

КРИТЕРІЇ ВИБОРУ ПРИРОДОЗАХИСНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИКИДІВ ПІДПРИЄМСТВ

Козій І.С., Жиленко Т.І., Трунова І.О., Батальцев Є.В., Макаренко Н.О.
Сумський державний університет
вул. Римського-Корсакова, 2, 40007, м. Суми
i.koziy@ecolog.sumdu.edu.ua

Розглянуто питання оптимального вибору ефективного пилогазоочисного обладнання з урахуванням реальних умов середовища і характеристик забруднюючих речовин. Для обґрунтування використано програмне середовище Gephi, на основі алгоритму зниження розмірності – методики UMAP.

Господарська діяльність людини призводить до порушення рівноваги у навколишньому середовищі. У зв'язку з недосконалістю технологічних процесів і незадовільною роботою очисного обладнання на підприємствах енергетики та хімічної промисловості в атмосферу надходять гази, що містять різні за токсичністю сполуки. 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 умови середовища проведення процесу очищення, що може бути виконано з використанням математичного апарату.

Для побудови графу в роботі сформовано бази даних досліджуваних параметрів системи вибору пилогазоочисного обладнання (ВПО) у вигляді матриць елементів. Вибір забруднюючої речовини визначається з матриці забруднюючих речовин з урахуванням вихідних умов певного технологічного об'єкту. Вибір умов перебігу процесу визначається на підставі матриці параметрів середовища, яка формується на основі вихідних даних технологічного процесу або інших прогнозованих параметрах.

У статті за допомогою алгебри висловлень сформульовано поступовість і наслідування роботи алгоритмічної програми розрахунку оптимального ВПО 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, матриці даних.

Criteria for choosing environmental equipment for cleaning industrial emissions of enterprises. Kozii I., Zhylenko T., Trunova I., Bataitsev Y., Makarenko N.

The optimal choice of effective dust and gas cleaning equipment considering pollutants' natural environmental conditions and characteristics is considered. The UMAP method used the Gephi software environment for substantiation based on the dimensional reduction algorithm.

Human economic activity leads to an imbalance in the environment. Due to the imperfection of technological processes and unsatisfactory operation of treatment equipment in the energy and chemical industries, gases containing compounds with different toxicity enter the atmosphere. Deposition of pollutants from gaseous emissions leads to soil contamination 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.

An article formed databases of the studied parameters of the selection system of dust and gas cleaning equipment (IDP) in the form of matrices of elements. The choice of pollutant is determined from the matrix of contaminants, taking into account the initial conditions of a particular technological object. Determined the choice of process conditions based on the matrix of environmental parameters formed based on the initial data of the technical process or other predictable parameters.

The article uses the algebra of expressions to formulate the gradualness and imitation of the algorithmic program for calculating the optimal IDP based on the parameters of pollutants and environmental conditions. Graph analysis allows obtaining a quick algorithmic explanation of the optimal oriented choice of certain types of treatment equipment. Based on the research and visualizations of the hierarchical structure of the scheme of selection of 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, data matrices.

Постановка проблеми. Збільшення масштабів господарської діяльності людини призводить до посилення антропогенного впливу і порушення рівноваги у навколишньому середовищі. За ступенем хімічної небезпеки для людини забруднення атмосферного повітря посідає перше місце [1]. З метою оцінки ступеня техногенного навантаження на навколишнє середовище суттєва увага приділяється

дослідженню викидів забруднюючих речовин як визначальному фактору формування зон екологічного неблагополуччя.

Одним із основних чинників, що впливають на санітарний стан атмосфери, є викиди підприємств енергетики та хімічної промисловості [2, 3]. У зв'язку з недосконалістю технологічних процесів і незадовільною роботою очисного обладнання [4]

на цих підприємствах в атмосферу надходять гази, що містять різні за токсичністю сполуки, дрібнодисперсні зважені краплі рідини, тверді частки (пил) вихідної сировини й продукції тощо.

Актуальність дослідження. Осадження забруднюючих речовин із газових викидів призводить до забруднення ґрунтів і міграції важких металів у підземні і поверхневі води [5–9], тому питання оптимального вибору ефективного природозахисного обладнання становить актуальність дослідження. Проблема обґрунтованого вибору оптимального пилогазоочисного обладнання повинна враховувати параметри забруднюючих речовин і умови середовища проведення процесу очищення, що може бути виконано з використанням математичного апарату.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконувалася за плановими науково-дослідними проєктами кафедри прикладної екології Сумського державного університету за темою «Зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище підприємств хімічної, машинобудівної промисловості та теплоенергетики» згідно із науково-технічною програмою Міністерства освіти і науки України (№ державної реєстрації 0116U006606).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно на більшості промислових підприємств енергетичної та хімічної галузі схеми пилогазоочислення представлені апаратами сухого та мокрого типу [10, 11].

Як апарати сухого очищення в основному використовують циклони, електродфільтри та рукавні фільтри [12, 13]. Зазначені види апаратів сухого очищення використовуються для уловлення зважених твердих часток, але вони не спроможні ефективно працювати з потоками газу, що містять легкозліпливі та смолисті речовини і дисперсний пил.

Апарати мокрого пилогазоочислення представлені в основному розпилюючими та тарілчастими скруберами, апаратами вихрового типу та іншими конструкціями [14]. Зазвичай мокре очищення не вимагає додаткової підготовки газів, дозволяє одночасно проводити очищення як від газових викидів, так і дисперсних часток. Мокре пилоочислення має високу ефективність при вловленні дрібнодисперсного пилу, але проблема очистки газів від легкозліпливих та смолистих речовин виключає можливість ефективного використання апаратів мокрого типу [15].

Аналіз основних типів пилогазоочисного обладнання широко представлено у науковій літературі [16, 17], але питання оптимального вибору певних конструкцій апаратів з урахуванням реальних умов середовища і характеристик забруднюючих речовин потребує подальшого дослідження.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується

означена стаття. Використання ефективного обладнання для очищення газових викидів підприємств від певних забруднюючих речовин суттєво зменшує негативний вплив на довкілля. Тому завдання математично обґрунтованого вибору оптимального природозахисного обладнання з урахуванням як параметрів досліджуваного процесу очищення викидів, так і параметрів забруднюючих речовин становить новизну роботи.

Методологічне або загальнонаукове значення. Одним із сучасних математичних інструментів аналізу і спрощення інформації є побудова графів [18]. Граф – це метод графічних даних та відношень між ними (рис. 1).

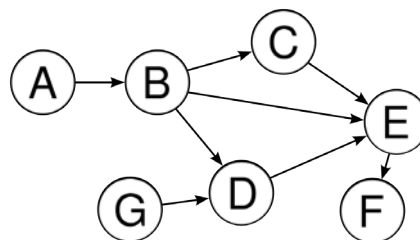


Рис. 1. Направлений ациклічний граф

Мета побудови графів – представити різні типи складних даних для їх адекватного опису в тексті або алгоритмі. Об'єкти розглядаються як вершини, або вузли графу, а зв'язки – як дуги, або ребра. Для різних галузей види графів можуть відрізнятися орієнтованістю, обмеженнями на кількість зв'язків і додатковими даними про вершини або ребра.

Побудову графу в роботі виконано в програмному середовищі Gephi на основі алгоритму зниження розмірності, а саме за допомогою методики UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection) [19].

Цей алгоритм побудовано на засадах ріманової геометрії і топологічної алгебри. UMAP зберігає найбільшу частину глобальної структури з чудовою продуктивністю під час його виконання [19]. До параметрів алгоритму належать: кількість сусідів, мінімальна відстань, метрика відстані, розмірність кінцевого простору.

Виклад основного матеріалу. Для побудови графу сформуємо бази даних досліджуваних параметрів системи вибору пилогазоочисного обладнання (ВПО) у вигляді матриць елементів.

Матриця забруднюючих речовин (ЗР). Матриця забруднюючих речовин сформована у вигляді дво-мірної матриці розміром $i \times j$ (рис. 2) (де i – кількість ЗР у матриці; j – кількість різних за фізико-хімічними характеристиками різновидів певної ЗР у матриці) і містить інформацію про певний перелік ЗР, включаючи їх можливі різновиди і фізико-хімічні параметри. Інформація формується з матеріалів даних інвентаризації, умов технологічних процесів та довідникових даних за певними ЗВ.

Кожна комірка x_{ij} двовірної матриці являє собою характеристику i -ої ЗР (порядковий номер у матриці по горизонталі) j -ого різновиду (порядковий номер у матриці по вертикалі) і включає такі параметри:

Z_{rij} – назва (код) i -ої ЗР j -варіації, на підставі даних матеріалів джерел викидів;

As_{ij} – агрегатний стан i -ої ЗР j -варіації (твердий – 0, рідкий, газоподібний – 1);

Ds_{ij} – дисперсність i -ої ЗР j -варіації, мкм (обмежує використання апаратів де частинки можуть «проскакувати», див. базу обладнання);

Sh_{ij} – щільність i -ої ЗР j -варіації, мг/см³;

Fm_{ij} – форма частинок i -ої ЗР j -варіації (ізометрична частинка – 3, пластинка – 2, волокно – 1);

Kn_{ij} – клас небезпечності i -ої ЗР j -варіації (I – IV);

Vh_{ij} – вплив на організм людини i -ої ЗР j -варіації (респіраторний / фіброгенна дія – 2, подразнення / пошкодження шкіри – 3, дуже отруйна / канцероген – 1);

Ch_{ij} – хімічний склад i -ої ЗР j -варіації;

Gk_{ij} – гранично-допустима концентрація i -ої ЗР j -варіації, мг/м³;

Zp_{ij} – злипливість часток i -ої ЗР j -варіації через розривну міцність шару частинок, Па (ознаку вказали у базі обладнання);

Gp_{ij} – горючість часток i -ої ЗР j -варіації (горючі – 1, негорючі – 0); може бути обмеженням для використання обладнання яке містить горючий матеріал;

Zm_{ij} – змочуваність часток i -ої ЗР j -варіації, °;

Rv_{ij} – розчинність у воді i -ої ЗР j -варіації (розчинна – 2, слабозчинна – 1, нерозчинна – 0 (може бути використане обладнання як для сухого так і мокрого очищення);

Sa_{ij} – здатність до поглинання i -ої ЗР j -варіації (сорбція) компонентів середовища (так – 1, ні – 0);

Cr_{ij} – здатність i -ої ЗР j -варіації вступати у хімічну реакцію (так – 1, ні – 0).

Для узагальнення інформації щодо матриці забруднюючих речовин наведемо базу даних для певних забруднюючих речовин підприємств теплоенергетики та хімічної промисловості (табл. 1).

Матриця параметрів середовища. За аналогією сформуємо матрицю параметрів середовища (умов перебігу процесу) під час надходження викидів i -ої ЗР j -варіації у навколишнє середовище від джерела утворення, яка враховує такі параметри:

$Pser_{ij}$ – параметр середовища (умови перебігу процесу), який характеризує умови під час викиду ЗР в певному випадку;

Uv_{ol} – умова за вологовмістом викиду ЗР (1 – вологий (ЗР викидаються із значним супутнім вологовмістом викиду (можуть летіти мокрі включення), 0 – сухий (може розглядатися для газоподібних і твердих ЗР, викид яких не містить вологу));

Upa_i – умова максимального обсягу викидів, м³/год (максимально можливий об'єм, який потрібно буде очищувати - обмежує вибір апарата);

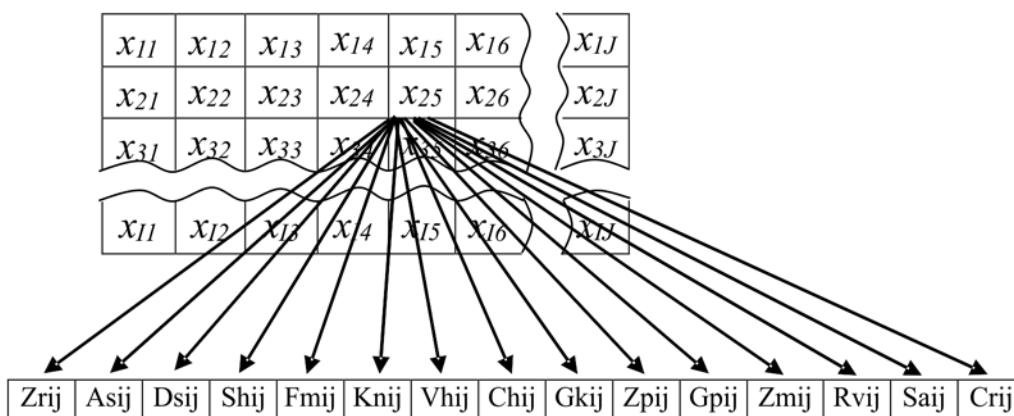


Рис. 2. Матриця об'єктів підмножини ЗР

Таблиця 1

Зразок матриці забруднюючих речовин

Zrij	As _{ij}	Ds _{ij}	Sh _{ij}	Fm _{ij}	Kn _{ij}	Vh _{ij}	Ch _{ij}	Gk _{ij}	Zp _{ij}	Gp _{ij}	Zm _{ij}	Rv _{ij}	Sa _{ij}	Cr _{ij}
Аерозоль двоокису титану	0	0,26	2920	3	4	2	TiO ₂	10	780	0	36	0	0	0
Пил ільменіту	0	7,20	3600	3	4	2	FeTiO ₃	10	320	0	72	0	0	0
Сірки діоксид	1	-	2,619	-	3	2	SO ₂	10	-	0	-	2	1	1
Азоту діоксид	1	-	2,052	-	3	2, 3	NO ₂	2	-	0	-	2	1	1
Сірчана кислота	1	-	1836	-	2	1, 2, 3	H ₂ SO ₄	1	-	0	-	2	1	1
Двоокис вуглецю	1	-	1,839	-	4	2	CO ₂	3	-	0	-	2	1	1

Utemi – умова максимального значення температури викиду ЗР, °С (температура викиду, який потрібно буде очищувати, обмежує вибір апарату);

Uidi – умова наявності інших домішок окрім певної ЗР у викиді (1 – так (може ускладнювати процес очистки речовин, які вступають у хімічну реакцію, потребує «як варіант» більш комплексних апаратів для очистки), 0 – ні (може бути використано обладнання для очистки однокомпонентної домішки ЗР).

Узагальнення матриці параметрів середовища наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Матриця параметрів середовища

Pserij	Uvoli	Unaij	Utemi	Uidi
1 варіант	0	3000	100	0
2 варіант	0	30000	250	0
3 варіант	1	300000	400	1
n варіант	0 або 1	0 або 1

Матриця пилогазоочисного обладнання. Завершальним блоком дослідження є формування матриці пилогазоочисного обладнання, яке може бути використане для очищення від ЗР (наявного на об'єкті дослідження або потенційно можливого для використання) і враховує такі параметри:

Gouij – назва очисного обладнання;

Tsmij – сухий чи мокрий тип очищення газу (1 – мокре (підійде для усіх агрегатних станів ЗР, важливо для розчинних у воді ЗР але також підійде для вловлення твердих часток); 0 – сухе (підійде лише для твердого агрегатного стану ЗР));

Gnaij – максимальне навантаження по газовій фазі, м³/год;

Gpaij – гідравлічний опір апарату, Па;

Kmniij – концентрація ЗР на вході (максимальна), г/м³;

Kmkij – концентрація ЗР на виході (максимальна), мг/м³;

Efrij – ефективність вловлення за фракційним складом часток (мінімальний розмір), мкм (цей критерій більше характеризує тверді ЗР, які мають певний розмір і можуть бути вловлені в певному очисному апараті);

Tmaiij – верхня температурна межа роботи апарату, °С (може бути використано як температурне обмеження для різних умов середовища);

Vgaiij – максимальна швидкість газу в перетині апарату, м/с;

Lnrij – витрата рідини, м³/год;

Ezrij – можливість роботи із злипливими частинками ЗР (1 – так (може вловлювати злипливі тверді частинки; 0 - взагалі не може ефективно працювати зі злипливими частинками).

Узагальнення матриці пилогазоочисного обладнання наведено в табл. 3.

Теоретичні основи обґрунтування вибору очисного обладнання. Вибір лінійної структури системи очищення викидів забруднюючих речовин однозначно задається у символній формі:

$$Zrij; Pserij; Gouij, \quad (1)$$

де Zrij – вибір ЗР; Pserij – вибір умов перебігу процесу; Gouij – вибір пилогазоочисного обладнання.

Вибір ЗР визначається з матриці забруднюючих речовин з урахуванням вихідних умов певного технологічного об'єкту. Вибір умов перебігу процесу визначається на підставі матриці параметрів середовища, яка формується на основі вихідних даних технологічного процесу або інших прогнозованих параметрів.

Наступний крок в утворенні структури – це підбір пилогазоочисного апарату, який буде відповідати умовам проведення процесу очищення викидів певних ЗР, з оптимальними показниками відповідності (матриця пилогазоочисного обладнання).

Таблиця 3

Матриця пилогазоочисного обладнання

Gouij	Tsmij	Gnaij	Gpaij	Kmniij	Kmkij	Efrij	Tmaiij	Vgaiij	Lnrij	Ezrij
Електрофільтр типу ЕГУ (ЕГУ 1-7/400-4-4/2.56-2-11.2)	0	36200	200	90	50	0,1	330	1	-	1
Електрофільтр типу ЕГУ (ЕГУ 80/400-18-6/3.84-3-576)	0	1969900	200	90	50	0,1	330	1	-	1
Електрофільтр КХП ЕСТ-11,4-4-Ш	0	40500	200	6	20	0,1	330	1	-	1
Рукавний фільтр ФРІР-25	0	2400	2000	10	20	0,3	135	0,55	-	0
Рукавний фільтр ФРІР-1200	0	110000	2000	10	20	0,3	135	0,55	-	0
Двоступінчастий фільтр тонкого очищення СРФ5КР*6 (6 секцій)	0	30000	2500	120	1	1	240	0,15	-	0
Батарейний циклон БЦ-512 (односекційний)	0	6500	1300	75	10000	10	400	4	-	1
Мокрий скруббер Вентурі СВ 150/90-800	1	7000	1200	30	500	1	400	5	7	1
Апарат з КДПТ (d ₀ =0,06 м)	1	40000	1200	20	50	0,3	400	3,5	10	1

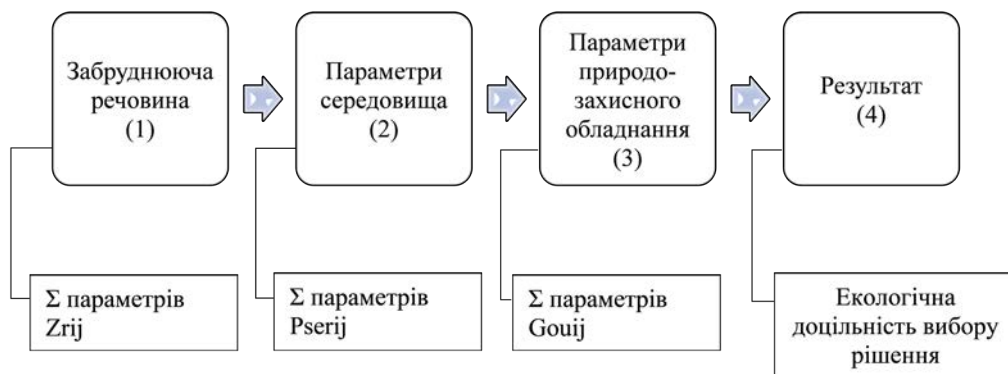


Рис. 3. Морфологічна схема процесу підбору пірогазоочисного обладнання для уловлення забруднюючих речовин

Такі взаємозв'язки доцільно представити у вигляді морфологічного графа (рис. 3), який дозволяє відобразити одночасне перетворення. Для цього необхідні чіткі умови, що однозначно описують можливість наслідування структурних елементів та варіантних особливостей у сукупності предметного переліку.

Сукупність параметрів (елементів) груп Z_{rij} , P_{serij} , G_{ouij} формується на підставі матриць (табл. 1–3).

З огляду на кількість елементів в кожній групі, можна очікувати значної кількості комбінацій ключових характеристик і варіантів вибору пірогазоочисного обладнання. В якості попереднього кроку нам необхідно визначити основні правила, за якими об'єкти можуть бути згруповані разом. Ми будемо використовувати закони математичної логіки для викладу загальних підходів до формування теорії вибору пірогазоочисного обладнання, будуючи висловлювання за допомогою логічних відносин. У цьому разі доцільність вибору певного апарату складається з елементів графа морфологічних ознак, а в формалізованій формі кожен тип системи ВПО буде являти собою складне висловлювання, яке складається з простих елементів за допомогою дій, які можуть бути змістовно виражені як «і» (з'єднання), відоме як кон'юнкція; «або» (заміна), відоме як диз'юнкція.

Далі аналізуються параметри ЗР та умови середовища на відповідність певному варіанту пірогазоочисного обладнання. На мові математичної логіки це означає, що необхідно врахувати одночасно значення цих трьох складників. Для цього скористаємося логічною операцією «і» (як показано на зразку далі

$$\left[\begin{array}{l} ((Zr_{0i} \wedge Ps_{0j}) \wedge Gou_{mn}^k) \vee ((Zr_{0i} \wedge Ps_{0j}) \wedge Gou_{(m+1)(n+1)}^{k+1}) \vee \dots \\ (((Zr_{0(i+1)} \wedge Ps_{0(j+2)}) \wedge Gou_{(m+2)(n+2)}^{k+2}) \wedge N_{extr} \wedge \Pi_{extr}) \vee \\ \dots \\ (Zr_{0i} \wedge Ps_{0j} \wedge Gou_{mn}^k \wedge N_{extr} \wedge \Pi_{extr}) \end{array} \right], \quad (2)$$

де $i, j, k, l, m, n, p = 1, 2, 3, \dots$; – обсяг викидів; – максимальне навантаження по газовій фазі.

Наприклад, для очистки викидів аерозолів двоокису титану обсягом $30000 \text{ м}^3/\text{год}$ за умов не перевищення температури середовища вище 400°C ми використовуємо апарат з КДПТ (0,06 м) (який також підійде з урахуванням обмеженням по дисперсності частинок ЗР):

$$\left[(((Zr_{01} \wedge Ps_{02}) \wedge Gou_0^0) \wedge N_{30000} \wedge \Pi_{40000}) \right]. \quad (3)$$

Таким чином, за допомогою алгебри висловлень сформульовано поступовість і наслідування роботи алгоритмічної програми розрахунку оптимального ВПО на підставі параметрів ЗР та умов середовища проведення процесу очищення.

Наведений математичний запис обґрунтування ВПО представляє поступові перетворення між його складниками. Такі взаємозв'язки доцільно представити у вигляді графа, який дозволяє відобразити одночасне перетворення однієї складової частини в декілька інших за допомогою відповідної кількості ребер графа, які виходять із однієї вершини. Порядок відображення вершин графа повинен бути однозначним, щоб забезпечувати послідовність зміни як константних, так і варіантних елементів.

Результат застосування програми представлено на такому графі (рис. 4).

Візуалізації графа вказують на вибір більш оптимального технологічного обладнання для очищення певних ЗР з урахуванням умов параметрів середовища, де повинен відбуватися цей процес.

Головні висновки. У роботі проведено аналіз баз даних параметрів забруднюючих речовин, умов проведення процесу очищення викидів та параметрів пірогазоочисного обладнання. За допомогою графів отримано швидке алгоритмічне пояснення орієнтованого оптимального вибору певних типів очисного обладнання. На підставі аналізу і візуалізації ієрархічної будови схеми вибору пірогазоочисного обладнання можна зробити висновок про зручну оцінку ефективності проведення процесу очищення.

15. Plyatsuk L., Hurets L., Kozii I., Vaskin R. Industrial research studies of gas treatment device with a large hole sieve trays. *Науковий вісник НГУ*. 2016. Вип. №3, С. 95–100.
16. Kerry F.G. Industrial gas handbook: Gas separation and purification. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007. 550 p.
17. Lieberman N.P., Lieberman E.T. A working guide to process equipment. NY, NY: McGraw-Hill, 2014. 751 p.
18. Bacciu D., Bruno A. Deep tree transductions - a short survey. *In Recent Advances in Big Data and Deep Learning*. 2020. P. 236–245.
19. Wu D., Yeong J., Tan G., Chevrier M., Loh J., Lim T., Chen J. Comparison Between UMAP and t-SNE for Multiplex-Immunofluorescence Derived Single-Cell Data from Tissue Sections. *bioRxiv*. 2019. 20 p.