49). – С. 247–251. (Здобувач провів аналіз літератури та здійснив експериментальні дослідження)
 9. Шатохіна Ю.В. Дослідження кореляції між показниками стічної води для оперативного контролю ХСК і завислих речовин [Електронний ресурс] / Ю.В. Шатохіна, О.В. Ковальов // Енергетика і автоматика. – К.: Національний університет біоресурсів і природокористування України. – 2014. – №2. – С. 50–60. (Здобувач здійснив пошук та узагальнення літературних даних)
 10. Патент України на корисну модель № 101016, МПК (2006.01) C02F 1/48. Спосіб отримання магнітокерованого біосорбенту / Горобець С.В., Горобець О.Ю., Чиж Ю.М., Ковальов О.В.; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u201500909; Заявл. 05.02.2015; Опубл. 25.08.2015, бюл. № 16. (Здобувач брав участь у проведенні патентного пошуку, розробці способу отримання магнітокерованого біосорбенту, написанні та оформленні заявки на патент).
 11. Патент України на корисну модель № 114299, МПК (2006.01) C02F 1/48. Спосіб отримання магнітокерованого біосорбенту / Горобець С.В., Горобець О.Ю., Киричок Л.В., Ковальов О.В.; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u201607800; Заявл. 15.07.2016; Опубл. 10.03.2017, бюл. № 5. (Здобувач брав участь у проведенні патентного пошуку, розробці способу отримання магнітокерованого біосорбенту, написанні та оформленні заявки на патент).
 12. Горобець С.В. Практичне застосування магнітомічених клітин *S. cerevisiae* в якості біосорбенту для отримання сухого магнітокерованого біосорбенту/ С.В. Горобець, Ю.В. Карпенко, О.В.Ковальов, А.В. Сопіна // Тези доповідей VI Все-української науково–практичної конференції (5 квітня 2012 р., м. Київ) – К.:НТУУ «КПІ», 2012. – С.144 (Здобувач брав участь у проведенні досліджень, обробці експериментальних даних та написанні тез).
 13. Горобець С.В. Отримання сухого магнітокерованого біосорбенту на основі хлібопекарських дріжджів для вилучення іонів важких металів з водних розчинів / С.В. Горобець, О.В. Ковальов, Л.В. Сорокіна, А.В. Сопіна// Збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції «Технології очищення води. Технічні, біологічні та екологічні аспекти» (3-5 грудня 2013 р., м. Київ) – К.:НТУУ «КПІ», 2013. – С.70 (Здобувач брав участь у плануванні та отриманні сухого магнітокерованого біосорбенту, оформленні тези доповіді).
 14. Горобець С. Властивості сухого магнітокерованого сорбенту на основі

- дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* для вилучення іонів металів з водних розчинів / С. Горобець, О. Ковальов, Л. Сорокіна, А. Сопіна // Тези доповідей VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції, присвяченої 200-й річниці з дня народження Т.Г.Шевченка (25 квітня 2014 р., м. Київ) – К.:НТУУ «КПІ», 2014. – С.93–94 (*Здобувач узагальнив результати досліджень*).
15. Шатохіна Ю.В. Математичне моделювання у процесах очищення стічних вод / Ю.В. Шатохіна, О.В. Ковальов, С.М. Лапач// Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2014: IX міжнародна науково – практична конференція (23 – 27 червня 2014, м. Київ – с. Жукін). – С. 29 – 31. (*Здобувач описав математичну модель процесу очищення стічних вод*)
16. Горобець С.В. Отримання сухого магнітокерowanego біосорбенту на основі дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* для очищення стічних вод / С. В. Горобець, О.В. Ковальов, Ю.М. Чиж // Біотехнологія XXI століття: Тези доповідей IX Всеукраїнської науково – практичної конференції присвяченій 170 річниці від дня народження Іллі Мечникова (24 квітня 2015р., м. Київ) – К.:НТУУ «КПІ», 2015. – С.116 (*Здобувач проаналізував сфери застосування сухого магнітокерowanego біосорбенту*)
17. Горобець С.В. Ефективність магнітокерowanego біосорбенту на основі дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* для очищення стічних вод / С.В. Горобець, О.В. Ковальов, Ю.М. Чиж, І.О. Шпетний // Біотехнологія XXI століття: Тези доповідей IX Всеукраїнської науково – практичної конференції присвяченій 170 річниці від дня народження Іллі Мечникова (24 квітня 2015р., м. Київ) – К.:НТУУ «КПІ», 2015. – С.120 (*Здобувач брав участь у плануванні та проведенні експериментальних досліджень, аналізу їх результатів, оформленні тез*)
18. Shatohina J.V. Features of control of wastewater Collection of international scientific papers / J.V.Shatohina, O.V.Kovalyov // “Ukraine – EU. Modern technology, business and law” Kosice, Slovakia 2015 – P.37–39. (*Здобувач брав участь у проведенні досліджень, обробці експериментальних даних та написанні тез*)
19. Горобець С.В. Стабільність магнітних властивостей магнітокерowanego біосорбенту на основі дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* / С.В. Горобець, О.В. Ковальов, В.І. Періжок // Біотехнологія XXI століття: Тези доповідей X Всеукраїнської науково – практичної конференції присвяченій 135-й річниці від дня народження Олександра Флемінга (22 квітня 2016р., м. Київ). – К.:НТУУ «КПІ», 2016. – С. 118 (*Здобувач брав участь у плануванні та проведенні експериментальних досліджень, аналізу їх результатів, оформленні тез*)
20. Ковальов О.В. Дослідження ізотерм сорбції катіонів міді сухим магнітоміченим біосорбентом на основі дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* // Біотехнологія XXI століття: Тези доповідей XI Всеукраїнської науково-практичної конференції (Київ, 21 квітня 2017р.). – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 100 (*Здобувач здійснив експериментальні дослідження процесу сорбції катіонів міді сухим магнітоміченим біосорбентом*)

АНОТАЦІЯ

Ковальов О.В. Біотехнологія вилучення іонів важких металів та інших домішок сухим магнітоміченим біосорбентом на основі *Saccharomyces cerevisiae*. – На правах рукопису.

Дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 03.00.20 – біотехнологія. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, м. Київ, 2017.

Дисертаційна робота присвячена актуальним питанням: встановленню оптимальних біотехнологічних параметрів очистки стічних вод сухим магнітоміченим біосорбентом (ММБС) на основі дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* за рахунок розробки методу магнітомічення біосорбенту, який забезпечує гомогенність та стабільність магнітної сприйнятливості, відсутність кластеризації ММБС, скорочення тривалості сорбції за рахунок використання високоградієнтної магнітної сепарації, тобто вилучення ММБС у швидкісному режимі та підвищення ступеня вилучення іонів важких металів та забруднюючих речовин зі стічних вод.

Ефективність сухого магнітоміченого біосорбенту полягає у тому, що він не кластеризується, має високу сорбційну ємність, ефективність сорбції іонів Cu^{2+} складає 93-95%. Доводить концентрації забруднювачів (ХСК, азот амонійний, нітрити, фосфати, залізо загальне) стічних вод до рівня ГДС.

Результати даного дослідження можуть бути використані для підбору дози сухого біосорбенту для очистки стічних вод каналізаційно-очисних споруд, де є проблема з очисткою вище перерахованих показників

Ключові слова: сухий магнітомічений біосорбент, біосорбція, наночастинки магнетиту, механічне перемішування, магнітогідродинамічне перемішування у схрещених електричному та магнітному полях, стічні води.

АННОТАЦИЯ

Ковалев А.В. Биотехнология извлечения ионов тяжелых металлов и других примесей сухим магнитомеченым биосорбентом на основе *Saccharomyces cerevisiae*. – На правах рукописи.

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 03.00.20 – биотехнология. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» МОН Украины, г. Киев, 2017.

Диссертация посвящена актуальным вопросам: установлению оптимальных биотехнологических параметров очистки сточных вод сухим магнитомеченым биосорбентом (ММБС) на основе дрожжей *S. cerevisiae* за счет разработки метода магнитомечения биосорбента, который обеспечивает гомогенность и стабильность магнитной восприимчивости, отсутствие кластеризации ММБС, сокращение продолжительности сорбции за счет использования высокоградиентной магнитной сепарации, то есть изъятие ММБС в скоростном режиме и повышение степени извлечения ионов тяжелых металлов и загрязняющих веществ из сточных вод. Разработанный новый метод получения сухого ММБС, который базируется на магнитной модификации клеток методом

МГДП в скрещенных электрическом и магнитном полях, с контролируемой магнитной восприимчивостью на основе дрожжей *S. cerevisiae* позволяет уменьшить стоимость ММБС за счет практически полного (на 98%) извлечения отработанного ММБС с рабочего раствора.

Магнитная восприимчивость сухого ММБС, полученного методом МГДП в скрещенных электрическом и магнитном полях, постоянная в процессе перемешивания с отклонением от среднего значения в пределах 2,5-5%, а ММБС, полученного при механическом перемешивании, – в пределах 29-35%. Магнитная восприимчивость сухого ММБС, полученного методом МГДП в скрещенных электрическом и магнитном полях, в 1,3-1,7 раза выше магнитной восприимчивости ММБС, полученного при механическом перемешивании. Сорбционная способность сухого ММБС, полученного методом МГДП в скрещенных электрическом и магнитном полях, на 30-40% выше, чем сухого ММБС, полученного при механическом перемешивании.

Определена эффективность извлечения не только ионов тяжелых металлов сухим магнитомеченным биосорбентом на основе дрожжей *S. cerevisiae*, полученным магнитогидродинамическим перемешиванием в скрещенных электрическом и магнитном полях, но и эффективную очистку таких показателей хозяйственно-бытовых сточных вод как: запаха, ХПК, азота аммонийного, нитритов, фосфатов, железа общего.

Эффективность сухого магнитомеченного биосорбента заключается в том, что он не кластеризуется, обладает высокой сорбционной способностью, эффективность сорбции ионов Cu^{2+} составляет 93-95%. Доказано, что сухой ММБС, доза которого составляет 4 г/дм³, а средний размер кластеров – 2 мкм, при продолжительности сорбции 20 мин. эффективно удаляет загрязнения с хозяйственно-бытовых сточных вод г. Славутича, Киевская область и доводит концентрации загрязняющих веществ до уровня ПДК. Нейтрализует запах сточной воды с V баллов до I бала. Эффект очистки ММБС при данных условиях по: ХПК составляет 48,1 %; азоту аммонийному – 46,7 %; нитритах – 91,7 %; фосфатах – 64,4 %; железу общему – 51,7%. На основании опытно-лабораторного эксперимента был проведен опытно-промышленный эксперимент по внесению 3% суспензии ММБС, доза которой составляла 4 г/дм³. Данный эксперимент проводился в течении 5 дней. Производился среднесуточный отбор проб воды, которая поступала на очистные сооружения, а также проб очищенной сточной воды, которые в дальнейшем исследовались лабораторно. Усредненные показатели качества сточной воды до очистки и после процесса очистки, в течении 5 дней позволяют сделать вывод о результате опытно-промышленного эксперимента по работе очистных сооружений г. Славутича и свидетельствуют о позитивном эффекте. Наблюдается высокая эффективность очистки очищенных сточных вод на выходе с очистных сооружений, включая процесс обеззараживания. Эффект очистки составляет по ХПК - 82,2 %, азоту аммонийному – 72,0 %, нитритам – 93,7 %, фосфатам – 63,2 %, железу – 70,9 %. Запах очищенной сточной воды нейтрализуется до I балла. Очищенная сточная вода не превышает нормативных показателей и соответствует нормам, которые установлены «Разрешением на специальное водопользование для г. Славутича, Киевская

область». Исследование полезно тем, что сухой ММБС, полученный с помощью МГДП в скрещенных электрическом и магнитном полях, в дальнейшем можно изъять в скоростном режиме с помощью магнитной сепарации.

Результаты данного исследования могут быть использованы по подбору оптимальных технологических параметров сухого биосорбента для очистки сточных вод канализационно-очистных сооружений, где есть проблема с очисткой перечисленных показателей. Это позволит очистным сооружениям очищать сточную воду до нормативов ПДК и уменьшить отрицательное воздействие на окружающую среду и водоемы.

Ключевые слова: сухой магнитомеченный биосорбент, биосорбция, наночастицы магнетита, механическое перемешивание, магнитогидродинамическое перемешивание в скрещенных электрическом и магнитном полях, сточные воды.

SUMMARY

Kovalyov, O.V. Biotechnological methods for heavy-metal ions and other contaminants removal using dry magnetic particles labeled biosorbent with *Sacharomyces cerevisiae*. – Manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Technical Sciences by speciality 03.00.20 – biotechnology. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

The thesis addresses the problems of current interest. In particular, it aims to determine the optimal biotechnological parameters of wastewater purification with the use of dry magnetic particles labeled biosorbent (MPLB) with *Saccharomyces cerevisiae* yeast using a newly developed method of biosorbent magnetic particles labeling, which ensures homogeneity and stability of magnetic susceptibility, MPLB non-clasterization, and reduction of sorption duration through the use of the high-gradient magnetic separation, i.e. speed-range MPLB removal and maximizing the level of heavy-metal ions and other contaminants removal from wastewater.

Effectiveness of the dry magnetic particles labeled biosorbent is based on the fact that it does not cluster, has high sorption capacity, sorption effectiveness for Cu^{2+} ions is 93-95%. It also reduces the concentrations of wastewater pollutants (chemical oxygen demand, ammonium nitrogen, nitrites, phosphates, total iron) to the level of maximum permissible discharge.

The results of this research can be used for dry biosorbent dose-ranging necessary for purification of wastewater in sewage treatment plants with complicated regulation of above mentioned factors.

Keywords: dry magnetic particles labeled biosorbent, biosorption, magnetite nanoparticles, mechanical mixing, magnetohydrodynamic mixing in crossed electric and magnetic fields, wastewater.

