

УДК 628.3:519.2

О. О. ДУПЕНКО, А. І. ТРИКІЛО

ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯННЯ РЕГРЕСІЇ ОЧИЩЕННЯ ФЕНОЛЬНИХ СТІЧНИХ ВОД З ДОДАВАННЯМ БІОГЕНОЇ ДОБАВКИ КАРБАМІДУ

Визначено рівняння регресії другого порядку, яке описує процес очищення фенольних стічних вод при зміні параметрів: часу проведення очищення (часу аерації), початкового вмісту фенолів, дози активного мулу та доза біогенної добавки – карбаміду. В результаті математичної обробки експериментальних даних отримано графіки залежностей залишкового вмісту фенолів від вхідних параметрів у формі поверхонь відгуку, які характеризують процес очищення. Результати досліджень можуть бути використані у промисловості для встановлення оптимальних режимів технологічного процесу з визначенням мінімальних витрат на додавання карбаміду і часу аерації.

Ключові слова: феноли, очищення стічної води, карбамід, рівняння регресії, біогена добавка, аерація, поверхні відгуку.

Определено уравнение регрессии второго порядка, описывающее процесс очистки фенольных сточных вод при изменении параметров: времени проведения очистки (времени аэрации), начального содержания фенолов, дозы активного ила и доза биогенной добавки – карбамида. В результате математической обработки экспериментальных данных получены графики зависимостей остаточного содержания фенолов от входных параметров в форме поверхностей отклика, характеризующих процесс очистки. Результаты исследований могут быть использованы в промышленности для установления оптимальных режимов технологического процесса с определением минимальных затрат на добавление карбамида и времени аэрации.

Ключевые слова: фенолы, очистка сточной воды, карбамид, уравнение регрессии, биогенная добавка, аэрация, поверхности отклика.

The article discusses issues related to the determination of the regression equation of the second order describing the process of purification of phenolic waste water when changing the parameters: the time of the treatment (time of aeration), the initial phenol content, the dose of active sludge and dose of a nutrient additive – urea. The result of mathematical processing of experimental data are: regression equation for the entire array of the studied variable with defined coefficients of pair correlation and response surfaces. As a scientific novelty for the first time determined there regression equation for the cleaning process of phenolic wastewater with variable defined. The practical significance of research consists in possibility to use them in industry for determination of optimum modes of technological process with the determination of the minimum cost of adding urea and time of aeration.

Keywords: phenols, purification of wastewater, urea, regression equation, nutrient additive, aeration, surface response.

Вступ. Стічні води коксохімічних підприємств забруднені органічними та неорганічними речовинами, серед яких найбільш шкідливими є одно та багатоатомні феноли, які спричиняють негативний вплив на організм людини, а також навколишнє середовище загалом. Стічні води коксохімічних заводів використовують в основному для гасіння коксу, тому значна кількість шкідливих речовин, що залишилися у воді, при зіткненні з розпеченим коксом випаровуються і потрапляють в атмосферу. Нормативне значення вмісту фенолів у воді, що використовується для гасіння коксу, становить 1 мг/дм³ [1, 2]. Для очищення від цих сполук до нормативного значення на підприємствах застосовують біологічний метод з використанням специфічного активного мулу, що збагачений фенолруйнуючими мікроорганізмами.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Для стабільного процесу очищення фенольних вод з використанням активного мулу необхідно підтримувати умови сприятливі для життєдіяльності мікроорганізмів: температурний оптимум 28-35 °С, рН середовища 6,5–8,0; подача повітря для забезпечення дихання мікроорганізмів, а також наявність біогенних елементів таких як ортофосфати (джерело фосфору) та інші біогенні елементи [3].

Серед параметрів, які впливають на швидкість та ефективність очищення можна назвати початкову концентрацію фенолів та стан активного мулу. Як було визначено у роботі [4] порушення процесу очищення може відбуватися:

– при перевищенні нормативної концентрації фенолів у воді, яка надходить на очищення, що приводить до перевантаження системи за забруднюючої речовиною;

– при загибелі частини активного мулу в наслідок невідповідної якості забрудненої води (наднорма-

тивний вміст смолистих речовин, зниження рН нижче оптимального, тощо)

Одним із способів інтенсифікації процесу біорозкладання компонентів стічних вод є вживання біологічно активних речовин (БАР) як стимуляторів процесу росту мікроорганізмів та прискорення біорозкладання забруднень. Відомі способи біохімічної очистки стічних вод від органічних сполук, в якому активний мул попередньо обробляють хімічними реагентами – водними розчинами малеїнової або бурштинової кислоти, фталоінжелатини тощо [5, 6].

У статті [7] авторами було показано, що використання карбаміду пришвидшує окислення фенолів, що припустимо є наслідком стимулювання росту бактерій. Завдяки тому, що карбамід включає азот в амідній формі, він легко засвоюється клітинами мікроорганізмів. Так як азот є основним елементом для будовання найважливіших кислот і білків, присутність азоту карбаміду прискорює рост клітин та синтез ферментів, що необхідні для ефективного біорозкладання фенолів.

Для обумовлення залежності між основними параметрами очищення при додаванні карбаміду та використанню отриманих даних у промисловості необхідно було визначити математичний опис процесу.

Ціль та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення залежності процесу очищення фенольних стічних вод при зміні параметрів: часу проведення очищення (часу аерації), початкового вмісту фенолів, дози активного мулу та доза біогенної добавки – карбаміду.

Задачею дослідження є отримати адекватне математичне рівняння, яке описує процес очищення фенольних стічних вод при зміні визначених параметрів для використання його в промисловості.

© О. О. Дупенко, А. І. Трикіло. 2017

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

1. Обробка експериментальних даних, отриманих в результаті дослідження процесу очистки.

2. Побудова поверхонь відгуку і визначення оптимальних параметрів технологічного процесу.

Матеріали та методи дослідження. Було проведено серію експериментів з використанням фенольної води різної якості і додаванням різних доз карбаміду.

Умови проведення експерименту були наступними. Для проведення досліджень були зібрано експериментальну установку, що складається з реактору об'ємом 5 дм³ і компресору для подачі повітря. Процес біологічного очищення стічних вод в лабораторних умовах проводили наступним чином: в усереднену фенольну воду з визначеним вмістом фенолів додавали активний мул і зазначений реагент у різних дозах та аерували протягом встановленого часу. Після

чого визначали залишковий вміст фенолів за стандартною методикою [8].

За наявності широкого діапазону варіювання досліджуваних параметрів при очищенні фенольних стоків доцільно застосувати методику планування експериментів для вирішення поставленого завдання із необхідною точністю [9]. В якості факторів, від яких залежить ступінь очистки (залишкова концентрація фенолів Y , мг/дм³) обрано:

x_1 – час проведення очищення (час аерації), год.; x_2 – початковий вміст фенолів, мг/дм³; x_3 – доза карбаміду, що надана для прискорення очищення г/дм³; x_4 – доза активного мулу, мг/дм³.

Для виявлення взаємозв'язку наведених параметрів досліджуваного процесу очистки фенольних стічних вод від фенолів проведено математичну обробку отриманих експериментальних даних. Результати серії лабораторних експериментів зведені в одну базу даних (табл. 1).

Таблиця 1– Результати лабораторних досліджень і розрахунків похибки

№ досліджу	x_1	x_2	x_3	x_4	Y	Y_p	d	%
1	48	335	0,4	0,6	1,40	1,399	0,001	0,10
2	48	450	0,5	0,7	1,30	1,328	-0,028	2,16
3	48	537	0,2	0,7	1,98	2,129	-0,149	7,53
4	48	537	0,8	0,7	0,82	0,839	-0,019	2,27
5	48	537	0,1	0,8	1,99	2,267	-0,277	13,93
6	48	537	0,4	0,8	1,55	1,518	0,032	2,09
7	48	537	0,5	0,8	1,13	1,329	-0,199	17,58
8	48	537	1	0,8	0,72	0,840	-0,120	16,69
9	48	537	1	0,8	0,79	0,840	-0,050	6,35
10	72	450	0,5	0,7	0,80	0,690	0,110	13,71
11	72	537	0,2	0,7	1,77	1,452	0,318	17,94
12	72	537	0,8	0,7	0,53	0,422	0,108	20,29
13	72	537	0	0,8	1,86	1,700	0,160	8,60
14	72	537	0,1	0,8	1,67	1,433	0,237	14,20
15	72	537	0,4	0,8	1,01	0,813	0,197	19,46
16	72	537	0,5	0,8	0,55	0,668	-0,118	21,43
17	72	537	0,6	0,8	0,54	0,553	-0,013	2,36
18	72	537	1	0,8	0,52	0,397	0,123	23,75
19	72	537	1	0,8	0,54	0,397	0,143	26,57
20	96	335	0,4	0,6	0,52	0,509	0,011	2,19
21	96	450	0,5	0,7	0,49	0,538	-0,048	9,80
22	96	537	0,2	0,7	1,14	1,261	-0,121	10,65
23	96	537	0,8	0,7	0,45	0,492	-0,042	9,32
24	96	537	0	0,8	1,19	1,308	-0,118	9,90
25	96	537	0,1	0,8	1,14	1,084	0,056	4,92
26	96	537	0,4	0,8	0,69	0,595	0,095	13,79
27	96	537	0,5	0,8	0,47	0,493	-0,023	4,83
28	96	537	0,6	0,8	0,46	0,421	0,039	8,49
29	96	537	1	0,8	0,44	0,438	0,002	0,36
30	96	537	1	0,8	0,44	0,438	0,002	0,36
							Середня похибка	10,39

Результати дослідження процесу очищення фенольних вод. В результаті математичної обробки експериментальних даних [10], нами визначено коефіцієнти парної кореляції і рівняння регресії для всього масиву досліджуваних змінних (табл. 2, 3); отримано графіки залежностей вихідного параметру від вхідних у формі поверхонь відгуку.

Розраховані коефіцієнти парної кореляції, які наведені в табл. 3, дозволяють визначити значимі параметри впливу на процес.

Згідно отриманих даних до значимих параметрів віднесено: початкову концентрацію фенолів, час проведення аерації, дозу карбаміду.

Як видно з табл. 3 при збільшенні часу проведення очищення та дози карбаміду залишкова концентрація фенолів зменшується. Навпаки при збільшенні початкового вмісту фенолів зростає його залишкова концентрація.

Таблиця 2 – Натуральні значення факторів

	Мінімум	Середнє	Максимум	Ст. відхилення
X1	24,00	72,00	96,00	21,83
X2	335,00	514,83	537,00	55,58
X3	0,00	0,52	1,00	0,33
X4	0,60	0,76	0,80	0,06

Таблиця 3 – Коефіцієнти парної кореляції

	X1	X2	X3	X4	Y
X1	1,000	-0,000	-0,047	-0,000	-0,608
X2	-0,000	1,000	0,102	0,774	0,068
X3	-0,047	0,102	1,000	0,112	0,617
X4	-0,000	0,774	0,112	1,000	0,016
Y	-0,608	0,068	-0,617	0,016	1,000

(значимі на рівні $p < 0,05$ коефіцієнти парної кореляції виділені)

Визначене рівняння регресії для залишкової концентрації фенолів у очищеній воді має наступний вигляд:

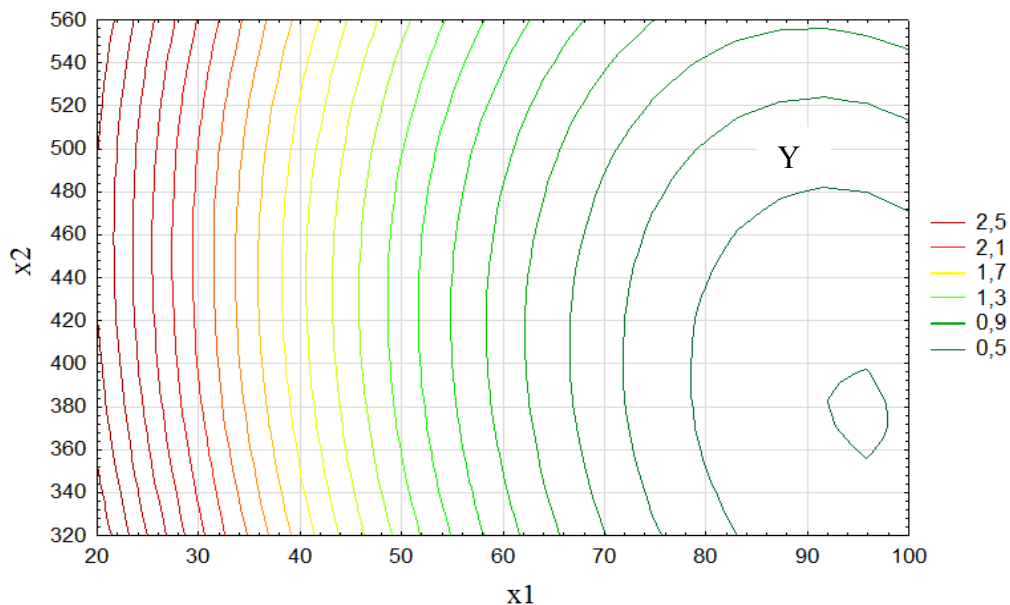
$$Y_p = -3517,6057809 - 0,0725500 \cdot x_1 - 39,9593861 \cdot x_2 + 51997,3197335 \cdot x_3 - 1784,3192545 \cdot x_4 + 0,0004215 \cdot x_1^2 + 0,0590200 \cdot x_2^2 + 1,5217499 \cdot x_3^2 - 14217,8863783 \cdot x_4^2 + 0,0000438 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0180899 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,0476586 \cdot x_1 \cdot x_4 - 96,8431137 \cdot x_2 \cdot x_3 + 43,0375948 \cdot x_2 \cdot x_4 + 4,1306164 \cdot x_3 \cdot x_4$$

Знайдено значення параметрів, при яких Y (залишкова концентрація фенолів) має мінімальне значення: $X_1=76$; $X_2=537$; $X_3=1,01$; $X_4=0,7$ при цьому $Y_p = 0,3$.

З метою наочного представлення отриманих експериментальних даних та визначення інтервалів оп-

тимальних значень (при яких досягається найвищий ступінь очистки), для значимих параметрів нами побудовані поверхні відгуку, котрі представлені на рис. 1–3. Рівняння, які описують дані поверхні, представлені перед рисунками.

$$(Y_{1,2} = 6,1244 - 0,081 \cdot x_1 - 0,0094 \cdot x_2 + 0,0004 \cdot x_1^2 + 2,1506E^{-5} \cdot x_1 \cdot x_2 + 9,8053E^{-5} \cdot x_2^2).$$

Рис. 1 – Поверхня відгуку для вихідних змінних x_1 і x_2

$$(Y_{1,3} = 5,8202 - 0,0863 \cdot x_1 - 4,2905 \cdot x_3 + 0,0004 \cdot x_1^2 + 0,0185 \cdot x_1 \cdot x_3 + 1,58 \cdot x_3^2)$$

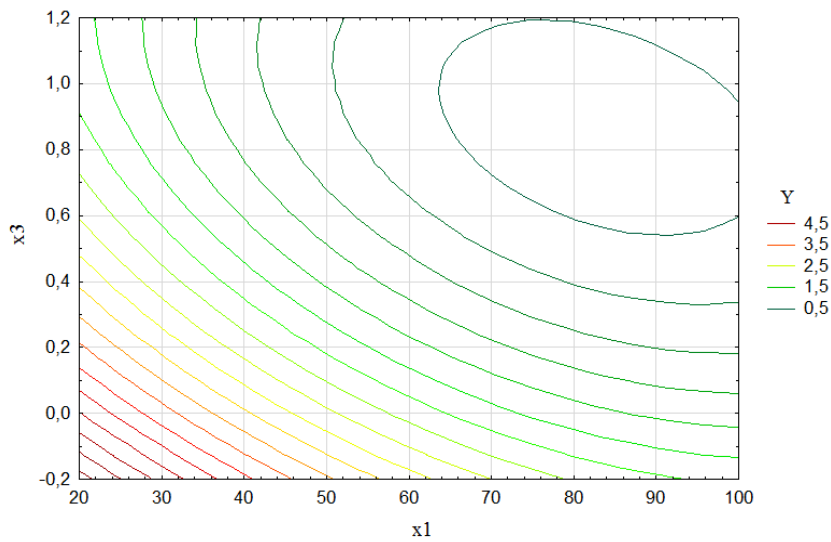


Рис. 2 – Поверхня відгуку для вихідних змінних x_1 і x_3

$$(Y_{3,4} = -3,5875 - 6,4128 \cdot x_3 + 17,463 \cdot x_4 + 0,4205 \cdot x_3^2 + 6,108 \cdot x_3 \cdot x_4 - 13,607 \cdot x_4^2)$$

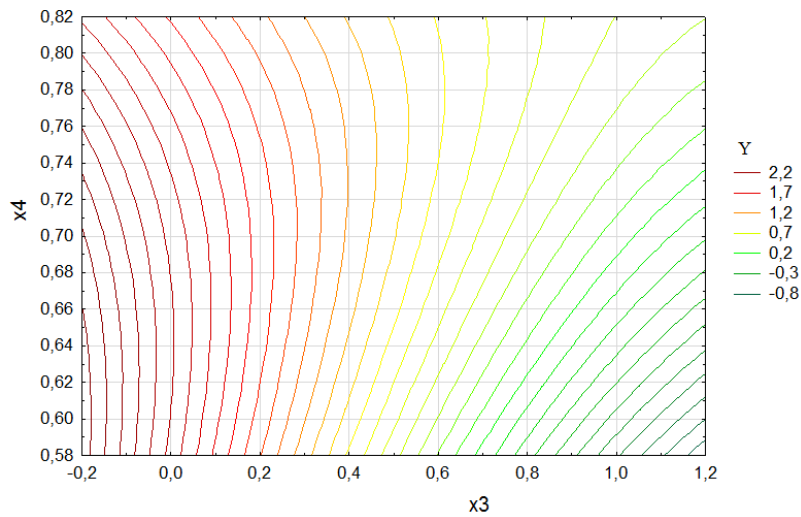


Рис. 3 – Поверхня відгуку для вихідних змінних x_3 і x_4

$$(Y_{1,4} = -0,5116 - 0,0788 \cdot x_1 + 13,1587 \cdot x_4 + 0,0004 \cdot x_1^2 + 0,0102 \cdot x_1 \cdot x_4 - 9,559 \cdot x_4^2)$$

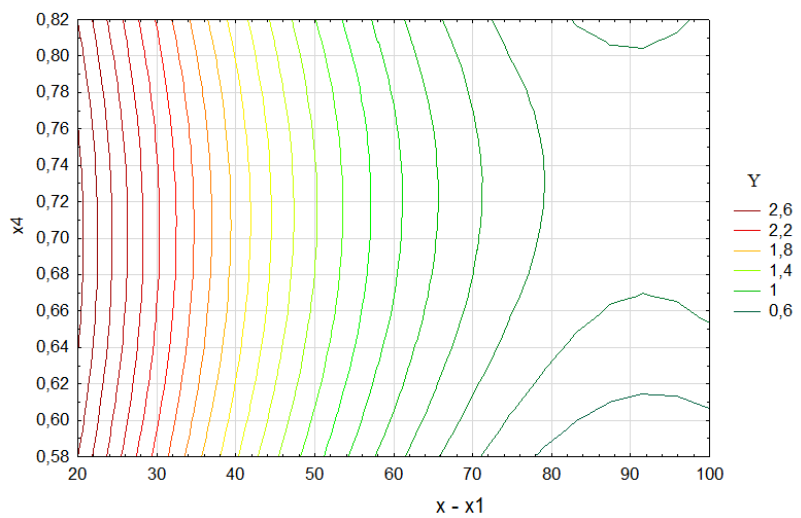


Рис. 4 – Поверхня відгуку для вихідних змінних x_1 і x_4

Обговорення результатів дослідження. Отримані поверхні відгуку дають змогу оцінити вплив кожного параметра. З рисунку 1 слідує, що нормативне значення фенолів ($1,0 \text{ мг/дм}^3$) в очищеній воді досягається при будь-якій початковій концентрації фенолів не раніше ніж за 65 годин.

З рис. 2 та 3 виходить, що додавання карбаміду у дозі $0,4 \text{ г/дм}^3$ і найбільшому часі аерації забезпечує очищення до вмісту фенолів $1,0 \text{ мг/дм}^3$. Збільшення дози карбаміду на $0,6 \text{ мг/дм}^3$ дає можливість скоротити час очищення стічної води до 55 годин.

Збільшення дози активного мулу (рис. 3, 4) позитивно впливає на процес очищення, але не має такого значного впливу як додавання карбаміду.

Необхідно відмітити, що залежність $x1$ та $x3$ є найбільш важлива. Знаючи вартість витрат на додавання карбаміду і енергетичних витрат на аерацію можливо визначити оптимальні значення даних параметрів, скоротивши таким чином витрати на очищення стічних вод.

Висновки

1. На основі експериментальних даних одержано рівняння регресії другого порядку, яке дозволяє визначити залишкову концентрацію фенолів залежно від початкового вмісту фенолів, часу аерації та дози сти мулюючої речовини – карбаміду.

2. Виведені рівняння регресії адекватно описують результати експериментів, середня відносна похибка рівнянь лежить у прийнятних для хімічної технології межах.

3. Визначено оптимальні значення змінних параметрів для досягнення мінімального залишкового вмісту фенолів.

4. Результати роботи дозволяють визначити оптимальне співвідношення добавки карбаміду та часу аерації для забезпечення ефективної очистки фенольних стічних вод до нормативного значення 1 мг/дм^3 .

5. Визначене рівняння регресії процесу очищення з використанням карбаміду як біогенної добавки може бути використане у промисловості для ведення технологічного процесу.

Список літератури:

1. Старовойт А. Г. Природоохранный работа коксохимических предприятий Украины [Текст] / А. Г. Старовойт // Природоохранные технологии и оборудование. – 2014. – № 4. – С. 45–49.
2. Борисенко, А. Л. Регулирование выбросов загрязняющих веществ и обращение с отходами на коксохимических заводах Украины [Текст] / А. Л. Борисенко, А. С. Мальш, Е. Ю. Спирина К. Е. Герман // УглеХимический журнал. – 2015. – № 3. – С. 43–51.
3. Кагасов, В. М. Очистка сточных вод коксохимических предприятий [Текст] / В. М. Кагасов, Е. К. Дербышева. – Екатеринбург: Полиграфист, 2003. – 189 с.
4. Клименко, І. В. Розробка ефективної технології очистки фенольних стічних вод [Текст] / І. В. Клименко, Д. О. Єлан-

5. цев, А. В. Иванченко, О. О. Дупенко, М. Д. Волошин // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – № 3/10 (81). – С. 29–34. doi: [10.15587/1729-4061.2016.72410](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72410)
5. Пат. № 2445275 RF. Способ интенсификации биологической очистки сточных вод МПК: C02F [Текст] / Шулаев, М. В. Фаттахов, С. Г. Хабибуллина Л. И.; патентовладелец Учреждение РАН Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова Казанского научного центра РАН. – опубл. 20.03.2012, Бюл. № 5.
6. Пат. № 2026827 RF. Способ биохимической очистки сточных вод от органических веществ МПК: C02F3/02 [Текст] / Победимский Д. Г., Ахмадуллина Ф. Ю., Хабутдинов М. С.; патентовладелец КАПО "Органический синтез" – опубл. 15.05.2010, Бюл. № 4.
7. Иванченко, А. В. Воздействие карбамида на биологическое удаление фенолов из сточных вод коксохимического предприятия [Текст] / А. В. Иванченко, О. А. Дупенко, Н. Д. Волошин // Вода и водоочистные технологии. – 2015. – № 1 (16). – С. 50–58.
8. Привалов, В. Е. Анализ сточных вод коксохимических заводов [Текст] / В. Е. Привалов, Л. И. Хлопкова, Г. И. Папков. – Москва: Metallurgia. – 1976. – 120 с.
9. Барабашук, В. И. Планирование эксперимента в технике [Текст] / В. И. Барабашук, Б. П. Креденцер, В. И. Мирошниченко. – К.: Техника, 1985. – 327 с.
10. Ахназарова, С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии [Текст] / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1985. – 327 с.

Bibliography (transliterated):

1. Starovoi, A. H. (2014). Pryrodookhrannaia rabota koksokhymicheskikh predpriiaty Ukrainy. Pryrodookhrannye tekhnolohy y oborudovanye, 4, 45–49.
2. Borysenko, A. L., Malys, A. S., Spyrna, E. Yu. (2015). Rehulyrovanye vybrosov zahriazniaiushchykh veshchestv y obrashchenye s otkhodamy na koksokhymicheskikh zavodakh Ukrainy. UhleKhymicheskyy zhurnal, 3, 43–51.
3. Kahasov, V. M., Derbysheva, E. K. (2003). Ochystka stochnykh vod koksokhymicheskikh predpriiaty. Ekaterynburh: Polyhrafyst, 189.
4. Klymenko, I., Yelatontsev, D., Ivanchenko, A., Dupenko, O., Voloshyn, N. (2016). Developing of effective treatment technology of the phenolic wastewater. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (10 (81)), 29–34. doi: [10.15587/1729-4061.2016.72410](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72410)
5. Shulaev, M. V., Fattakhov, S. H., Khabybullyna L. Y. (2012). Pat. 2445275 RF. Sposob yntensyfykatsyy byolohycheskoi ochystky stochnykh vod. MPK: C02F, Patentovladelets Uchrezhdenye RAN Ynstytut orhanycheskoi y fyzycheskoi khymyy ym. A.E. Arbuzova Kazanskoho nauchnoho tsentra RAN; published: 20.03.2012, Bul. No. 5.
6. Pobedymyskiy, D. H., Akhmadullyna, F. Yu., Habutdynov, M. S. (2010). Pat. 2026827 RF. MPK: C02F3/02 Sposob byokhymicheskoi ochystky stochnykh vod ot orhanycheskykh veshchestv. Patentovladelets КАПО "Orhanycheskiy syntez"; published: 15.05.2010, Bul. No. 4.
7. Yvanchenko, A. V. Dupenko, O. O., Voloshyn, M. D. (2015). Vozdeistvye karbamida na byolohycheskoe udaleny fenolov yz stochnykh vod koksokhymicheskoho predpriyatya. Voda i vodoochysni tekhnolohii. Naukovo-tekhnichni visti, 1 (16), 50–58.
8. Privalov, V. E., Hlopokova, L. I., Papkov, G. I. (1976). Analiz stochnykh vod koksohimicheskikh zavodov. Moscow: Metallurgija, 120.
9. Barabashchuk, V. Y., Kredentser, B. P., Myroshnychenko, V. Y. (1985). Planirovanye eksperymenta v tekhnike. Kyev: Tehnika, 327.
10. Akhnazarova, S. L., Kafarov, V. V. (1985). Metody optymyzatsyy eksperymenta v khymicheskoi tekhnolohy. Moscow: Vysshaya shkola, 327.

Надійшла (received) 07.04.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Визначення рівняння регресії очищення фенольних стічних вод з додаванням біогенної добавки карбаміду/ О. О. Дупенко, А. І. Трикіло // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С. 136–141. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Определение уравнения регрессии очистки фенольных сточных вод с добавлением биогенов добавки карбамида/ О. А. Дупенко, А. И. Трикило // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 16(1238). – С.136–141. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Determination of regression equations of purification of phenolic wastewater with the addition of nutrient additive – urea/ O. Dupenko, A. Trukilo // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2017. – № 16 (1238). – P. 136–141. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дупенко Ольга Олександрівна – аспірант, Дніпровський державний технічний університет, Кафедра Хімічної технології неорганічних речовин, вул. Дніпробудівська, 2, м. Кам'янське, Україна, 51918;

Трикило Алік Іванович – кандидат технічних наук, Дніпровський державний технічний університет, доцент, Кафедра Електроніки, вул. Дніпробудівська, 2, м. Кам'янське, Україна, 51918;

Дупенко Ольга Александровна – аспірант, Днепропетровский государственный технический университет, Кафедра Химической технологии неорганических веществ, ул. Днепропетровская, 2, м. Каменское, Украина, 51918;

Трикило Алик Иванович – кандидат технических наук, доцент, Днепропетровский государственный технический университет, Кафедра Электроники, ул. Днепропетровская, 2, м. Каменское, Украина, 51918;

Dupenko Olga – postgraduate student, Dneprovsk State Technsical University, the department «Chemical technology of inorganic substances»; str. Dneproetroevskaya, 2, Kamenskoe, Ukraine; 51918;

Trukilo Alik – PhD, Dneprovsk State Technsical University, associate professor of the department «Electronics»; str. Dneproetroevskaya, 2, Kamenskoe, Ukraine; 51918

УДК 631.371

А. Ю. ФЕДЮШКО

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЯБЛОК СО СЛОЕМ МИКРООРГАНИЗМОВ

Решена задача по распределению электромагнитного излучения в микро-организмах на поверхности яблок. В результате теоретических исследований с использованием потенциалов Дебая и метода разделения переменных в сферической системе координат, было получено скалярное уравнение Гельмгольца для электрического потенциала Дебая. Решение уравнения позволило получить формулы для расчёта среднего значения электрического поля на поверхности яблок. Среднее значение электрического поля связано с определением биотропных параметров для уничтожения микроорганизмов.

Ключевые слова: слой микроорганизмов на поверхности яблок; распределение электрического поля в поверхностном слое яблок; биотропные параметры электромагнитного излучения.

Розв'язана задача по розподілу електромагнітного випромінювання в мікроорганізмах на поверхні яблук. В результаті теоретичних досліджень з використанням потенціалів Дебая і методу розділення змінних в сферичній системі координат, було отримано скалярне рівняння Гельмгольца для електричного потенціалу Дебая. Вирішення рівняння дозволило отримати формули для розрахунку середнього значення електричного поля на поверхні яблук. Середнє значення електричного поля пов'язано з визначенням біотропних параметрів для знищення мікроорганізмів.

Ключові слова: шар мікроорганізмів на поверхні яблук; розподіл електричного поля в поверхневому шарі яблук; біотропні параметри електромагнітного випромінювання.

Subject of this article is distribution of electromagnetic radiation in microorganisms on the surface of apples. Through theoretical studies based on Debye potentials and the method of separation of variables in a spherical coordinate system the Helmholtz scalar equation for the Debye electric potential was obtained. Solving of this equation allowed to obtain formulas for calculating the average value of the electric field on the surface of apples. The average value of the electric field is connected to the calculation of biotropic parameters for the destruction of microorganisms.

Keywords: layer of microorganisms on the surface of apples; distribution of the electric field in the surface layer of apples; biotropic parameters of electromagnetic radiation.

Введение. Обеспечение населения плодовой продукцией определяется не только уровнем производства, но и эффективной организацией хранения.

Практический опыт показывает, что для хранения плодово-ягодной продукции широкое распространение получил метод хранения плодов в холодильных камерах с регулируемой газовой средой (РГС)[1].

Существенным недостатком газовой среды является то, что избыточное содержание углекислого газа в атмосфере хранения способно вызывать нарушение обмена веществ и развитие побурения тканей пери-

карпия, даже у сортов, устойчивых к этим заболеваниям. Из-за избыточного накопления продуктов анаэробного обмена резко снижаются вкусовые качества, повышается чувствительность к низкотемпературным повреждениям, снижается устойчивость к микроорганизмам. Значительная доля потерь плодов (до 30 %) в период хранения приходится на поражение их физиологическими расстройствами и болезнями (плесень, стрептококки, грибки, споровые бактерии и др.) [1, 2].

© А. Ю. Федюшко. 2017