

УДК 628.3.03

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.31>

РЕАГЕНТНЕ ОЧИЩЕННЯ ФІЛЬТРАТУ ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ЯК ФАКТОР КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ

Сталінська І.В., Хандогіна О.В.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
вул. Черноглазівська, 17, 61002, м. Харків
stalinskaairina5@gmail.com, olga.khandogina@kname.edu.ua

Проведено дослідження, спрямоване на оптимізацію реагентної обробки фільтрату полігонів твердих побутових відходів. Виявлено, що відомі рішення не можуть бути безпосередньо використані при розробці технології очищення стічних вод полігонів ТПВ, в першу чергу, через відсутність даних про конкретні параметри обробки, що враховують специфіку хімічного складу фільтрату. Запропоновано математичну модель для визначення оптимальної дози реагенту та значення рН, які сприяють мінімізації показників хімічної і біологічної потреби в кисні (ХПК та БПК), що є інтегральними показниками наявності органічних забруднювачів у оброблюваній воді. В запропонованій моделі дози FeSO_4 і значення рН розглядалися нами як фактори, а ХПК та БПК – як функції відгуку або параметри оптимізації. При цьому факторним простором послужив знайдений на попередньому етапі досліджень інтервал значень $\text{pH}=8,5\div 10,5$. Результати дослідження виявили, що оптимальні параметри реагентного очищення фільтратів полігонів ТПВ, які забезпечують мінімізацію ХПК та БПК, включають дозу FeSO_4 у кількості 3000 мг/дм^3 та значення рН 10,3. Були проведені експериментальні дослідження, результати яких представлені в роботі. Виходячи з наявності широкого діапазону вихідних значень ХПК та БПК, з метою звуження дисперсії відтворюваності, як функції відгуку прийняті відносні значення $\text{ХПК} = \text{ХПК}/\text{ХПК}_0$ та $\text{БПК} = \text{БПК}/\text{БПК}_0$. В роботі представлені ізолінії відносних значень $\text{ХПК}/\text{ХПК}_0$ та $\text{БПК}/\text{БПК}_0$, відповідно. Ізолінії отримані перетином побудованих за розробленими моделями поверхонь відгуку горизонтальними площинами з інтервалом $\Delta Y = 0,01$. Отримані дані можуть бути використані при плануванні очищення фільтратів полігонів, а також при розробці режимів експлуатації обладнання та визначенні оптимальних доз реагентів. Виявлено, що відомі рішення не можуть бути безпосередньо використані при розробці технології очищення стічних вод полігонів ТПВ, в першу чергу, через відсутність даних про конкретні параметри обробки, що враховують специфіку хімічного складу фільтрату. *Ключові слова:* реагентне очищення фільтрату полігонів ТПВ, математична модель, комплексне управління відходами.

Reagent treatment of landfill leachate from municipal solid waste as a factor in comprehensive waste management. Stalinska I., Khandoghina O.

A study was conducted to optimize the reagent treatment of landfill leachate from municipal solid waste. It was found that existing solutions cannot be directly applied to the development of a treatment technology for landfill wastewater, primarily due to the lack of data on specific treatment parameters tailored to the specific chemical composition of the leachate. A mathematical model was proposed to determine the optimal reagent dose and pH value that minimize the chemical oxygen demand (COD) and biological oxygen demand (BOD), which are integrative indicators of the presence of organic pollutants in the treated water. In the proposed model, FeSO_4 doses and pH values were considered as factors, while COD and BOD were treated as response functions or optimization parameters. The factor space was determined based on a pH range of 8.5 to 10.5, identified in a previous stage of the research. The study revealed that the optimal parameters for reagent treatment of landfill leachate, which ensure the minimization of COD and BOD, include an FeSO_4 dose of 3000 mg/L and a pH value of 10.3. Experimental studies were conducted, and the results are presented in the paper. To narrow the reproducibility dispersion, given the wide range of initial COD and BOD values, relative $\text{COD} = \text{COD}/\text{COD}_0$ and $\text{BOD} = \text{BOD}/\text{BOD}_0$ were used as response functions. The paper presents isolines of relative COD/COD_0 and BOD/BOD_0 values, respectively. The isolines were obtained by intersecting the response surfaces constructed based on the developed models with horizontal planes at intervals of $\Delta Y = 0.01$. The obtained data can be used in planning landfill leachate treatment, as well as in developing operational regimes for equipment and determining optimal reagent doses. It was found that existing solutions cannot be directly applied to the development of a treatment technology for landfill wastewater, primarily due to the lack of data on specific treatment parameters that account for the chemical composition of the leachate. *Key words:* reagent purification of SHW landfill filtrate, mathematical model, integrated waste management.

Реагентне очищення води – досить вивчений, поширений у промисловій та комунальній сферах процес. Однак, як показав аналіз наукової літератури [4–5, 10–12], відомі рішення не можуть бути безпосередньо використані при розробці технології очищення стічних вод полігонів ТПВ, в першу чергу, через відсутність даних про конкретні параметри обробки, що враховують специфіку хімічного складу фільтрату. Фільтрат звалищ містить різноманітні

типові забруднювачі, включаючи високу концентрацію гумінових речовин, аміачного азоту, неорганічних солей та різноманітних зважених речовин. Незважаючи на досягнення значного прогресу в удосконаленні технологій очищення стічних вод полігонів ТПВ, критичні проблеми залишаються.

Дана робота присвячена пошуку оптимальних параметрів реагентної обробки стічних вод – дози реагенту і значення рН, при яких будуть забезпечені

Таблиця 1

Результати експериментів щодо очищення фільтрату

Перша серія експериментів	№ точок на рис. 1	FeSO ₄ , мг/дм ³	pH	ХПК мгО ₂ /дм ³	БПК мгО ₂ /дм ³
Вихідні значення: БПК=744,8 мгО ₂ /дм ³ ХПК=1560 мгО ₂ /дм ³	1	1000	9,5	379,47	364,8
	2	500	8,5	504	486,5
	3	500	10,5	535,1	488
	4	1500	8,5	447,58	360
	5	1500	10,5	360,01	123
Друга серія експериментів	№ точок на рис. 1	FeSO ₄ мг/дм ³	pH	ХПК мгО ₂ /дм ³	БПК мгО ₂ /дм ³
Вихідні значення: БПК=1198 мгО ₂ /дм ³ ХПК=2400 мгО ₂ /дм ³	1	1000	9,5	600	486
	2	500	8,5	1400	446,1
	3	500	10,5	1200	273,2
	4	1500	8,5	634,6	480
	5	1500	10,5	634,6	490

Таблиця 2

Перехід від натуральних змінних до кодованих

Фактори		Результати експериментів	
Натуральне позначення	Кодоване позначення	Натуральне позначення	Кодоване позначення
FeSO ₄	X ₁	ХПК мгО ₂ /дм ³	Y ₁
pH	X ₂	БПК мгО ₂ /дм ³	Y ₂

мінімальні величини ХПК і БПК як узагальнених показників наявності в обробленій воді органічних забруднювачів.

Значення ХПК та БПК у стічних водах полігону ТПВ взято з наших попередніх досліджень.

Виходячи зі сформульованого вище завдання цього дослідження, відповідно до термінології, прийнятої в теорії планування експерименту [8–9], дози FeSO₄ і значення pH розглядалися нами як фактори, а ХПК та БПК – як функції відгуку або параметри оптимізації. При цьому факторним простором послужив знайдений на попередньому етапі досліджень [7] інтервал значень pH=8,5–10,5.

План першого етапу експериментів (2² [1]) представлений точками 1–5 на рис. 1, результати експериментів – у табл. 1, кодоване позначення змінних – табл. 2.

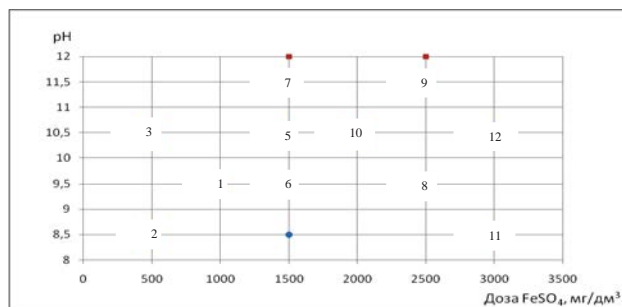


Рис. 1. Область визначення факторів при реагентній обробці

Інтервали варіювання факторів: X₁ (FeSO₄) : Δ₁= 500, X₂ (pH) : Δ₂ = 1.

Кодовані позначення:

$$\bar{X}_{1i} = \frac{X_{1i} - X_{10}}{\Delta_1}, \tag{1}$$

$$\bar{X}_{2i} = \frac{X_{2i} - X_{20}}{\Delta_2}. \tag{2}$$

Наприклад, для точки 3 (рис. 3): $\bar{X}_{12} = \frac{X_{12} - X_{10}}{\Delta_1} = \frac{500 - 1000}{500} = -1$; $\bar{X}_{22} = \frac{X_{22} - X_{20}}{\Delta_2} = \frac{10,5 - 9,5}{1} = 1$. Матриця планування, значення факторів та результати експериментів зведені в табл. 3.

У наведеній матриці введено фіктивний фактор X₀, який необхідний для розрахунку вільного члена в лінійній моделі:

$$Y = b_0 + b_1 \bar{x}_1 + b_2 \bar{x}_2. \tag{3}$$

В результаті обробки експериментальних даних отримано рівняння регресії (кореляційні моделі процесу):

$$Y_1 = 714,25 - 195,25 \bar{x}_1 - 32,25 \bar{x}_2, \tag{4}$$

$$Y_2 = 393,5 - 30,5 \bar{x}_1 - 50,5 \bar{x}_2. \tag{5}$$

Виходячи з наявності широкого діапазону вихідних значень ХПК та БПК (див. табл. 2), з метою зручності дисперсії відтворюваності, як функції відгуку прийняті відносні значення ХПК = ХПК/ХПК₀ та БПК = БПК/БПК₀. Таким чином:

$$\bar{Y}_i = \frac{Y_i}{Y_0}, \tag{6}$$

де: Y₀ – початкове значення ХПК; Y_i – значення ХПК після експерименту.

Наприклад, в першій серії експериментів для точки 2 (див. табл. 3): Y₁₂ = ХПК = 504; вихідні значення Y₀ = БПК = 744,8; Y₀ = БПК=1560. Тому:

$$\bar{Y}_1 = Y_{11}/Y_0 = 504/1560 = 0,323, \tag{7}$$

$$\bar{Y}_2 = Y_{21}/Y_{20} = 486/744,8 = 0,652. \tag{8}$$

Умови та результати експериментів у відносних значеннях наведені в табл. 4.

У відносних змінних отримано такі кореляційні моделі:

$$\bar{Y}_1 = 0,349 - 0,088 \cdot \bar{X}_1 - 0,015 \cdot \bar{X}_2, \tag{9}$$

$$\bar{Y}_2 = 0,421 - 0,056 \cdot \bar{X}_1 - 0,056 \cdot \bar{X}_2. \tag{10}$$

Аналіз рівнянь (4, 5, 9, 10) показав, що зі збільшенням X₁ (дози FeSO₄) та X₂ (pH) залишкові значення ХПК

Таблиця 3

Матриця планування, фактори, результати експериментів

№ дослід	Фактори					Результати експериментів					
	абсолютні значення		кодовані позначення			Y ₁ , Y ₂ – середні значення результатів експериментів					
	X ₁	X ₂	\bar{X}_0	\bar{X}_1	\bar{X}_2	Y ₁₁	Y ₁₂	Y ₁	Y ₂₁	Y ₂₂	Y ₂
2	500	8,5	1	-1	-1	504	1400	952	486	446	468
3	500	10,5	1	-1	1	535	1200	867,5	488	273	380,5
4	1500	8,5	1	1	-1	448	635	541,5	360	480	420
5	1500	10,5	1	1	1	360	635	497,5	123	490	306,5

Таблиця 4

Умови та результати експериментів у відносних значеннях

№ № точок	Фактори			Результати експериментів			
	X ₀	X ₁	X ₂	1-а серія		2-а серія	
				X ₁	X ₂	X ₁	X ₂
1	-	0	0	0,243	0,49	0,25	0,405
2	1	-1	-1	0,323	0,652	0,583	0,372
3	1	-1	1	0,342	0,655	0,5	0,228
4	1	1	-1	0,287	0,483	0,264	0,4
5	1	1	1	0,230	0,165	0,264	0,409

та БПК зменшуються, що свідчить про доцільність продовження експериментів зі збільшенням доз FeSO₄ та рН. Значення доз FeSO₄ і рН, в межах яких проводився другий етап досліджень, а також результати експериментів наведено в табл. 7 (точки 6–12, рис. 1).

Отримано такі моделі залежностей $\bar{Y}_1(\bar{x}_1, \bar{x}_2)$, $\bar{Y}_2(\bar{x}_1, \bar{x}_2)$:

$$\bar{Y}_1 = 0,238 - 0,012\bar{x}_1 + 3,125 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{x}_2 \quad (11)$$

$$\bar{Y}_2 = 0,386 - 0,02\bar{x}_1 + 2,25 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{x}_2 \quad (12)$$

В рівняння (11, 12) \bar{x}_1 входить зі знаком “-”, а \bar{x}_2 – зі знаком “+”, але з дуже малими коефіцієнтами. З цього випливає, що значення рН > 10,5 зумовлюють підвищення залишкової концентрації забруднюючих речовин в обробленому фільтраті, чим підтверджується правильність визначення області оптимізації.

Зменшення функцій \bar{Y}_1 та \bar{Y}_2 відбувається у напрямках: для Y₁ – вектор із координатами $\bar{x}_1 = 0,012$, $\bar{x}_2 = -3,125 \cdot 10^{-3}$, для Y₂ – вектор із координатами $\bar{x}_1 = 0,02$; $\bar{x}_2 = -2,25 \cdot 10^{-3}$.

Визначимо значення ХПК (X₁) у точці мінімуму функції відгуку \bar{Y}_1 . Збільшуючи X₁ ще на 500 (тобто $\Delta X_1 = 500$, $\Delta \bar{x}_2 = 500/500 = 1$) і рухаючись градієнтом, ми прийдемо в точку з координатою X₁ = 2500. При цьому приріст \bar{x}_2 становитиме:

$$\Delta \bar{x}_2 = \frac{500 \cdot (-3,125 \cdot 10^{-3})}{500 \cdot 0,12} = -0,26; \quad X_{2min} = 10,5 - 0,26 \approx 10,24$$

Таким чином, координати точки мінімального значення Y₁ (ХПК), становлять: X₁ (доза FeSO₄) = 3000 мг/дм³, X₂ (рН) ≈ 10.

Аналогічний розрахунок виконуємо для БПК: $\Delta \bar{x}_2 = \frac{500 \cdot (-2,25 \cdot 10^{-3})}{500 \cdot 0,02} = 0,113$.

Значення рН, при якому досягається мінімальне значення Y₂ (БПК), при умові, що X₁ = 2500, дорівнює 10,5 – 0,113 = 10,39.

Для більш точної локалізації точки мінімуму було вирішено описати всю сукупність даних із двох серій експериментів моделлю другого порядку. В результаті розрахунків отримано наступні залежності:

$$\bar{Y}_1 = \frac{ХПК}{ХПК_0} = 1,914 - 3,142 \cdot 10^{-4} [FeSO_4] - 0,271 \cdot pH + 5,905 \cdot 10^{-8} [FeSO_4]^2 + 0,013 \cdot (pH)^2 + 3,453 \cdot 10^{-6} [FeSO_4] \cdot pH; \quad (13)$$

$$\bar{Y}_2 = \frac{БПК}{БПК_0} = 2,656 - 2,138 \cdot 10^{-4} [FeSO_4] - 0,398 \cdot pH + 2,04 \cdot 10^{-8} [FeSO_4]^2 + 0,018 \cdot (pH)^2 + 1,038 \cdot 10^{-5} [FeSO_4] \cdot pH. \quad (14)$$

Результати двох етапів досліджень показано у табл. 5. На рис. 2, 3 представлені ізолінії відносних значень ХПК/ХПК₀ та БПК/БПК₀, відповідно. Ізолінії отримані перетином побудованих за розробленими моделями поверхонь відгуку горизонтальними площинами з інтервалом $\Delta Y = 0,01$.

Аналіз результатів виконаних досліджень дозволив встановити, що оптимальними параметрами реагентного очищення стічних вод полігонів ТПВ, що забезпечують мінімізацію ХПК та БПК, є: доза FeSO₄ – 3000 мг/дм³ та значення рН = 10,3.

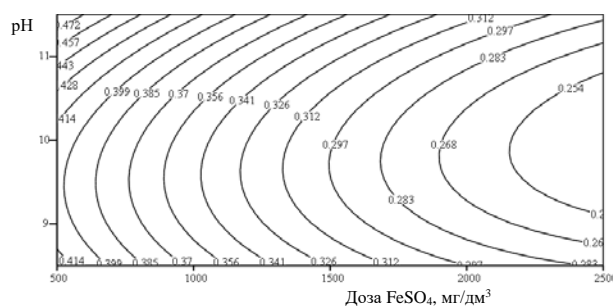


Рис. 2. Ізолінії відносних значень ХПК = ХПК/ХПК₀

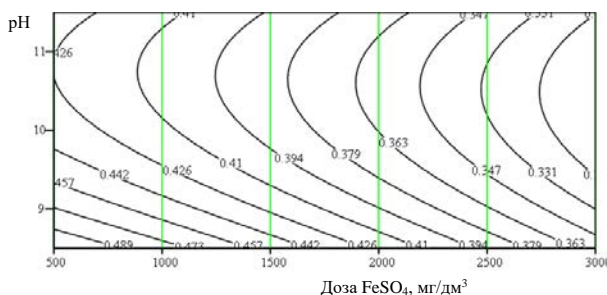


Рис. 3. Ізолінії відносних значень БПК = БПК/БПК₀

Результати двох етапів досліджень по реагентному очищенню стічних вод полігону ТБВ

№ досліду	Фактори		I-й етап							
			1-серія при вихідних даних БПК = 744,8; ХПК = 1560				2-серія при вихідних даних БПК = 1198; ХПК = 2400			
	X ₁	X ₂	ХПК		БПК		ХПК		БПК	
	FeSO ₄	pH	I	II	I	II	I	II	I	II
1	1000	9,5	379,47	0,243	364,8	0,49	600	0,25	486	0,406
2	500	8,5	504	0,323	486,5	0,653	1400	0,583	446,1	0,373
3	500	10,5	535,1	0,343	488	0,655	1200	0,5	273,2	0,228
4	1500	8,5	447,58	0,287	360	0,483	634,6	0,264	480	0,401
5	1500	10,5	360,01	0,231	123	0,165	634,6	0,264	490	0,41
№ досліду	Фактори		II-й етап							
			1-серія при вихідних даних БПК = 915; ХПК = 1860				2-серія при вихідних даних БПК = 1024; ХПК = 2250			
	X ₁	X ₂	ХПК		БПК		ХПК		БПК	
	FeSO ₄	pH	I	II	I	II	I	II	I	II
6	1500	9,5	617,5	0,332	425,4	0,465	776,2	0,345	477,2	0,466
7	1500	11,5	647,29	0,348	422,7	0,462	818	0,364	441,3	0,431
8	2000	10,5	500,3	0,269	343,1	0,375	654,7	0,291	408,5	0,399
9	2500	9,5	558,0	0,300	337,6	0,369	663,7	0,295	399,3	0,390
10	2500	11,5	548,7	0,295	338,5	0,370	650,2	0,289	378,9	0,370
11	3000	8,5	533,8	0,287	320,2	0,350	596,2	0,265	351,2	0,343
12	3000	10,5	398,0	0,214	290,9	0,318	508,5	0,226	312,3	0,305

Примітка: Концентрація FeSO₄ (X₁), мг/дм³

I – абсолютні значення ХПК та БПК, мгО₂/дм³;

II – відносні значення ХПК та БПК $\left(\frac{ХПК}{ХПК_0}; \frac{БПК}{БПК_0} \right)$

Література

1. Яцков М. В., Варнавська І. В. Аналіз методів очищення стічних вод місць захоронення ТПВ. *Науково-технічний журнал «Екологія довкілля та безпека життєдіяльності»*. № 4. 2008. С. 69-73.
2. Сталінський Д. В., Епштейн С. І., Музикіна З. С., Варнавська І. В., Яцков М. В. До питання про очищення стічних вод полігонів твердих побутових відходів. *Науковий вісник будівництва*. Вип. 52. Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2009. С. 120-129.
3. Сталінська І. В. Зменшення екологічного ризику полігонів твердих побутових відходів. *Науково-практичний журнал «Екологічні науки»*. 2022. Випуск 4 (43), С. 185-189.
4. Grippa E., Daffon S. D. A., de Almeida R., da Fonseca F. V., Campos J. C. Landfill leachate treatment by high-pressure membranes and advanced oxidation techniques with a focus on ecotoxicity and by-products management: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 173. 2023. P. 747-764. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.074>
5. Zhang Q., Tian B., Zhang X., Ghulam A., Fang C., He R. Investigation on characteristics of leachate and concentrated leachate in three landfill leachate treatment plants. *Waste Management*, Vol. 33, is. 11. 2013. P. 2277-2286. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.07.021>
6. Аналітична хімія: навч.-довідк. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / В.В. Болотов, О.А. Євтіфєєва, Т.В. Жукова, Л.Ю. Клименко, О.Є. Микитенко, В.П. Мороз, І.Ю. Петухова; за заг.ред. В.В. Болотова. Х.: НФаУ, 2014. – 320 с.
7. Сталінський Д. В., Епштейн С. І., Музикіна З. С., Діденко Н. М., Варнавська І. В. Розрахунок вмісту важких металів під час очищення стічних вод. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХДТУБА, 2010. Вип. 61. С. 235-241.
8. Шамаєв Ю.П., Лисенко Ю.С. Визначення математичної моделі планування експерименту при ідентифікації випробувань. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. Вип. 1(38). 2014. С. 228-229. <https://core.ac.uk/download/232878885.pdf>
9. Планування експерименту в техніці / В. І. Барабашук, Б. П. Креденцера, В. І. Мірошніченко; Під ред. Б. П. Креденцера. – К.: Техніка, 1984. – 200с.
10. Chen H., Xu H., Zhong Ch., Liu M., Yang L., He J., Sun Y., Zhao Ch., Wang D. Treatment of landfill leachate by coagulation: A review. *Science of The Total Environment*, Vol. 912. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169294>
11. Baettker E. C., Kozak C., Knapik H. G., Aisse M. M. Applicability of conventional and non-conventional parameters for municipal landfill leachate characterization. *Chemosphere*, 251. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126414>
12. Alver A., Atlas L. Characterization and electrocoagulative treatment of landfill leachates: A statistical approach. *Process Safety and Environmental Protection*. Vol. 111. 2017. P. 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.04.021>