

УДК 66.094.37

Л.А. ФРОЛОВА, Т.Є. БУТИРИНА, М.О. САВЧЕНКО, М.К. СУХИЙ
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ФОТОКАТАЛІТИЧНОЇ ДЕСТРУКЦІЇ МЕТИЛЕНОВОГО СИНЬОГО В ПРИСУТНОСТІ МАГНЕТИТУ

Використання математичного моделювання для розробки нових технологій очищення стічних вод є дуже важливим, оскільки дає змогу скоротити кількість дослідів, визначити оптимальні умови процесу, побудувати математичну модель. Багатофакторні залежності, які, наприклад, отримують за допомогою методів планування експерименту – це потужні статистичні інструменти, які дозволяють визначити сумарний вплив досліджуваних змінних, який можливо оцінювати одночасно, провести статистичну обробку результатів, що будуть використані, проводити оптимізацію з використанням математичних моделей, щоб отримати найкращі експериментальні умови проведення процесу очищення.

Для оцінки впливу обраних факторів використовувався метод центрального композиційного рототабельного планування експерименту. Визначали вплив таких параметрів, як концентрація фотокатализатора (x_1), об'єм H_2O_2 (x_2) та час обробки УФ опроміненням (x_3) на деградацію метиленового синього (МС).

Представлені результати показують, що магнетит є ефективним катализатором розкладу МС під дією УФ-випромінювання. Встановлено, що більшість ефектів є статистично значущими щодо функції відгуку. Високі значення коефіцієнтів при x_3 , x_1 , x_2 вказують на те, що вони є найбільш впливовими на процес фотокаталітичної деструкції. Коефіцієнт при x_3 не тільки має найвище значення з усіх ефектів, але й приблизно в 2 рази більше, ніж коефіцієнт при x_3 . Коефіцієнти відповідні взаємодіям x_1x_2 (1,32) і x_1x_3 (5,24) представлені значеннями, що в 5,84 і 1,5 разів менше відносно коефіцієнту при x_3 .

Значення коефіцієнта детермінації (R^2) становить приблизно 0,998, що підтверджує тісний взаємозв'язок між незалежними факторами і функцією відгуку. Високі значення коефіцієнтів в лінійних доданках (x_2 , x_3) в порівнянні з іншими коефіцієнтами означають, що вони є найбільш впливовими у рівнянні.

Встановлено, що підвищення часу обробки призводить до збільшення ступеню деградації МС. Вплив концентрації перекису водню та катализатора має екстремальний характер. Значимість факторів змінюється наступним чином: $t_{об} > t_{адс} > V_{H_2O_2}$. Крім того, дисперсійний аналіз показав узгодженість між експериментальними даними та теоретично визначеними, тобто отримана математична модель адекватна.

Ключові слова: математичне моделювання, фотокаталіз, стічні води, планування експерименту

Л.А. ФРОЛОВА, Т.Е. БУТЫРИНА, М.О. САВЧЕНКО, М.К. СУХОЙ
ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днипро

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ ДЕСТРУКЦИИ МЕТИЛЕНОВОГО СИНЕГО В ПРИСУТСТВИИ МАГНЕТИТА

Использование математического моделирования для разработки новых технологий очистки сточных вод является очень важным, поскольку позволяет сократить количество опытов, определить оптимальные условия процесса, построить математическую модель. Многофакторные зависимости, которые, например, получают с помощью методов планирования эксперимента – это мощные статистические инструменты, которые позволяют определить суммарное влияние исследуемых переменных, которое можно оценивать одновременно, провести статистическую обработку результатов, которые будут использованы, проводить оптимизацию с использованием математических моделей, чтобы получить лучшие экспериментальные условия проведения процесса очистки.

Для оценки влияния выбранных факторов использовался метод центрального композиционного планирования эксперимента. Определяли влияние таких параметров, как концентрация фотокатализатора (x_1), объем H_2O_2 (x_2) и время обработки УФ облучением (x_3) на деградацию метиленового синего (МС).

Представленные результаты показывают, что магнетит является эффективным катализатором разложения МС под действием УФ-излучения.

Установлено, що більшість ефектів являються статистически значимими по отношению к функції отклика. Высокие значения коэффициентов при x_3 , x_1 , x_2 указывают на то, что они являются наиболее влияющими на процесс фотокаталитической деструкции. Коэффициент при x_3 не только имеет высокое значение из всех эффектов, но и примерно в 2 раза больше, чем коэффициент при x_1 . Коэффициенты, соответствующие взаимодействиям x_1x_2 (1,32) и x_1x_3 (5,24) представлены значениями, в 5,84 и 1,5 раза меньше относительно коэффициента при x_3 .

Значение коэффициента детерминации (R^2) составляет 0,998, что тесную взаимосвязь между независимыми факторами и функцией отклика. Высокие значения коэффициентов в линейных слагаемых (x_2 , x_3) по сравнению с другими коэффициентами означают, что они являются наиболее влиятельными в уравнении.

Установлено, что увеличение времени обработки привело к увеличению степени деградации МС. Влияние концентрации перекиси водорода и катализатора имеет экстремальный характер. Значимость факторов меняется следующим образом: $t_{об} > m_{кат} > V_{H_2O_2}$.

Кроме того, дисперсионный анализ показал согласованность между экспериментальным данным и теоретически определенными, то есть, получена математическая модель адекватна.

Ключевые слова: математическое моделирование, фотокатализ, сточные воды, планирование эксперимента.

L.A. FROLOVA, T.E. BUTYRINA, M.O. SAVCHENKO, M.K. SUKHYI
Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro

DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF PHOTOCATALYTIC DESTRUCTION OF METHYLENE BLUE IN THE PRESENCE OF MAGNETITE

The use of mathematical modelling for the development of new technologies for wastewater treatment is very important because it allows to reduce the number of experiments, to determine the optimal process conditions, to build a mathematical model. Multifactor dependencies, which, for example, are obtained using experimental planning methods, are powerful statistical tools that allow to determine the total impact of the studied variables, which can be estimated simultaneously, to statistically process the results to be used, to optimize using mathematical models to obtain the best experimental conditions for the purification process.

To assess the influence of selected factors, the method of central compositional planning of the experiment was used. The effect of parameters such as photocatalyst concentration (x_1), H_2O_2 volume (x_2) and UV treatment time (x_3) on the degradation of methylene blue (MB) was determined.

The presented results show that magnetite is an effective catalyst for the decomposition of MB under the action of UV radiation.

It is established that most effects are statistically significant for the response function. High values of the coefficients at x_3 , x_1 , x_2 indicate that they are the most influential in the process of photocatalytic destruction. The coefficient at x_3 not only has the highest value of all effects, but is also about 2 times greater than the coefficient at x_1 . The coefficients corresponding to the interactions x_1x_2 (1.32) and x_1x_3 (5.24) are represented by values that are 5,84 and 1.5 times less than the coefficient at x_3 .

The value of the of determination coefficient (R^2) is approximately 0.998, which confirms the adequacy of the quadratic model, which represents the relationship between independent factors and the response function. High values of coefficients in linear terms (x_2 , x_3) in comparison with other coefficients mean that they are the most influential in the equation.

It was found that increasing the processing time led to an increase in the degree of degradation of MB. The effect of the concentration of hydrogen peroxide and catalyst is extreme. The significance of the factors varies as follows: $t_{treat} > m_{cat} > V_{H_2O_2}$.

In addition, analysis of variance showed consistency between experimental data and theoretically determined, i.e. the obtained mathematical model is adequate.

Key words: mathematical modelling, photocatalysis, wastewater, experiment planning.

Постановка проблеми

Використання математичного моделювання для розробки нових технологій очищення стічних вод є дуже важливим оскільки дає змогу скоротити кількість дослідів,

визначити оптимальні умови процесу, побудувати математичні моделі [1-5]. Незважаючи на велику кількість робіт, що присвячені очищенню стічних вод від барвників, побудовані математичні моделі, як правило, розглядають залежності ступеню очищення та фотокаталітичної активності від одного фактору впливу, які, на відміну від багатофакторних досліджень, не дозволяють зрозуміти, як взаємодіють змінні і вимагають велику кількість експериментів. Багатофакторні моделі, які, наприклад, отримують за допомогою методів планування експерименту – це потужні статистичні інструменти, які дозволяють визначити сумарний вплив досліджуваних параметрів, який можливо оцінювати одночасно, провести статистичну обробку результатів, що будуть використані, проводити оптимізацію з використанням математичних моделей, щоб отримати найкращі експериментальні умови проведення процесу очищення.

Крім того, наявність адекватної лінійної математичної моделі стохастичного процесу дозволяє використовувати її для оптимізації. Якщо застосовувати один з методів оптимізації, наприклад метод градієнта, або метод крутого сходження, можна досягти області оптимуму процесу, який досліджується. Після досягнення області оптимуму тим або іншим методом, перед дослідником постає завдання детального вивчення поверхні відгуку.

Аналіз досліджень і публікацій

Найкраще області оптимуму описуються поліномами високих порядків, найчастіше поліномами другого порядку. Очевидно, що для одержання математичної моделі кількість необхідних дослідів різко збільшується при зростанні числа членів апроксимуючого полінома. Найбільш широко в інженерній практиці для опису оптимуму використовується метод композиційного ортогонального рототабельного планування експерименту, у назві якого відображені основні принципи його побудови [6].

Для опису процесу гетерогенної деструкції метиленового синього необхідно враховувати механізм процесу та особливості дії фотокаталізатору. При застосуванні гетерогенного фото-Фентон процесу у якості каталізаторів можливим є використання гідроксидів металів, оксидів, оксигідроксидів, феритів перехідних металів. На відміну від гомогенного каталізу, гетерогенний каталіз відбувається в широкому діапазоні рН, і зберігає свої властивості продовж багатьох циклів [7-9].

Використання центрального композиційного рототабельного планування експерименту дозволяє оптимізувати процес очищення і обрати найкращі умови каталітичної деградації метиленового синього.

Таким чином, оптимізація фотокаталітичного процесу дуже важлива, оскільки трансформація вихідної забруднюючої сполуки та побічних продуктів її окислення є складною, а математичні моделі необхідні для прогнозування і оптимізації не завжди адекватно описують процес.

Мета роботи – визначити оптимальні умови фотокаталітичної деградації метиленового синього.

Викладення основного матеріалу досліджень

Для оцінки впливу обраних факторів використовувався метод центрального композиційного планування експерименту. Визначали вплив таких параметрів, як концентрація фотокаталізатора (x_1), об'єм H_2O_2 (x_2) та час обробки УФ опроміненням (x_3) на деградацію метиленового синього. Ядро центрального композиційного плану становив повний факторний експеримент (ПФЕ) типу 2^n за $n=3$.

План ПФЕ доповнювали деякою кількістю зоряних точок, координати яких залежать від прийнятого принципу оптимальності. Загальна кількість дослідів при такому плануванні визначається формулою

$$N = 2^n + 2n + n_0, \quad (1)$$

де доданки – відповідно кількість дослідів ПФЕ, зоряних точок та нульових точок.

Зоряні точки були побудовані на осях координат факторів і для повного факторного експерименту величина зоряного плеча α дорівнює:

$$\alpha = 2^{\frac{n}{4}}, \quad (2)$$

Табл.1

Найменування	ПФЕ типу 2^n $n=3$
Кількість дослідів ядра матриці	$2^3 = 8$
Кількість зоряних точок	6
Величина α	1,682
Кількість нульових точок	6

Крім того, при рототабельному плануванні на експериментальні точки в центрі плану покладається додаткове завдання – зробити дисперсію передбаченого значення всередині області експериментування постійною та не залежною від відстані до центру плану.

Оскільки обробка планів другого порядку вимагає значного обсягу обчислень, то найкраще їх виконували за допомогою програмного модуля STATISTICA 10.

Натуральні та кодовані значення рівнів для кожного з факторів наведені в таблиці 2.

Табл. 2

Натуральні та кодовані значення рівнів факторів

Фактор		Натуральні значення			Кодовані		
Назва	позначення	максимум	мінімум	центр	максимум	мінімум	центр
Маса, г/100мл	x_1	0,15	0,05	0,1	+1	-1	0
Об'єм H_2O_2 ,мл/100мл	x_2	0,75	0,25	0,5	+1	-1	0
Час, хвилин	x_3	30	10	20	+1	-1	0

Регресійна модель другого порядку була використана для опису експериментальних даних, згідно з рівнянням:

$$Y_i = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon, \quad (4)$$

де $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ – коефіцієнти при змінних, ε – величина, що враховує вплив випадкових факторів.

Аналіз результатів розрахунку функції відгуку проводили застосовуючи дисперсійний аналіз результатів.

В якості функції відгуку використовували ступінь розкладання МС:

$$X = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} 100\%, \quad (5)$$

де C_0 – початкова концентрація МС в розчині, C_t – концентрація МС в момент часу t .

Ідентифікацію та визначення концентрації МС, проводили спектрофотометричним аналізом за допомогою спектрофотометра UV 5800 PC.

Для визначення фотокаталітичної активності синтезованих наночастинок магнетиту в реакціях деструкції метиленового синього було складено відповідний план експерименту.

План експерименту складався з 8 основних точок, 6 зіркових точок і 3 повторень у центральній точці, що налічує 17 експериментів, як показано в таблиці 3. Репліки в центральній точці дозволили оцінити експериментальну помилку та адекватність моделі. Експериментальні значення функції відгуку (ступінь розкладання МС) для кожної комбінації факторів, представлено в таблиці 3.

Табл. 3

План проведення та результати експерименту

N	$m_{\text{кат}}$	H_2O_2	τ	$X_{\text{мс}}, \%$
1	1,00	1,00	-1,00	42,72
2	1,00	-1,00	-1,00	34,72
3	1,00	1,00	1,00	68,01
4	1,00	-1,00	1,00	63,04
5	-1,00	1,00	-1,00	43,42
6	-1,00	-1,00	-1,00	39,12
7	-1,00	1,00	1,00	50,14
8	-1,00	-1,00	1,00	65,08
9	1,68	0,00	0,00	30,12
10	-1,68	0,00	0,00	32,14
11	0,00	1,68	0,00	79,83
12	0,00	-1,68	0,00	62,88
13	0,00	0,00	1,68	75,79
14	0,00	0,00	-1,68	45,32
15	0,00	0,00	0,00	65,44
16	0,00	0,00	0,00	66,52
17	0,00	0,00	0,00	65,87

Високі значення всіх коефіцієнтів лінійних членів (x_3, x_1, x_2) рівняння (4) по відношенню до інших членів вказують на те, що вони є найбільш впливовими на процес фотокаталітичної деструкції. Коефіцієнт при x_3 не тільки має найвище значення з усіх ефектів (таблиця 4), але й приблизно в 2 рази більше, ніж коефіцієнт при x_2 . Коефіцієнти відповідні взаємодіям x_1x_2 (1,32) і x_1x_3 (5,24) представлені значеннями, що в 5,84 і 1,5 разів менше відносно коефіцієнту при x_3 . На рис. 1 показано співвідношення між значеннями, розрахованими за математичною моделлю і отриманими експериментально. Крім того,

рисунок 1 показує, що різниці між експериментальними і розрахованими значеннями квадратичної моделі випадковим чином розподіляються навколо нульового значення. Залишки, отримані за квадратичною моделлю, випадковим чином розподіляються навколо експериментальних значень. Це є типовим для моделі, яка описує експериментальні дані.

Значимість факторів і адекватність квадратичної моделі можна оцінити, проаналізувавши діаграму Парето, що показана на рис. 1. На рис. 1 червона смуга, що перетинає сині вертикальні прямокутники ($p = 0,05$), вказує на змінні, що мають значний вплив на систему, що досліджується, які є позитивними або негативними. Більшість ефектів є статистично значущими щодо функції відгуку. Значення коефіцієнта детермінації (R^2) становить приблизно 0,998, що вказує на те, що квадратична модель адекватно представляє взаємозв'язок між незалежними факторами і функцією відгуку.

Високі значення коефіцієнтів в лінійних доданках (x_2, x_3) в порівнянні з іншими коефіцієнтами означають, що вони є найбільш впливовими у рівнянні.

Коефіцієнт при змінній x_3 має найвище значення зі всіх ефектів (7,72), але є також приблизно в чотири рази більшим, ніж при x_2 . Коефіцієнти при парних взаємодіях факторів x_1x_2 (+1,32) і x_1x_3 (+5,24) мають відповідно, значення, що в 5,83 і в 1,47 рази поступаються по відношенню до коефіцієнта при x_3 .

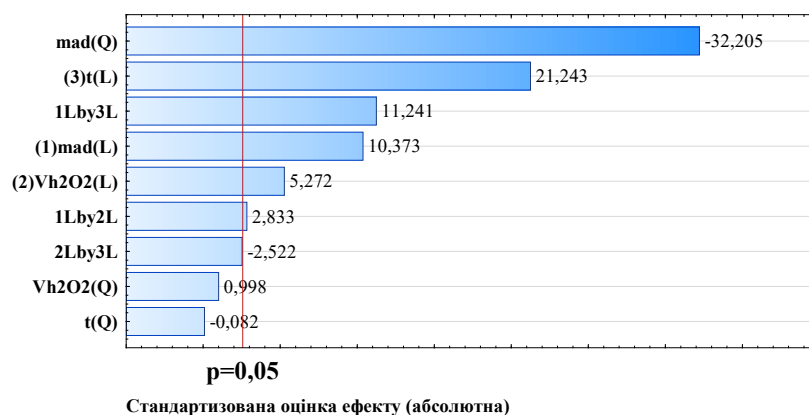
Рівень значущості має наступний порядок: $(x_1*x_1) > x_3 > x_1*x_3 > x_1 > (x_1*x_2) > x_2$. Позитивні значення коефіцієнтів x_1, x_2 і x_3 вказують, що в міру збільшення цих трьох факторів значення функції відгуку квадратичної моделі також збільшується, і навпаки, негативні значення $(x_1)^2$ вказують на те, що збільшення змінної призводить до зниження функції відгуку. Крім того, коефіцієнти при $(x_2)^2, x_2*x_3, (x_3)^2$ істотно не впливають на значення функції відгуку.

Табл. 4

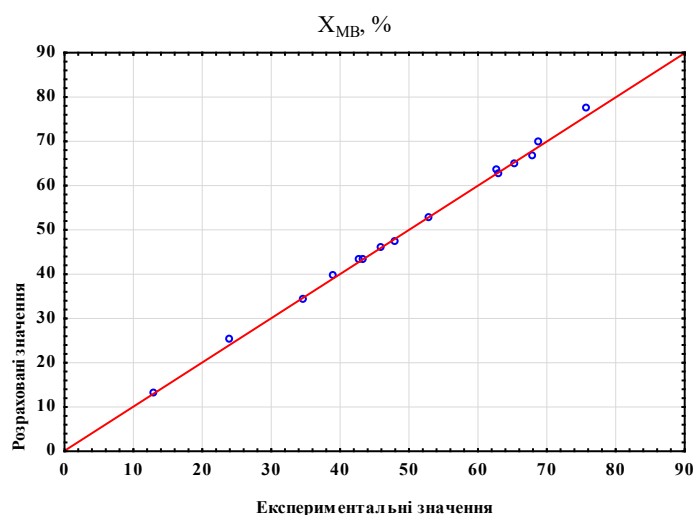
Розраховані значення коефіцієнтів рівняння

Фактор	Коефіцієнт регресії	Стандартне відхилення	$t(5)$	p	-95%	+95%
b_0	65,02	1,275	50,97	0	61,744	68,303
M_{kat} (лінійна)	3,77	0,363	10,373	0,000143	2,837	4,7066
M_{kat} (квдратична)	-17,75	0,551	-32,20	0,00001	-19,16	-16,334
$V_{H_2O_2}$ (лінійна)	1,91	0,363	5,272	0,0032	0,9822	2,851
T (лінійна)	7,72	0,3636	21,24	0,000004	6,789	8,658
$M_{kat} V_{H_2O_2}$	1,32	0,4667	2,833	0,0365	0,122	2,522
$M_{kat} T$	5,24	0,4666	11,242	0,000097	4,0476	6,4474
$R\text{-sqrt}=0,998, r=0,994, S=1,743$						

Значення, що вважаються оптимальними, були обрані з урахуванням впливу кожного фактору на ступінь деградації МС, як показано на рис. 2, 3. Високий ступінь розкладання МС (близько 80%) відповідає кодованим значенням часу обробки, що наближаються до 1,0 та більше. Причому, ступінь розкладання практично не залежить від часу обробки, спостерігається досить широкий проміжок оптимальних значень [-2;2]. Крайові значення концентрації фотокаталізатору відповідають низьким значенням ступеню перетворення. Оптимальне значення відповідає прямій, що паралельна осі $V_{H_2O_2}$ (рис. 2а, 2б). Червоні та помаранчеві напівкола у нижній площині графіку $X = f(t, m_{kat})$ на рис. 2 показують області, де $X = 50-80 \%$, що відповідають значенням фактору x_1 з проміжку [1,25;1,25].



а)



б)

Рис. 1. Діаграма Парето (а), та залежність між експериментальними та розрахованими значеннями функції відгуку (б)

Значення, що вважаються оптимальними, були обрані з урахуванням впливу кожного фактору на ступінь деградації МС, як показано на рис. 2, 3. Високий ступінь розкладання МС (близько 80%) відповідає кодованим значенням часу обробки, що наближаються до 1,0 та більше. Причому, ступінь розкладання практично не залежить від часу обробки, спостерігається досить широкий проміжок оптимальних значень $[-2;2]$. Крайові значення концентрації фотокаталізатору відповідають низьким значенням ступеню перетворення. Оптимальне значення відповідає прямій, що паралельна осі $V_{H_2O_2}$ (рис. 2а, 2б). Червоні та помаранчеві півкола у нижній площині графіку $X = f(t, m_{кат})$ на рис. 2 показують області, де $X = 50-80 \%$, що відповідають значенням фактору x_1 з проміжку $[1,25;1,25]$.

Аналізуючи залежність ступеню деструкції від маси адсорбенту та об'єму перекису водню, можна відзначити, що низькі значення ступеню розкладання 0-8% відповідають низьким та надлишковим концентраціям каталізатору. Ступінь деградації близько 80 % відповідає прямокутнику в діапазоні зміни маси адсорбенту від -1 до -1 у всьому діапазоні зміни об'єму перекису водню.

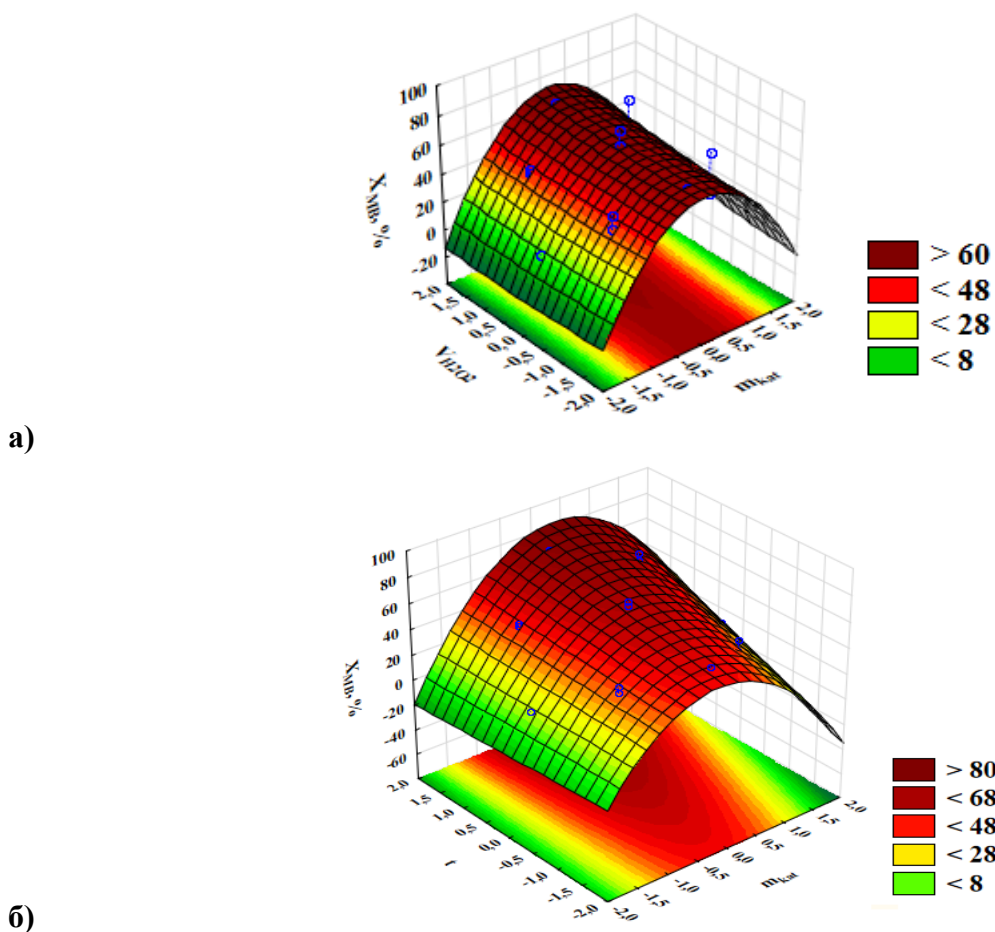


Рис. 2 Залежність ступеню деградації МС від об'єму перекису водню і маси адсорбенту (а), та ступеню деградації МС від часу обробки та маси адсорбенту (б)

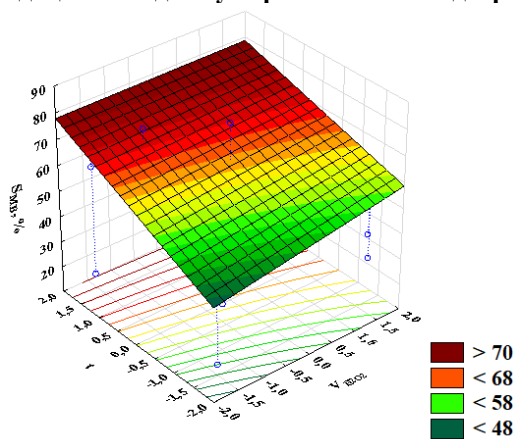


Рис. 3. Залежність ступеню деградації МС від об'єму перекису водню та часу обробки

Залежності, що показані на рис. 2, 3 (зокрема області, що позначені помаранчево-червоними колами), вказують на те, що високий ступінь деградації МС відповідає наступним експериментальним умовам:

- концентрації H_2O_2 : 0,75мл на 100 мл розчину, та каталізатору: 0,1 г на 100 мл Fe_3O_4 ;
- час обробки УФ випромінюванням необхідно підтримувати на рівні, близькому до його максимального значення 60 хвилин.

Висновки

Представлені результати показують, що магнетит є ефективним каталізатором розкладу МС під дією УФ-випромінювання.

Використання методу планування експерименту з варіюванням факторів (концентрація H_2O_2 , концентрація Fe_3O_4 , час обробки) дозволило визначити, які саме змінні найбільш впливові в процесі деградації МС. Підвищення часу обробки призводить до збільшення ступеню деградації МС. Вплив концентрації перекису водню та каталізатору має екстремальний характер. Встановлена наступна значимість факторів: $t_{\text{об}} > m_{\text{адс}} > V_{\text{H}_2\text{O}_2}$. Дисперсійний аналіз показав узгодженість між експериментальними даними та теоретично визначеними, тобто, отримана математична модель адекватна.

Перелік використаної літератури

1. Сафоник А. П., Присяжнюк О. В., Пасічник В. А. Моделювання процесу очищення стічних вод методом електрокоагуляції в неізотермічних умовах. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. 2019. № 8. С. 175–181.
2. Бомба А. Я., Присяжнюк І. М., Присяжнюк О. В., Сівак В. М. Математичне моделювання процесів первинної очистки стічних вод із використанням пористих мікрочастинок. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки*. 2014. № 1. С. 104–112.
3. Петрушка І. М., Мороз О. І., Петрушка К. І. Математичне моделювання ресурсозберігаючих технологій очищення стічних вод. *Актуальні проблеми економіки*. 2016. № 4. С. 433–439.
4. Шевченко О. О., Іванова І. М. Застосування біотехнологій для підвищення очистки стічних вод від біогенних елементів. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Сер.: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. 2013. № 37. С. 215–222.
5. Буртна І. А., Ружинська Л. І., Руденко Л. С. Математична модель масообмінних процесів первапораційного очищення води. *Вісник Національного технічного університету Харківський політехнічний інститут. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2016. № 12. С. 5–11.
6. Математичне моделювання та оптимізація об'єктів технології неорганічних речовин: навч. посіб. для студентів хім.-технол. спец. ВНЗ / Фролова Л. А. та ін. 2-ге вид. Дніпро : Акцент, 2019. 238 с.
7. Li M., Qiang Z., Pulgarin C., Kiwi, J. Accelerated methylene blue (MB) degradation by Fenton reagent exposed to UV or VUV/UV light in an innovative micro photo-reactor. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2016. № 187. С. 83–89.
8. Singh J., Chang Y. Y., Koduru J. R., Yang J. K. Potential degradation of methylene blue (MB) by nano-metallic particles: A kinetic study and possible mechanism of MB degradation. *Environmental Engineering Research*. 2018. № 23(1). С. 1–9.

9. Baghriche O., Rtimi S., Pulgarin C., Kiwi J. Polystyrene CuO/Cu₂O uniform films inducing MB-degradation under sunlight. *Catalysis Today*. 2017. **284**. С. 77–83.

References

1. Safonyk, A. P., Prysiazhniuk, O. V., & Pasichnyk, V. A. (2019). Modeliuvannia protsesu ochyshchennia stichnykh vod metodom elektrokoahuliatsii v neizotermichnykh umovakh. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu KhPI. Serii: Matematychni modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. **8**, 175–181.
2. Bomba, A. Ya., Prysiazhniuk, I. M., Prysiazhniuk, O. V., & Sivak, V. M. (2014). Matematychni modeliuvannia protsesiv pervynnoi ochystky stichnykh vod iz vykorystanniam porystykh mikrochastynok. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia. Tekhnichni nauky*. **1**, 104–112.
3. Petrushka, I. M., Moroz, O. I., & Petrushka, K. I. (2016). Matematychni modeliuvannia resursozberihaiuchykh tekhnolohii ochyshchennia stichnykh vod. *Aktualni problemy ekonomiky*. **4**, 433–439.
4. Shevchenko, O. O., & Ivanova, I. M. (2013). Zastosuvannia biotekhnolohii dlia pidvyshchennia ochystky stichnykh vod vid biohennykh elementiv. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu KhPI. Ser.: Matematychni modeliuvannia v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. **37**, 215–222.
5. Burtina, I. A., Ruzhynska, L. I., & Rudenko, L. S. (2016). Matematychna model masoobminnykh protsesiv pervaporatsiinoho ochyshchennia vody. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Kharkivskiyi politekhnichnyi instytut. Serii: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh*. **12**, 5–11.
6. Matematychni modeliuvannia ta optymizatsiia obiektiv tekhnolohii neorhanichnykh rehovyn: navch. posib. dlia studentiv khim.-tekhnol. spets. VNZ / Frolova L. A. ta in. 2-he vyd. (2019). Dnipro : Aktsent.
7. Li, M., Qiang, Z., Pulgarin, C., & Kiwi, J. (2016). Accelerated methylene blue (MB) degradation by Fenton reagent exposed to UV or VUV/UV light in an innovative micro photo-reactor. *Applied Catalysis B: Environmental*. **187**, 83–89.
8. Singh, J., Chang, Y. Y., Koduru, J. R., & Yang, J. K. (2018). Potential degradation of methylene blue (MB) by nano-metallic particles: A kinetic study and possible mechanism of MB degradation. *Environmental Engineering Research*. **23**(1), 1–9.
9. Baghriche, O., Rtimi, S., Pulgarin, C., & Kiwi, J. (2017). Polystyrene CuO/Cu₂O uniform films inducing MB-degradation under sunlight. *Catalysis Today*. **284**, 77–83.

Фролова Лілія Анатоліївна – д.т.н., доцент кафедри технології неорганічних речовин та екології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет (м. Дніпро), e-mail: 19kozak83@gmail.com. ORCID: 0000-0001-7970-2264.

Бутиріна Тетяна Євгенівна – к.х.н., доцент кафедри технології неорганічних речовин та екології, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет (м. Дніпро), e-mail: butan@email.ua. ORCID.ORG/0000-0002-0619-6783.

Савченко Марія Олегівна – к.т.н., доцент кафедри технології неорганічних речовин та екології, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет (м. Дніпро), e-mail: mary.mis2018@gmail.com.

Сухий Михайло Костянтинівч – студент групи 3-ПП, ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет (м. Дніпро).