

К. Є. ХАВІКОВА

здобувач ступеня доктора філософії 2018/2023,
викладач біології і екології
Придніпровський металургійний фаховий коледж
ORCID: 0000-0002-3276-481X

А. І. ТРИКІЛО

кандидат технічних наук, доцент
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0000-0002-5203-5948

С. С. ГОЛОВАНЬ

аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0009-0006-1960-5466

В. О. ШКОДА

аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0009-0000-8811-0391

ОТРИМАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА РІВНЯНЬ МНОЖИННОЇ РЕГРЕСІЇ ПРОЦЕСУ ЗНЕШКОДЖЕННЯ ФЕНОЛВМІСНИХ СТОКІВ

В даній роботі об'єктом дослідження обрано фенольні стоки вузлу біохімічної очистки коксохімічного підприємства м. Кам'янського ПРАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». В його умовах затверджені нормативні значення якості вихідних стоків, які для фенолів складають 415 мг/дм^3 ; роданідів – 400 мг/дм^3 ; а фактична концентрація $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ (середня за рік) становить – $1115,9 \text{ мг/дм}^3$, SCN^- – $601,1 \text{ мг/дм}^3$. Наведені дані свідчать про те, що слід очікувати нерівномірність процесу біологічної очистки стоків протягом року, що призводить до негативного впливу токсичних речовин на симбіоз активного мулу. Задля підвищення якості фенольної води, що подається у аеротенки виникає необхідність у доочищенні стоків на механічній стадії.

На основі експериментальних даних отримано рівняння регресії, які дозволяють визначити залишкову концентрацію фенолів та роданідів залежно від доз глауконіту та часу контактування адсорбенту зі стічною водою. Оптимальна витрата глауконіту в поєднанні з $0,1\%$ розчином катіонного флокулянту згідно з першою моделлю очищення становить $2 - 4,8 \text{ г/дм}^3$ при тривалості часу експерименту $100 - 110 \text{ хв}$, що призводить до зменшення концентрації фенолів від 510 мг/дм^3 до $340,9 \text{ мг/дм}^3$. Згідно з другою моделлю, максимальний ступінь вилучення роданідів досягається при витраті глауконіту – $2 - 5 \text{ г/дм}^3$ в поєднанні з $0,1\%$ розчином флокулянту катіонного типу та інтервалі часу 115 хв , що призводить до зменшення концентрації роданідів з $475,2 \text{ мг/дм}^3$ до 345 мг/дм^3 . Одержані множинні рівняння регресії адекватно описують результати експериментальних досліджень.

Практичне зменшення фенолів та роданідів до ГДК, може бути отримано при значеннях витрати глауконіту X_2 ($2 - 5 \text{ г/дм}^3$) та інтервалі часу очищення X_3 ($100 - 115 \text{ хв}$). Оптимальний час контактування сорбенту не перевищує часу перебування стоків у флотаторі і задовольняє технологічним вимогам. Адекватність рівнянь перевірено за критерієм Фішера. За табличними даними визначено, що вилучення фенолів за критерієм Фішера становить: $F_1 = 1,9$. В підсумку отримуємо: $0,461 \leq 1,9$. Видалення роданідів: $F_2 = 1,9$, що в підсумку складає: $0,369 \leq 1,9$. Рівняння є адекватними експериментальним даним.

Ключові слова: коксохімічні стоки, фенолвмісні стоки, феноли, роданіди, глауконіт, математична модель.

К. YE. KHAVIKOVA

Postgraduate Student 2018/2023,
Lecturer of Biology and Ecology
Prydniprovsky Metallurgical Vocational College
ORCID: 0000-0002-3276-481X

A. I. TRUKILO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Dniprovsky State Technical University
ORCID: 0000-0002-5203-5948

S. S. GOLOVAN

Postgraduate Student at the Department of Chemical and Biological Technologies
Dniprovsky State Technical University
ORCID: 0009-0006-1960-5466

V. O. SKODA

Postgraduate Student at the Department of Chemical and Biological Technologies
Dniprovsky State Technical University
ORCID: 0009-0000-8811-0391

OBTAINING THE MATHEMATICAL MODEL AND MULTIPLE REGRESSION EQUATIONS OF THE NEUTRALIZATION PROCESS OF PHENOL-CONTAINING WASTEWATER

In this work, the object of study was selected as the phenol effluents of the biochemical treatment unit of the coke-chemical enterprise of Kamianske, PJSC "KAMET-STEEL". Under its conditions, the regulatory values of the quality of the initial effluents were approved, which for phenols are 415 mg/dm³; for rhodanides – 400 mg/dm³; and the actual concentration of C₆H₅OH (average for the year) is – 1115.9 mg/dm³, SCN⁻ – 601.1 mg/dm³. The given data indicate that the unevenness of the process of biological wastewater treatment should be expected during the year, which will lead to a negative effect of toxic substances on the symbiosis of activated sludge. In order to improve the quality of phenolic water supplied to aeratanks, there is a need to further purify the effluents at the mechanical stage.

Based on the experimental data, regression equations were obtained that allow determining the residual concentration of phenols and rhodanides depending on the doses of glauconite and the contact time of the adsorbent with wastewater. The optimal consumption of glauconite in combination with a 0.1% solution of a cationic flocculant according to the first model of purification is 2 – 4.8 g/dm³ with a duration of the experiment of 100 – 110 min, which leads to a decrease in the concentration of phenols from 510 mg/dm³ to 340.9 mg/dm³. According to the second model, the maximum degree of rhodanide extraction is achieved with a glauconite consumption of 2 – 5 g/dm³ in combination with a 0.1% cationic flocculant solution and a time interval of 115 minutes, which leads to a decrease in the rhodanide concentration from 475.2 mg/dm³ up to 345 mg/dm³. The obtained multiple regression equations adequately describe the results of experimental studies. Practical reduction of phenols and rhodanides to the MPC can be obtained at the values of glauconite flow rate X₂ (2 – 5 g/dm³) and the cleaning time interval X₃ (100 – 115 min). The optimal contact time of the sorbent does not exceed the residence time of the effluents in the flotation device and satisfies the technological requirements. The adequacy of the equations was checked by the Fisher criterion. According to the tabular data, it was determined that the extraction of phenols by the Fisher criterion is: F₁ = 1.9. As a result, we obtain: 0.461 ≤ 1.9. Removal of rhodanides: F₂ = 1.9, which as a result is: 0.369 ≤ 1.9. The equations are adequate to the experimental data.

Key words: coke chemical effluents, phenol-containing effluents, phenols, rhodanides, glauconite, mathematical model.

Постановка проблеми

В умовах діючого коксохімічного підприємства нормативний вміст фенолів у вихідних стоках складає 415 мг/дм³, роданідів – 400 мг/дм³; а фактична концентрація C₆H₅OH (середня за рік) – 1115,9 мг/дм³, SCN⁻ – 601,1 мг/дм³, що призводить до нерівномірності процесу біологічної очистки стоків протягом року із токсичним впливом на симбіоз активного мулу, родан- та фенолруйнуючі мікроорганізми.

Концентрація фенолів та роданідів на коксохімічних заводах, складає II клас небезпеки та потребує додаткового очищення на механічній стадії перед біохімічною очисткою [1, с. 27].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Критичний аналіз літературних даних по дослідженню і використанню дисперсних сорбентів та фільтруючих матеріалів показав, що пошук нових сорбційних матеріалів для ефективного вилучення фенолів і супутніх речовин зі стічних вод залишається актуальним. Зазвичай в промислових умовах застосовуються синтетичні високомолекулярні сполуки, такі як поліакриламід. Відомо про приклади зарубіжних джерел застосування мінеральних глин для очистки води від різноманітних органічних речовин: нафти та нафтопродуктів, фенолів, роданідів, ціанідів і т.п. [2 с. 1; 3 с. 705; 4 с. 692].

Формулювання мети дослідження

Запропоновано зниження концентрації фенолів та роданідів в коксохімічних стоках підприємства ПРАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» до нормативних значень з описанням математичної моделі адсорбційного процесу, отриманням рівнянь множинної регресії, з перевіркою адекватності за критерієм Фішера та пропозицією оптимальної дози сорбентів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для описання математичної моделі адсорбційного процесу, проведено експериментальні випробування на лабораторному флотаторі. Досліди проводились при температурному показнику фенольної рідини – 20,5 °С, що

відповідає середньорічній температурі стоків, які надходять до флотатору і, при нагріві до 50 °С, що потрапляють до смоловідстійників. Початкова концентрація фенолів у вихідних стоках становила 510 мг/дм³ та роданідів – 475,2 мг/дм³. В якості факторів, від яких залежить ступінь очистки (залишкова концентрація фенолів та роданідів) обрано наступні: X₁ – температура стоків, °С, X₂ – витрата глауконіту, г/дм³; X₃ – інтервал часу, хв; Y₁ – концентрація фенолів, мг/дм³; Y₂ – концентрація роданідів, мг/дм³. Результати серії лабораторних експериментів зведені у табл. 1 – 2, в яких приведені значення вихідних параметрів – X₁, X₂, X₃ та залишкових концентрацій фенолів і роданідів – Y₁, Y₂.

Таблиця 1

Значення вихідних параметрів та результатів експериментів при вилученні фенолів з стічної води

	X1	X2	X3	Y1	Y1(X1)	%	Y1(X2)	%	Y1(X3)	%	Y1(X2,X3)	%
1	20,5	2	20	420	381,69	9,12%	383,79	8,62%	415,69	1,03%	412,05	1,89%
2	50	2	20	415	378,50	8,80%	383,79	7,52%	415,69	0,17%	412,05	0,71%
3	20,5	2	40	383	381,69	0,34%	383,79	0,21%	387,80	1,25%	387,81	1,26%
4	50	2	40	392	378,50	3,44%	383,79	2,09%	387,80	1,07%	387,81	1,07%
5	20,5	2	60	372	381,69	2,60%	383,79	3,17%	367,27	1,27%	370,93	0,29%
6	50	2	60	392	378,50	3,44%	383,79	2,09%	367,27	6,31%	370,93	5,38%
7	20,5	2	120	328	381,69	16,37%	383,79	17,01%	349,83	6,66%	364,39	11,09%
8	50	2	120	392	378,50	3,44%	383,79	2,09%	349,83	10,76%	364,39	7,04%
9	20,5	4	20	365	381,69	4,57%	373,12	2,22%	415,69	13,89%	406,27	11,31%
10	50	4	20	420	378,50	9,88%	373,12	11,16%	415,69	1,03%	406,27	3,27%
11	20,5	4	40	383	381,69	0,34%	373,12	2,58%	387,80	1,25%	379,58	0,89%
12	50	4	40	372	378,50	1,75%	373,12	0,30%	387,80	4,25%	379,58	2,04%
13	20,5	4	60	348	381,69	9,68%	373,12	7,22%	367,27	5,54%	360,25	3,52%
14	50	4	60	328	378,50	15,40%	373,12	13,76%	367,27	11,97%	360,25	9,83%
15	20,5	4	120	348	381,69	9,68%	373,12	7,22%	349,83	0,53%	346,37	0,47%
16	50	4	120	350	378,50	8,14%	373,12	6,61%	349,83	0,05%	346,37	1,04%
17	20,5	6	20	425	381,69	10,19%	374,76	11,82%	415,69	2,19%	412,80	2,87%
18	50	6	20	392	378,50	3,44%	374,76	4,40%	415,69	6,04%	412,80	5,31%
19	20,5	6	40	420	381,69	9,12%	374,76	10,77%	387,80	7,67%	383,67	8,65%
20	50	6	40	383	378,50	1,18%	374,76	2,15%	387,80	1,25%	383,67	0,17%
21	20,5	6	60	392	381,69	2,63%	374,76	4,40%	367,27	6,31%	361,89	7,68%
22	50	6	60	372	378,50	1,75%	374,76	0,74%	367,27	1,27%	361,89	2,72%
23	20,5	6	120	335	381,69	13,94%	374,76	11,87%	349,83	4,43%	340,67	1,69%
24	50	6	120	350	378,50	8,14%	374,76	7,07%	349,83	0,05%	340,67	2,67%
25	20,5	8	20	452	381,69	15,56%	388,71	14,00%	415,69	8,03%	431,64	4,50%
26	50	8	20	415	378,50	8,80%	388,71	6,34%	415,69	0,17%	431,64	4,01%
27	20,5	8	40	440	381,69	13,25%	388,71	11,66%	387,80	11,86%	400,06	9,08%
28	50	8	40	383	378,50	1,18%	388,71	1,49%	387,80	1,25%	400,06	4,46%
29	20,5	8	60	348	381,69	9,68%	388,71	11,70%	367,27	5,54%	375,84	8,00%
30	50	8	60	350	378,50	8,14%	388,71	11,06%	367,27	4,93%	375,84	7,38%
31	20,5	8	120	348	381,69	9,68%	388,71	11,70%	349,83	0,53%	347,28	0,21%
32	50	8	120	350	378,50	8,14%	388,71	11,06%	349,83	0,05%	347,28	0,78%
Похибка						7,24%		7,07%		4,02%		4,10%
Коефіцієнт кореляції						-0,0486		0,0558		-0,6937		-0,7909

Для виявлення взаємозв'язку параметрів досліджуваного процесу очистки стоків від фенолів та роданідів виконано кореляційний аналіз, а саме перевірена гіпотеза про значущість парних коефіцієнтів кореляції, результати приведені у табл. 4.

Виділені коефіцієнти кореляції – значущі на рівні $p < 0,05000$, визначають значний вплив параметрів X₁, X₂, X₃ (температура стоків, витрата глауконіту, інтервал часу) на ефективність очищення, як фенолів так і роданідів.

В результаті обробки експериментальних даних методами математичної статистики, визначено коефіцієнти кореляції (табл. 4) і наведені рівняння множинної регресії Y₁(X₁, X₂, X₃), які представлені графіками 3D поверхонь відгуку, та графіками 2D карт ліній рівнів.

За даними експериментів, наведених у табл. 1, одержано рівняння множинної регресії, залежності вилучення фенолів Y₁ одночасно від витрати глауконіту X₂ та від інтервалу часу очищення X₃, яке має вигляд:

$$Y_1 = 459,2830 - 10,9022 \cdot X_2 - 1,6408 \cdot X_3 - 0,0612 \cdot X_2 \cdot X_3 + 1,5391 \cdot X_2^2 + 0,0092 \cdot X_3^2 \quad (1)$$

Середня відносна похибка рівняння становить 4,1%.

Таблиця 2

Значення вихідних параметрів та результатів експериментів при вилученні роданідів з фенолвмісних стоків

	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₂	Y ₂ (X ₁)	%	Y ₂ (X ₂)	%	Y ₂ (X ₃)	%	Y ₂ (X ₂ ,X ₃)	%
1	20,5	2	20	407	381,33	6,31%	374,87	7,97%	415,69	1,03%	412,05	1,89%
2	50	2	20	402	370,45	7,85%	374,87	6,78%	415,69	0,17%	412,05	0,71%
3	20,5	2	40	399	381,33	4,43%	374,87	6,01%	387,80	1,25%	387,81	1,26%
4	50	2	40	389	370,45	4,77%	374,87	3,59%	387,80	1,07%	387,81	1,07%
5	20,5	2	60	390	381,33	2,22%	374,87	3,97%	367,27	1,27%	370,93	0,29%
6	50	2	60	350	370,45	5,84%	374,87	7,00%	367,27	6,31%	370,93	5,38%
7	20,5	2	120	322	381,33	18,42%	374,87	16,25%	349,83	6,66%	364,39	11,09%
8	50	2	120	320	370,45	15,76%	374,87	17,11%	349,83	10,76%	364,39	7,04%
9	20,5	4	20	399	381,33	4,43%	378,39	5,13%	415,69	13,89%	406,27	11,31%
10	50	4	20	389	370,45	4,77%	378,39	2,74%	415,69	1,03%	406,27	3,27%
11	20,5	4	40	390	381,33	2,22%	378,39	3,06%	387,80	1,25%	379,58	0,89%
12	50	4	40	380	370,45	2,51%	378,39	0,54%	387,80	4,25%	379,58	2,04%
13	20,5	4	60	390	381,33	2,22%	378,39	3,06%	367,27	5,54%	360,25	3,52%
14	50	4	60	375	370,45	1,21%	378,39	0,81%	367,27	11,97%	360,25	9,83%
15	20,5	4	120	382	381,33	0,18%	378,39	0,91%	349,83	0,53%	346,37	0,47%
16	50	4	120	377	370,45	1,74%	378,39	0,46%	349,83	0,05%	346,37	1,04%
17	20,5	6	20	416	381,33	8,33%	377,65	9,18%	415,69	2,19%	412,80	2,87%
18	50	6	20	406	370,45	8,76%	377,65	6,94%	415,69	6,04%	412,80	5,31%
19	20,5	6	40	382	381,33	0,18%	377,65	1,10%	387,80	7,67%	383,67	8,65%
20	50	6	40	371	370,45	0,15%	377,65	1,91%	387,80	1,25%	383,67	0,17%
21	20,5	6	60	373	381,33	2,23%	377,65	1,14%	367,27	6,31%	361,89	7,68%
22	50	6	60	348	370,45	6,45%	377,65	8,40%	367,27	1,27%	361,89	2,72%
23	20,5	6	120	339	381,33	12,49%	377,65	11,26%	349,83	4,43%	340,67	1,69%
24	50	6	120	330	370,45	12,26%	377,65	14,36%	349,83	0,05%	340,67	2,67%
25	20,5	8	20	441	381,33	13,53%	372,65	15,55%	415,69	8,03%	431,64	4,50%
26	50	8	20	438	370,45	15,42%	372,65	14,97%	415,69	0,17%	431,64	4,01%
27	20,5	8	40	390	381,33	2,22%	372,65	4,53%	387,80	11,86%	400,06	9,08%
28	50	8	40	375	370,45	1,21%	372,65	0,72%	387,80	1,25%	400,06	4,46%
29	20,5	8	60	339	381,33	12,49%	372,65	9,79%	367,27	5,54%	375,84	8,00%
30	50	8	60	340	370,45	8,95%	372,65	9,49%	367,27	4,93%	375,84	7,38%
31	20,5	8	120	339	381,33	12,49%	372,65	9,79%	349,83	0,53%	347,28	0,21%
32	50	8	120	335	370,45	10,58%	372,65	11,13%	349,83	0,05%	347,28	0,78%
Похибка						6,65%		6,74%		3,52%		3,54%
Коефіцієнт кореляції						-0,1747		-0,0265		-0,7706		-0,6909

Таблиця 3

Описові статистики діапазонів значень вихідних параметрів та результатів досліджень

Параметри	Кількість дослідів	Мінімум	Середнє	Максимум	Стандартне відхилення	Стандартна похибка
X ₁	32	20,50	35,25	50,0	14,99	2,65
X ₂	32	2,00	5,00	8,00	2,27	0,40
X ₃	32	20,00	60,00	120,00	38,02	6,72
Y ₁	32	328,00	380,09	452,00	33,29	5,89
Y ₂	32	320,11	375,89	441,26	31,64	5,59

Таблиця 4

Матриця парних коефіцієнтів кореляції вилучення фенолів та роданідів в залежності від вихідних параметрів

	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂
X ₁	1	-0,0	0,0	-0,048637	-0,174708
X ₂	0,0	1	0,0	0,055870	-0,026582
X ₃	-0,0	0,0	1	-0,693774	-0,770676
Y ₁	-0,048637	0,055870	-0,693774	1	
Y ₂	-0,174708	-0,026582	-0,770676	-0,174708	1

Рівняння множинної регресії $Y_1(X_2, X_3)$ (1) представлено графіком 3D поверхонь відгуку на рис. 1 та графіком 2D карт ліній рівнів вилучення фенолів (Y_1) в залежності від витрати глауконіту (X_2) та від інтервалу часу очищення (X_3), які зображені на рис. 2.

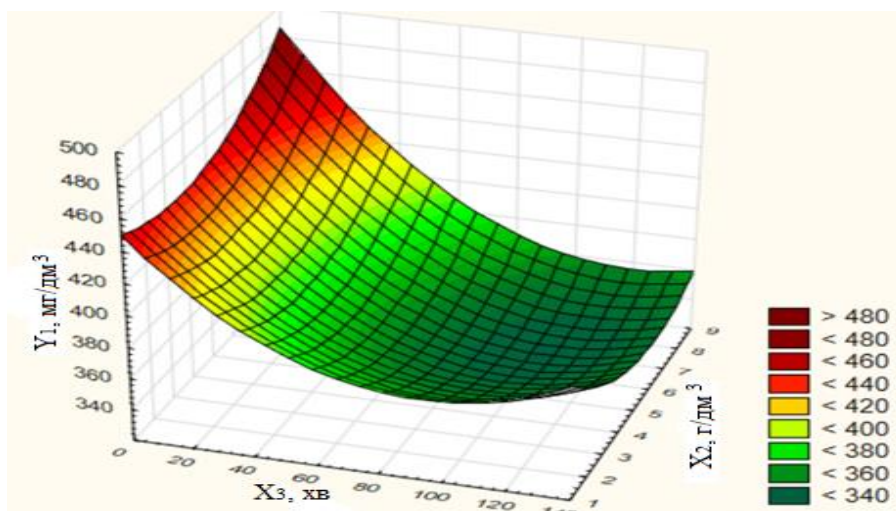


Рис. 1. Поверхня відгуку для рівняння множинної регресії $Y_1(X_2, X_3)$, рівняння (1)

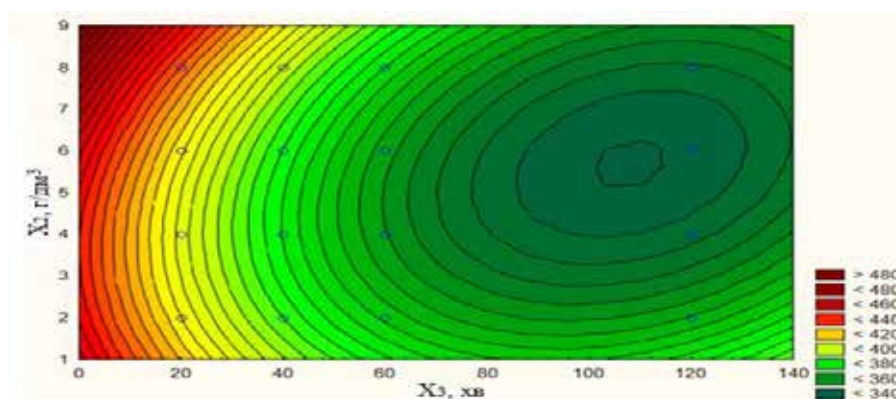


Рис. 2. Графік 2D карт ліній рівнів вилучення фенолів Y_1 в залежності від витрати адсорбенту X_2 та часу очищення X_3 , рівняння (1)

З графіка (рис. 2) видно, що максимальне зменшення фенолів – $340,9 \text{ мг/дм}^3$, може бути отримано при значеннях витрати глауконіту X_2 ($4,8 \text{ г/дм}^3$) та інтервалі часу очищення X_3 (110 хв), що відповідає глобальному мінімуму поверхні рівняння (1). Але практичне зменшення фенолів до 340 мг/дм^3 , може бути отримано при значеннях витрати глауконіту X_2 ($2 - 4,8 \text{ г/дм}^3$) та інтервалі часу очищення X_3 ($100 - 110 \text{ хв}$), що відповідає економічно доцільній витраті глауконіту $X_2 - 2 \text{ г/дм}^3$ при тривалості експерименту $X_3 - 100 \text{ хв}$. Якість стоків не перевищує ГДК фенолів – не більше 415 мг/дм^3 .

За даними експериментів, наведених у табл. 2, одержано рівняння множинної регресії, залежності вилучення роданідів Y_2 одночасно від витрати глауконіту X_2 та від інтервалу часу очищення X_3 , яке має вигляд:

$$Y_2 = 428,2993 - 1,7533 \cdot X_3 + 6,997 \cdot X_2 - 0,034 \cdot X_3 \cdot X_2 + 0,0088 \cdot X_3^2 - 0,5328 \cdot X_2^2 \quad (2)$$

Середня відносна похибка рівняння становить $3,54\%$.

Рівняння множинної регресії $Y_2(X_2, X_3)$ (2) представлено графіком 3D поверхонь відгуку на рис. 3 та графіком 2D карт ліній рівнів вилучення роданідів (Y_2) в залежності від витрати глауконіту (X_2) та від інтервалу часу очищення (X_3), які зображені на рис. 4.

З графіка (рис. 4) видно, що максимальне зменшення роданідів до показника 345 мг/дм^3 , може бути отримано при максимальному значенні витрати глауконіту X_2 (5 г/дм^3) та мінімальному інтервалі часу очищення X_3 (115 хв), що відповідає сідловій точці поверхні рівняння (2). Якість очищених стоків відповідає діючим нормам (ГДК роданідів – не більше 400 мг/дм^3).

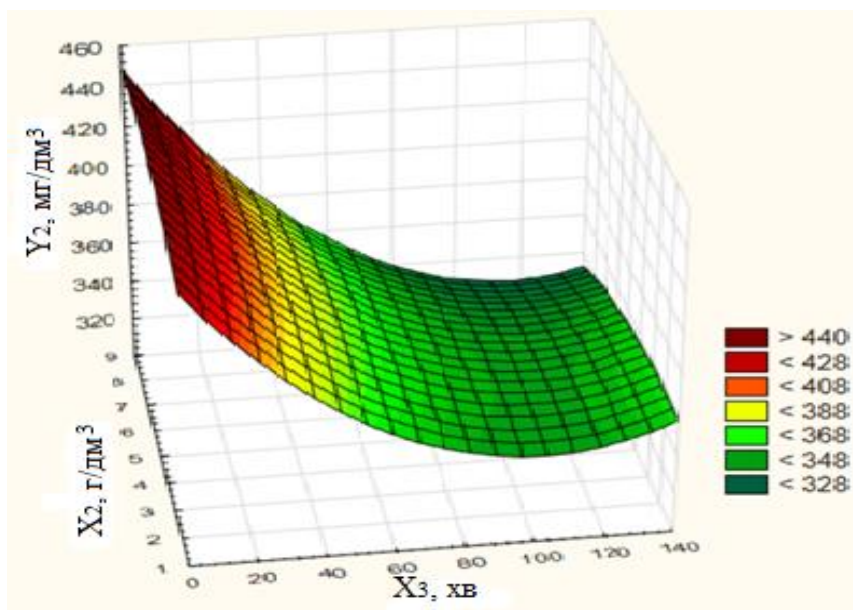


Рис. 3. Поверхня відгуку для рівняння множинної регресії $Y_2(X_2, X_3)$, рівняння (2)

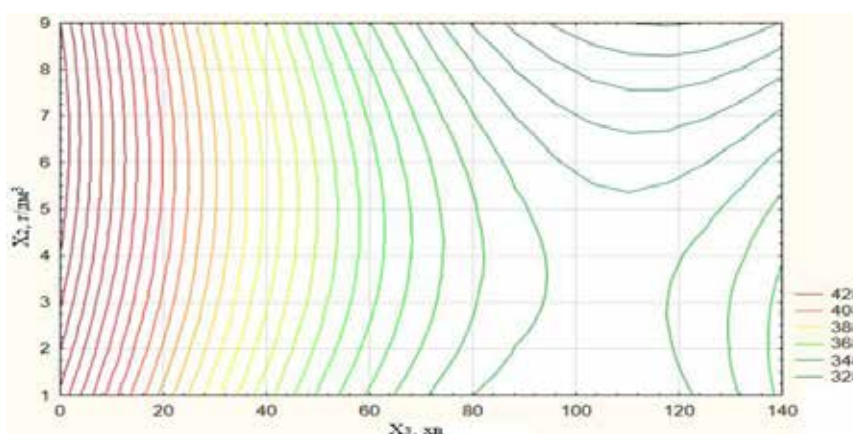


Рис. 4. Графік 2D карт ліній рівнів вилучення роданідів Y_2 в залежності від витрати адсорбенту X_2 та часу очищення X_3 , рівняння (2)

Адекватність рівняння (1 – 2) перевірено за критерієм Фішера:

$$F_p \leq F \tag{1}$$

де F_p – розрахункове значення критерію Фішера;

F – табличне значення критерію Фішера.

Розрахункове значення критерію Фішера визначали за формулою:

$$F_p = \frac{S_3^2}{S_6^2}, \tag{2}$$

де S_3 – залишкова дисперсія;

S_6 – дисперсія відтворюваності.

Залишкову дисперсію розраховували за формулою:

$$S_3^2 = \frac{\sum_{i=1}^{32} (Y_o - \tilde{Y})^2}{n-1}, \tag{3}$$

де Y_o – розрахункове значення концентрації фенолів, роданідів, мг/дм³;

\tilde{Y} – середнє значення розрахункової концентрації фенолів, роданідів, мг/дм³;

n – обсяг вибірки;

l – кількість коефіцієнтів у рівнянні регресії.

Дисперсію відтворюваності розраховували за формулою:

$$S_b^2 = \frac{\sum_{i=1}^{32} (Y - \tilde{Y})^2}{m}, \quad (4)$$

де Y – експериментальне значення концентрації фенолів, роданідів, мг/дм³;

m – число ступенів свободи.

Для рівняння (1) отримані наступні значення:

$$S_3^2 = 494,98$$

$$S_b^2 = 1073,77$$

$$F_p = \frac{494,98}{1073,77} = 0,461$$

Для рівняння (2) отримані наступні значення:

$$S_3^2 = 371,20$$

$$S_b^2 = 1007,11$$

$$F_p = \frac{371,20}{1007,11} = 0,369$$

Висновки

Практичне зменшення фенолів та роданідів до ГДК, може бути отримано при значеннях витрати глауконіту X_2 (2 – 5 г/дм³) та інтервалі часу очищення X_3 (100 – 115 хв). Оптимальний час контактування сорбенту не перевищує часу перебування стоків у флотаторі і задовольняє технологічним вимогам. За табличними даними визначено, що вилучення фенолів за критерієм Фішера становить: $F_1 = 1,9$. В підсумку отримуємо: $0,461 \leq 1,9$. Видалення роданідів: $F_2 = 1,9$, що в підсумку складає: $0,369 \leq 1,9$. Рівняння є адекватними експериментальним даним.

Список використаної літератури

1. Іванченко А. В., Хавікова К. Є. Комплексне очищення промислових фенольних стічних вод з використанням адсорбентів з природної сировини. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2019. № 2. С. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-143-2-27-34>.
2. Yakub E., Agarry S. E., Omoruwou F. [et al.] Comparative study of the batch adsorption kinetics and mass transfer in phenol-sand and phenol-clay adsorption systems. *Particulate Science and Technology*. 2019. №. 1. С. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1080/02726351.2019.1616862>.
3. Mandal A., Dey B.B., Das S.K. Thermodynamics, kinetics, and isotherms for phenol removal from wastewater using red mud. *Water Practice and Technology*. 2020. Т. 15. №. 3. С. 705–722. DOI: <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.056>.
4. Gładysz-Płaska A. Application of modified clay for removal of phenol and PO_4^{3-} ions from aqueous solutions. *Adsorption Science Technology*. 2017. Т. 35. №. 7-8. С. 692–699. DOI: [10.1177/0263617417704774](https://doi.org/10.1177/0263617417704774).

References

1. Ivanchenko A.V., Khavikova K. Ye. (2019) Complex treatment of industrial phenolic wastewater using adsorbents from natural raw materials. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*. No. 2. P.27–34. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-143-2-27-34>. [in Ukrainian].
2. Yakub E., Agarry S. E., Omoruwou F. [et al.] (2019) Comparative study of the batch adsorption kinetics and mass transfer in phenol-sand and phenol-clay adsorption systems. *Particulate Science and Technology*. №. 1. С. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1080/02726351.2019.1616862>. [Nigeria].
3. Mandal A., Dey B.B., Das S.K. (2020) Thermodynamics, kinetics, and isotherms for phenol removal from wastewater using red mud. *Water Practice and Technology*. Т. 15. №. 3. С. 705–722. DOI: <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.056>. [India].
4. Gładysz-Płaska A. (2017) Application of modified clay for removal of phenol and PO_4^{3-} ions from aqueous solutions. *Adsorption Science Technology*. Т. 35. №. 7–8. С. 692–699. DOI: [10.1177/0263617417704774](https://doi.org/10.1177/0263617417704774). [Poland].