

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ВИБОРУ ПРИРОДОЗАХИСНОГО ОБЛАДНАННЯ

I. С. Козій¹¹Сумський державний університет, Суми, Україна

УДК 621.162.252

DOI: 10.52363/2522-1892.2022.1.7

Отримано: 15 березня 2022

Прийнято: 7 квітня 2022

Cite as: Kozii I. (2022). Systematic approach to selection of environmental equipment. Technogenic and ecological safety, 11(1/2022), 48–54. doi: 10.52363/2522-1892.2022.1.7

Анотація

У статті розглянуто питання оптимального вибору ефективного пилогазоочисного обладнання з урахуванням реальних умов середовища і характеристик забруднюючих речовин. Осадження забруднюючих речовин із газових викидів призводить до забруднення ґрунтів і міграції важких металів у підземні і поверхневі води, тому питання оптимального вибору ефективного природозахисного обладнання становить актуальність дослідження. Проблема обґрунтованого вибору оптимального пилогазоочисного обладнання повинна враховувати параметри забруднюючих речовин і умов середовища проведення процесу очищення, що може бути виконано з використанням математичного апарату. У статті за допомогою алгебри висловлень сформульовано поступовість і наслідування роботи алгоритмічної програми розрахунку оптимального пилогазоочисного обладнання на підставі параметрів забруднюючих речовин та умов середовища. Аналіз графу дає змогу отримати швидке алгоритмічне пояснення орієнтованого оптимального вибору певних типів очисного обладнання. На підставі аналізу і візуалізації ієрархічної будови схеми вибору пилогазоочисного обладнання можна зробити висновок про зручну оцінку ефективності проведення процесу очищення.

Ключові слова: технології захисту навколишнього середовища, забруднюючі речовини, пилогазоочисне обладнання.

Постановка проблеми

За ступенем хімічної небезпеки для людини забруднення атмосферного повітря посідає перше місце. З метою оцінки ступеня техногенного навантаження на навколишнє середовище, значну увагу приділяють дослідженню викидів забруднюючих речовин, як ключовому фактору формування зон екологічного неблагополуччя.

Виробництво електроенергії, тепла та продуктів хімічної галузі для задоволення потреб суспільства призводить до підвищення негативного впливу на навколишнє середовище та сприяє підвищенню ризику захворювання для населення [1–3]. Роботи цілого ряду дослідників [4–7] присвячені питанням негативного впливу теплоелектростанцій та хімічних підприємств на атмосферне повітря та пошук шляхів вирішення цієї проблеми.

Підприємства теплоенергетики і хімічної галузі є суттєвими джерелами комплексного забруднення навколишнього середовища [8, 9]. (пил) вихідної речовини та продукції тощо.

Традиційно на більшості промислових підприємств енергетичної та хімічної галузі схеми пилогазоочиснення представлені апаратами сухого та мокрого типами очищення.

Як апарати сухого очищення в основному використовуються циклони, електрофільтри і рукавні фільтри. Зазначені види апаратів сухого очищення використовуються для уловлювання зважених твердих речовин, але не здатні ефективно працювати з газовими потоками, які містять легкозліпчиві, смолисті речовини та дрібнодисперсний пил.

Апарати мокрого пилогазоочиснення представлені в основному розпилюючими та тарілчастими скруберами, апаратами вихрового типу та іншими конструкціями. В основному мокре очищення не вимагає додаткової підготовки газів, дозволяє одночасно проводити очищення як від газових викидів, так і дисперсних частинок. Мокре пилловловлення має високу ефективність при вловлюванні дрібнодисперсного пилу, але проблема очищення газів від легкозліпчивих і смолистих речовин унеможливує ефективне використання апаратів мокрого типу.

Аналіз основних типів пилогазоочисного обладнання широко представлений у науковій літературі, але питання оптимального вибору певних конструкцій апаратів з урахуванням реальних умов технологічного середовища та характеристик забруднюючих речовин потребує подальшого дослідження.

Захист та збереження навколишнього середовища є ключовими цілями сталого розвитку суспільства, тому питання вибору оптимальних технологічних рішень очищення викидів зумовлює необхідність розробки програмних рішень та актуальність дослідження напрямків зниження навантаження на навколишнє середовище.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема обґрунтованого вибору оптимального пилогазоочисного обладнання полягає в тому, що необхідно враховувати параметри забруднюючих речовин та умов середовища проведення процесу очищення [10].

У загальному вигляді методику вибору оптимальних технологічних рішень для очищення пилогазових викидів можна представити сукупністю трьох елементних блоків:

- забруднювальна речовина;
- умови технологічного середовища;
- пилогазоочисне обладнання.

Співвідношення цих блоків між собою дає певний еколого-технологічний результат застосування технологічного рішення у разі конкретної забруднюючої речовини.

Для розробки програмного алгоритму вибору технологічних рішень скористаємося методом послідовної ієрархічної кластеризації (ПК). Відповідно до принципів математичної логіки заданий елемент (об'єкт) з урахуванням його характеристик можна подати у вигляді кластерної дендрограми [11, 12].

Виходячи зі специфіки роботи природозахисного обладнання, формуються вимоги до пилогазоочисного обладнання, яке буде відповідати

умовам проведення процесу очищення від викидів певних забруднюючих речовин, для забезпечення якого необхідно розробити оптимальну технологію [13–18].

Оскільки завдання розробки такої технології є інваріантним, тобто реалізується різними методами або їх комбінацією, на першому етапі спрямованого вибору формуємо матрицю досяжності розв'язання задачі $S=[s_i]$, яка визначається наступним чином:

$$\begin{cases} 1, \text{ якщо вершина } \Phi_0 \text{ досяжна з } \Phi_i; \\ \text{якщо вершина недосяжна,} \end{cases}$$

де Φ_0 – розв'язання задачі, Φ_i – елемент розв'язання.

Таким чином, відбувається відсіювання всіх варіантів, які не забезпечують необхідні вимоги (тупикові варіанти). Сукупність варіантів реалізації задачі знаходження оптимального природозахисного обладнання представляємо у вигляді графа (рис. 1):

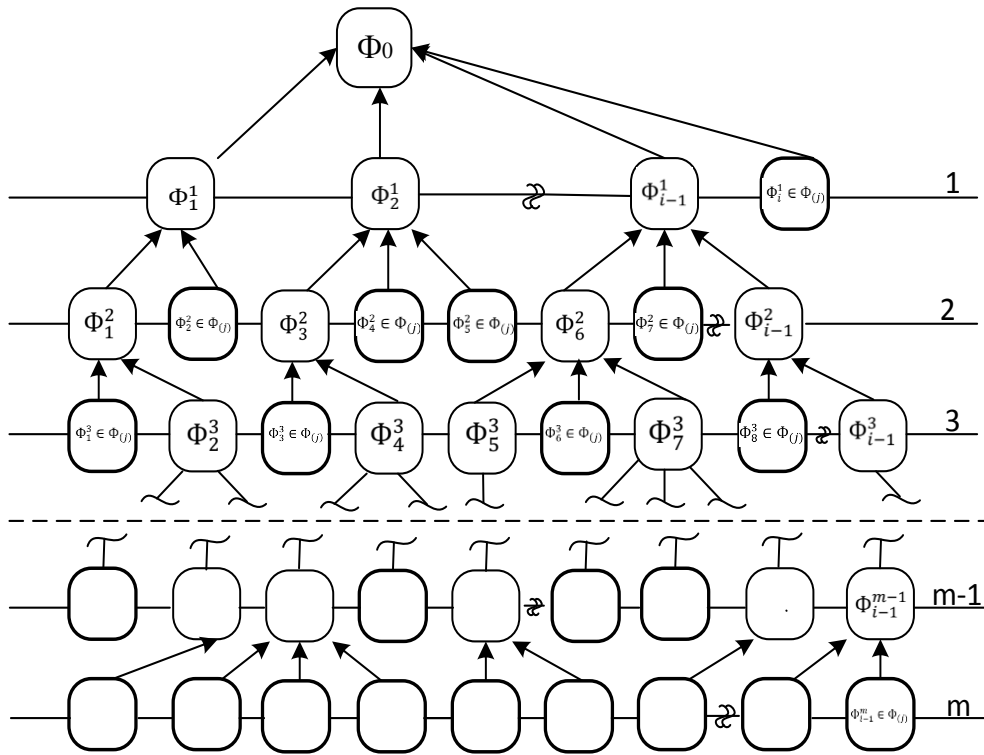


Рисунок 1 – Граф реалізації задачі (дерево розв'язків)

Граф є орієнтованим, його вершина Φ_0 – розв'язання задачі, рівні графа відповідають етапам розв'язання, тобто. необхідній сукупності задіяних методів із можливих «m» варіантів комбінацій. Вузли графа – методи досягнення необхідних вимог на кожному етапі. Ребрами графа є комбінації, що дозволяють реалізувати конкретний метод. Початок розв'язання задачі (витік) – «висяча» вершина графа, тобто нижній рівень розбиття задачі.

Отже, граф складається з гілок рішень – множини вузлів $S(\Phi_i)$ графа, досяжних з вершини Φ_0 , для яких, згідно з матрицею досяжності D , кожен елемент Φ_i дорівнює 1.

Оскільки вершина графа Φ_0 , шлях до якої з Φ_i , може бути досягнута з використанням шляху довжиною 1, 2, ..., m етапів, то множини варіантів розв'язків задачі можна подати у вигляді:

$$S(\Phi_i) = \Omega\{\Phi_i\} \cup \Omega^2\{\Phi_i\} \cup \dots \cup \Omega^{m-1}\{\Phi_i\} \cup \Omega^m\{\Phi_i\}, \tag{1}$$

де $\Omega^{m-1}\{\Phi_i\}$ – множина вершин графа, які утворюють мости між (Φ_i, Φ_0) .

До того ж необхідною умовою формування множини є співвідношення:

$$\{\Phi_0\} = \cup\{\Phi(j)\Phi(j) - \text{вісяча вершина графа}\}. \quad (2)$$

Пошук рішень завершується тоді, коли буде розглянуто всі вісячі вершини. Ранжування варіантів рішень відбувається в залежності від довжини шляху (кількості етапів).

Задача структурної оптимізації (найменша кількість методів) у цьому випадку:

$$\Phi_0^{\text{opt}} = \lim_{m \rightarrow 1} \{\Phi_0\}. \quad (3)$$

При дотриманні вимог щодо екологічної «чистоти» повітря:

$$K = \text{extr}\{f_0(x, y) | x \in D\}, \quad (4)$$

де K – функція «чистоти», $f_0(x, y)$ – критерій оптимізації, x – параметр керування, y – постійний параметр процесу, D – область раціональних значень x .

Постановка завдання та його вирішення.

Застосування вищезазначеної методики для параметричної оптимізації можливе за умови зіставлення «чистих викидів» і методів. Однак у реальних умовах виробництва методи очищення істотно відрізняються один від одного, крім того, дисбаланс вносить фізичний та хімічний склад забруднюючих речовин. Тому, параметризовану оптимізацію доцільно проводити у вигляді графа спрямованого вибору пилоочисного апарату (рис. 2), що реалізується n кількістю методів.

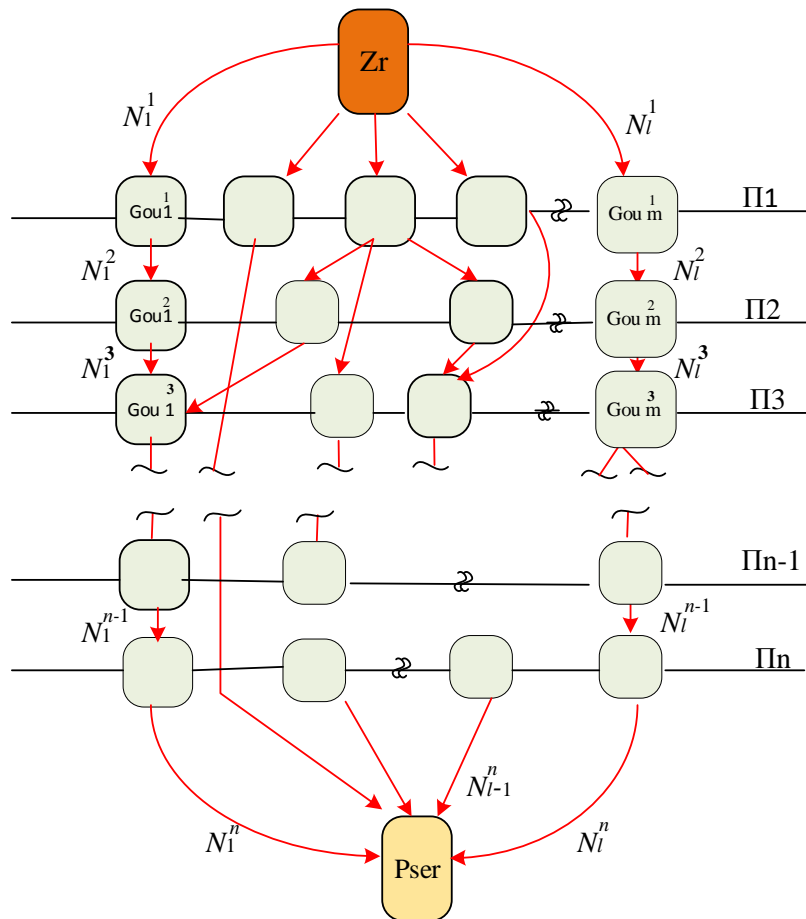


Рисунок 2 – Граф вибору апарату пилогазоочищення

На графі введено наступні позначення: Z_r – забруднююча речовина; P_{ser} – параметри середовища; $\Pi_1 \dots \Pi_n$ – методи за заданою потужністю (рівні графа); $Gou_1 \dots Gou_m$ – пилогазоочисне обладнання, що здатне реалізувати дані методи (вершини графа); $N_1 \dots N_i$ – кількість викидів (ребра графа).

У цьому випадку математична модель процедури спрямованого вибору представляється у вигляді гіперпризми, площини якої відповідають методам досягнення чистоти повітря, а самі площини є матрицями технологічного обладнання та відповідними їм матрицями середовища та кількості викидів (рис. 3–5, табл. 1).

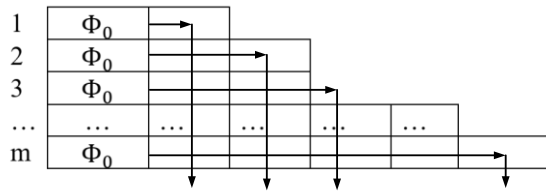


Рисунок 3 – Схема можливих варіантів розв’язків

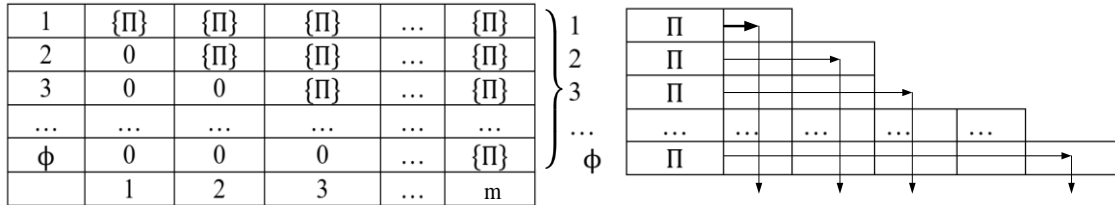


Рисунок 4 – Схема можливих варіантів потужності технологічного обладнання

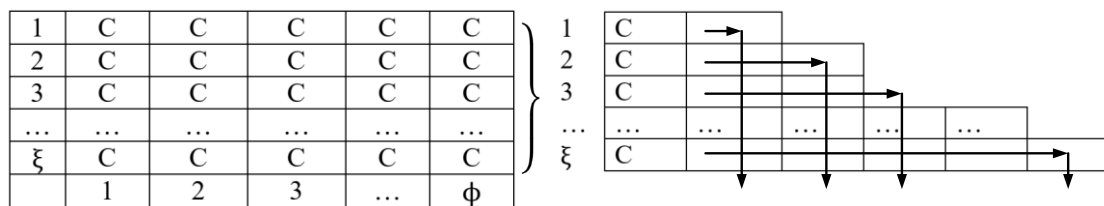


Рисунок 5 – Набір пірогазоочисних апаратів для реалізації очищення при заданій потужності

Запропонована модель дозволяє побудувати матрицю суміжності методів $A = [a_{i,j}]$ (рис. 6), яка має розмірність $m \times n$ за кількістю аналізованих методів та складності розв’язання задачі і визначається так:

- $a_{i,j} = 1$, якщо існує зв’язок між методами при вказаній потужності (P_i, P_j) ;
- $a_{i,j} = 0$, якщо зв’язку немає.

Заповнення матриці відбувається горизонтально. Відповідно до графа реалізації даної задачі (рис.1), рядок матриці відповідає набору методів, а стовпець визначає складність розв’язання задачі (кількість етапів).

Матриця суміжності методів будується під кожен гілку графа з висячою вершиною. Останній рядок, в якому є «1», відповідає нижньому рівню розбиття завдання.

Відповідно до матриць суміжності, будуюмо мережеву модель вибору обладнання (рис. 7). Вузли мережі є методами, відрізки шляху відповідають параметрам забруднюючих речовин та умовам середовища.

Спрямований вибір обладнання полягає у визначенні найкоротшого шляху цієї мережевої моделі. Якщо в якості вагової функції (ρ) прийняти оптимальний апарат, що відображає ваги на відрізках мережі, то весь шлях $\gamma = \langle r_0, r_1, \dots, r_k \rangle$ дорівнює сумі ребер, що входять до нього:

$$\rho(\gamma) = \sum_{i=1}^k \rho(r_{i-1}, r_i). \quad (5)$$

В цьому випадку вага найкоротшого шляху з витоку Z_r в стік P_{ser} визначатиметься співвідношенням:

$$\Delta(Z_r, P_{ser}) = \begin{cases} \min\{\rho(\gamma) : Z_r \rightarrow P_{ser}\}, \\ \infty \text{ у протилежному випадку.} \end{cases} \quad (6)$$

Оптимізаційна задача розв’язується методом лінійного програмування. При цьому враховується наступний критерій оптимізації:

$$\rho = f(\alpha, \beta), \quad (7)$$

де α – параметр, який залежить від методу очищення при заданій потужності ([19, табл. 3]); β – набір обмежень умов середовища та фізико-хімічного складу забруднюючих речовин ([19, табл. 1, 2]).

Таблиця 1 – Можливі варіанти спроможності пірогазоочисних апаратів реалізувати необхідні методи при заданій потужності

1	N	N	N	N	N
2	N	N	N	N	N
3	N	N	N	N	N
...
v	N	N	N	N	N
	1	2	3	...	ξ

0	0	0	1	0	...	0	1
0	0	1	0	0	...	0	2
1	0	0	0	0	...	0	3
0	0	0	0	1	...	0	4
0	0	0	0	0	...	1	5
...
0	1	0	0	0	...	0	m
Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	...	Π_n	

Рисунок 6 – Матриця суміжності рівнів

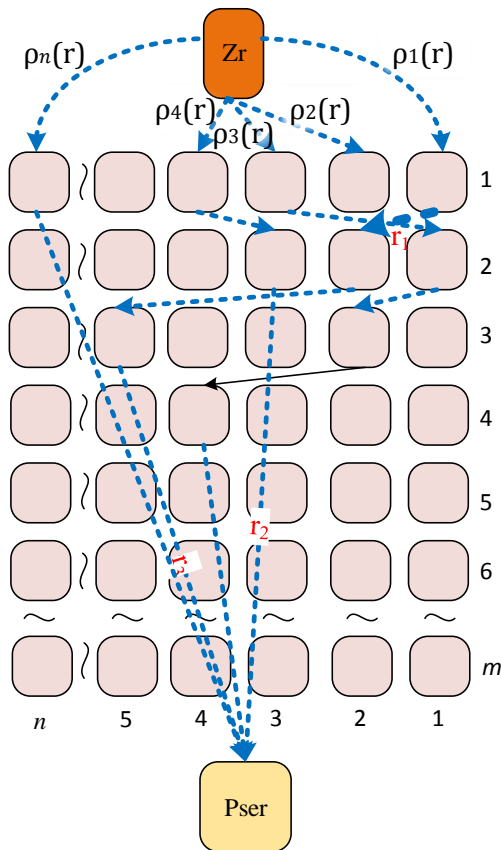


Рисунок 7 – Мережева модель вибору обладнання

Необхідна умова існування технологічного процесу:

$$\exists_{\varepsilon \in \Theta} \Phi_{0\varepsilon} = \bigcap_{\psi=1}^m \Omega^\psi \{ \Phi_i \} \vee \exists_{\phi=1 \div \varphi} \Pi_\varphi \vee \exists_{\xi=1 \div \chi} C_\xi \vee \exists_{v=1 \div r} N_v, \quad (8)$$

де $\exists_{\varepsilon \in \Theta} \Phi_{0\varepsilon}$ – існуючий варіант розв’язання задачі;

$\bigcap_{\psi=1}^m \Omega^\psi \{ \Phi_i \}$ – сукупність етапів розв’язання задачі;

$\exists_{\phi=1 \div \varphi} \Pi_\varphi$ – наявність методів розв’язання задачі на

кожному етапі при зазначеній потужності;

$\exists_{\xi=1 \div \chi} C_\xi$ – спроможність очисних апаратів реалізувати необхідні методи;

$\exists_{v=1 \div r} N_v$ – кількість та якість викидів, які

знешкоджуються методом використання певного типу пилогазоочисного обладнання. При цьому множина розв’язків на якісному рівні задовольнятиме достатню умову:

$$\forall_{k \in X} \Phi_{0k} = \left\{ \Phi_0 \mid \beta_{\Phi_0}^{\min} \leq \beta_{\Phi_0} \leq \beta_{\Phi_0}^{\max} \right\}. \quad (9)$$

Тобто для всіх існуючих варіантів розв’язання задачі критерії якості процесу повинні знаходитися в області допустимих значень як діапазону кількості викидів, потужністю апарату, можливістю ефективно працювати, так і обмежень для умов середовища проведення процесу.

У цьому випадку при виконанні необхідної та достатньої умови формується множина розв’язків:

$$\{ O_{\Phi_0} \} = \bigcup_{k \in X} \left\{ O_{\Phi_0}(k) \mid \begin{cases} \exists_{\varepsilon \in \Theta} \Phi_{0\varepsilon} = \bigcap_{\psi=1}^m \Omega^\psi \{ \Phi_i \} \vee \exists_{\phi=1 \div \varphi} \Pi_\varphi \vee \exists_{\xi=1 \div \chi} C_\xi \vee \exists_{v=1 \div r} N_v, \\ \forall_{k \in X} \Phi_{0k} = \left\{ \Phi_0 \mid \beta_{\Phi_0}^{\min} \leq \beta_{\Phi_0} \leq \beta_{\Phi_0}^{\max} \right\} \end{cases} \right\} \quad (10)$$

Оптимізаційна задача подається виразом:

$$\Phi_0^{\text{opt}} = \lim_{O_{\text{обл}} \rightarrow \min} \Phi_0 \mid O_{\text{обл}} \in \{ C_{\Phi_0} \}. \quad (11)$$

Таким чином, оптимальним приймається той варіант технологічного обладнання для очищення від викидів певних забруднюючих речовин, що відповідає критеріям мінімального вибору пилогазоочисного обладнання при найбільшій ефективності уловлення домішок забруднюючих речовин.

Висновки.

Розроблено системний підхід до вибору пилогазоочисного обладнання, який ґрунтується на методі синтезу раціональної технології. За допомогою графів отримано швидке алгоритмічне пояснення орієнтованого оптимального вибору певних типів очисного обладнання. Запропонований метод враховує різні фізичні особливості роботи обладнання та дозволяє відповідно до кількості викидів та врахування умов середовища обирати найбільш ефективні технологічні природоохоронні рішення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Human exposure risks for metals in soil near a coal-fired power-generating plant / George J. et al. *Archives of environmental contamination and toxicology*. 2015. Vol. 68(3). P. 451–461. DOI: 10.1007/s00244-014-0111-x.
2. Liao M. C., Lan K., Yao Y. Sustainability implications of artificial intelligence in the chemical industry: A conceptual framework. *Journal of industrial ecology*. 2021. Vol. 26(1). P. 164–182. DOI: 10.1111/jiec.13214.
3. Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status quo, challenges and opportunities / Ahmad T. et al. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 289. Art. 125834. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125834.
4. Popescu L. G., Popa R. G., Schiopu E. C. The thermal power plant impact on the environment and some possibilities of reduce it by ash and slag recycling and reuse. *Scientific Papers, Series E – Land Reclamation, Earth Observation and Surveying Environmental Engineering*. 2018. Vol. 7. P. 10–15.
5. Comprehensive evaluation of coal-fired power plants based on grey relational analysis and analytic hierarchy process / Gang X. et al. *Energy Policy*. 2011. Vol. 39(5). P. 2343–2351. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.01.054.
6. Potentials of whole process control of heavy metals emissions from coal-fired power plants in China / Zhu C. et al. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 114. P. 343–351. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.008.

7. Singh R. K., Gupta N. C., Guha B. K. The leaching characteristics of trace elements in coal fly ash and an ash disposal system of thermal power plants. *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization and Environmental*. 2012. Vol. 34(7). P. 602–608. DOI: 10.1080/15567036.2011.621928.
8. Hoang V. N., Alauddin M. Input-orientated data envelopment analysis framework for measuring and decomposing economic, environmental and ecological efficiency: an application to OECD agriculture. *Environmental and Resource Economics*. 2012. Vol. 51(3). P. 431–452. DOI: 10.1007/s10640-011-9506-6.
9. Aljundi I. H. Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan. *Applied Thermal Engineering*. 2009. Vol. 29(2–3). P. 324–328. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.02.029.
10. Kozii I. S., Plyatsuk L. D., Koval V. V. Algorithm for selection equipment to reduce the technogenic effect on the environment. *Problemele Energeticii Regionale*. 2022. Vol. 1(53). P. 59–67. DOI: 10.52254/1857-0070.2022.1-53.05.
11. Bacciu D., Bruno A. Deep tree transductions – A short survey. *Recent Advances in Big Data and Deep Learning. INNSBDDL 2019. Proceedings of the International Neural Networks Society*, Vol. 1, Springer, Cham, 2020. P. 236–245. DOI: 10.1007/978-3-030-16841-4_25.
12. Comparison between UMAP and t-SNE for multiplex-immunofluorescence derived single-cell data from tissue sections / Wu D. et al. *bioRxiv*. 2019. Art. 549659. 20 p. DOI: 10.1101/549659.
13. Selection of equipment types when designing multipurpose chemical plants / Mokrozub V. G., Farakhshina I. V., Al-Magsusii H. F. H., Merkusova K. A. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2020. Vol. 56. P. 230–236. DOI: 10.1007/s10556-020-00763-2.
14. Borisenko A. V., Karpushkin S. V. Hierarchy of processing equipment configuration design problems for multiproduct chemical plants. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2017. Vol. 53(3). P. 410–419. DOI: 10.1134/S1064230714030046.
15. Mokeddem D., Khellaf A. Optimal solutions of multiproduct batch chemical process using multiobjective genetic algorithm with expert decision system. *Journal of Automated Methods and Management in Chemistry*. 2009. Art. 927426. DOI: 10.1155/2009/927426.
16. Lee J. H., Shin J., Realff M. J. Machine learning: Overview of the recent progresses and implications for the process systems engineering field. *Computers and Chemical Engineering*. 2018. Vol. 114. P. 111–121. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2017.10.008.
17. Sustainable manufacturing with cyber-physical discrete manufacturing networks: overview and modeling framework / Garcia D. J. et al. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2018. Vol. 141(2). Art. 021013. DOI: 10.1115/1.4041833.
18. A recursive operations strategy model for managing sustainable chemical product development and production / Choy K. L. et al. *International Journal of Production Economics*. 2016. Vol. 181. Part B. P. 262–272. DOI: 10.1016/j.ijpe.2016.07.011.
19. Критерії вибору природозахисного обладнання для очищення промислових викидів підприємств / Козій І. С. та ін. *Екологічні науки*. 2021. Вип. 6(39). С. 12–18. DOI: 10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.2.

Kozii I.

SYSTEMATIC APPROACH TO SELECTION OF ENVIRONMENTAL EQUIPMENT

The article considers the optimal choice of effective dust and gas cleaning equipment taking into account the actual environmental conditions and characteristics of pollutants. Deposition of pollutants from gaseous emissions leads to soil pollution and migration of heavy metals into groundwater and surface water, so the question of optimal choice of effective environmental equipment is relevant to the study. The problem of reasonable selection of optimal dust and gas cleaning equipment should consider the parameters of pollutants and environmental conditions of the cleaning process, which can be done using a mathematical apparatus. The article uses the algebra of expressions to formulate the gradualness and imitation of the algorithmic program for calculating the optimal dust and gas cleaning equipment based on the parameters of pollutants and environmental conditions. Graph analysis allows a quick algorithmic explanation of the optimal oriented choice of certain types of treatment equipment. Based on the study and visualizations of the hierarchical structure of the scheme of selecting dust and gas cleaning equipment, it is possible to conclude a convenient assessment of the effectiveness of the cleaning process.

Key words: environmental protection technologies, pollutants, dust and gas cleaning equipment.

REFERENCES

1. George, J., Mastro, R. E., Ram, L. C., Das, T. B., Rout, T. K., & Mohan, M. (2015). Human exposure risks for metals in soil near a coal-fired power-generating plant. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 68(3), 451–461. DOI: 10.1007/s00244-014-0111-x.
2. Liao, M., Lan, K., & Yao, Y. (2022). Sustainability implications of artificial intelligence in the chemical industry: A conceptual framework. *Journal of Industrial Ecology*, 26(1), 164–182. DOI: 10.1111/jiec.13214.
3. Ahmad, T., Zhang, D., Huang, C., Zhang, H., Dai, N., Song, Y., & Chen, H. (2021). Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status quo, challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125834. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125834.
4. Popescu, L. G., Popa, R. G., & Schiopu, E. C. (2018). The thermal power plant impact on the environment and some possibilities of reduce it by ash and slag recycling and reuse. *Scientific Papers, Series E – Land Reclamation, Earth Observation and Surveying Environmental Engineering*, 7, 10–15.
5. Gang, X., Yong-ping, Y., Shi-yuan, L., Le, L., & Xiaona, S. (2011). Comprehensive evaluation of coal-fired power plants based on grey relational analysis and analytic hierarchy process. *Energy Policy*, 39(5), 2343–2351. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.01.054.
6. Zhu, C., Tian, H. Z., Cheng, K., Liu, K., Wang, K., Hua, S., Gao, J., & Zhou, J. (2016). Potentials of whole process control of heavy metals emissions from coal-fired power plants in China. *Journal of Cleaner Production*, 114, 343–351. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.008.
7. Singh, R. K., Gupta, N. C., & Guha, B. K. (2012). The leaching characteristics of trace elements in coal fly ash and an ash disposal system of thermal power plants. *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization and Environmental*, 34(7), 602–608. DOI: 10.1080/15567036.2011.621928
8. Hoang, V. N., & Alauddin, M. (2012). Input-orientated data envelopment analysis framework for measuring and decomposing economic, environmental and ecological efficiency: An application to OECD agriculture. *Environmental and Resource Economics*, 51(3), 431–452. DOI: 10.1007/s10640-011-9506-6.
9. Aljundi, I. H. (2009). Energy and exergy analysis of a steam power plant in Jordan. *Applied Thermal Engineering*, 29(2–3), 324–328. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.02.029.
10. Kozii, I. S., Plyatsuk, L. D., & Koval, V. V. (2022). Algorithm for selection equipment to reduce the technogenic effect on the environment. *Problemele Energeticii Regionale*, 1(53), 59–67. DOI: 10.52254/1857-0070.2022.1-53.05.
11. Bacciu, D., & Bruno, A. (2020). Deep tree transductions – A short survey. *Recent Advances in Big Data and Deep Learning. INNSBDDL 2019. Proceedings of the International Neural Networks Society*, 1, Springer, Cham, 236–245. DOI: 10.1007/978-3-030-16841-4_25.

12. Wu, D., Poh Sheng, J. Y., Su-En, G. T., Chevri er, M., Jie Hua, J. L., Kiat Hon, T. L., & Chen, J. (2019). Comparison between UMAP and t-SNE for multiplex-immunofluorescence derived single-cell data from tissue sections. *bioRxiv*, 549659, 20. DOI: 10.1101/549659.
13. Mokrozub, V. G., Farakhshina, I. V., Al-Magsusii, H. F. H., & Merku shova, K. A. (2020). Selection of equipment types when designing multipurpose chemical plants. *Chemical and Petroleum Engineering*, 56, 230–236. DOI: 10.1007/s10556-020-00763-2.
14. Borisenko, A. V., & Karpushkin, S. V. (2017). Hierarchy of processing equipment configuration design problems for multiproduct chemical plants. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 53(3), 410–419. DOI: 10.1134/S1064230714030046.
15. Mokeddem, D., & Khellaf, A. (2009). Optimal solutions of multiproduct batch chemical process using multiobjective genetic algorithm with expert decision system. *Journal of Automated Methods and Management in Chemistry*, 927426. DOI: 10.1155/2009/927426.
16. Lee, J. H., Shin, J., & Reaff, M. J. (2018). Machine learning: Overview of the recent progresses and implications for the process systems engineering field. *Computers and Chemical Engineering*, 114, 111–121. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2017.10.008.
17. Garcia, D. J., Mozaffar, M., Ren, H., Correa, J. E., Ehmann, K., Cao, J., & You, F. (2018). Sustainable manufacturing with cyber-physical discrete manufacturing networks: Overview and modeling framework. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(2), 021013. DOI: 10.1115/1.4041833.
18. Choy, K. L., Ho, G. T. S., Lee, C. K. H., Lam, H. Y., Cheng, S. W. Y., Siu, P. K. Y., Pang, G. K. H., Tang, V., Lee, J. C. H., & Tsang, Y. P. (2016). A recursive operations strategy model for managing sustainable chemical product development and production. *International Journal of Production Economics*, 181(B), 262–272. DOI: 10.1016/j.ijpe.2016.07.011.
19. Kozii, I., Zhylenko, T., Trunova, I., Batalsev, Y., & Makarenko, N. (2021). Kryterii' vyboru pryrodzahysnogo obladnannja dlja ochyshhennja promyslovyh vykydiv pidpryjemstv [Criteria for choosing environmental equipment for cleaning industrial emissions of enterprises]. *Ecological Sciences*, 6(39), 12–18. DOI: 10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.2. [in Ukrainian].