

4. Крайнов С.Р. Современные проблемы изучения и моделирования миграции подземных вод и массопереноса, геохимические принципы / С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 1995. – №3. – С. 12-22.
5. Zaradny H. Matematyczne metody opisu i rozwiazan przeplywu wody w nienasyconych i nasyconych gruntach i glebach / H. Zaradny // Prace Instytutu Budownictwa Wodnego PAN. – 1990. – № 23. – 367 s.

Мета роботи – оцінити технології очистки газів та прийняти рішення щодо вибору оптимальних технологій, шляхом використання нечіткої логіки. Для групування ознак технологій очистки газів була розроблена тріступінчатая ієрархічна модель

Ключові слова: очистка газу, метод попарних порівнянь, ієрархічна модель, метод аналізу ієрархій, лінгвістичні змінні, теорія нечітких множин

Цель работы - оценить технологии очистки газов и принять решение относительно выбора оптимальных технологий, путем использования нечеткой логики. Для группирования признаков технологий очистки газов была разработана трехступенчатая иерархическая модель

Ключевые слова: очистка газа, метод парных сравнений, иерархическая модель, метод анализа иерархий лингвистические переменные, теория нечетких множеств

The work purpose - to estimate technologies cleaning of gases and to make the decision concerning a choice of optimum technologies using of fuzzy logic. The three-stage hierarchical model has been developed for grouping of signs of technologies of cleaning of gases

Keywords: gas cleaning, hierarchical model, grouping, ranging, method of analysis hierarchies, linguistic variables, theory of unclear plurals

УДК 66.074.48:621.928.9

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ЗНЕШКОДЖЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Р.Ю. Демидовський*

Контактний тел.: 093-481-03-63

E-mail: Demidovskiy@bigmir.n

Ю.О. Безносик

Кандидат технічних наук, доцент*

Контактний тел.: 050-357-61-39

E-mail: yu_beznosyk@ukr.net

Г.О. Статюха

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри*

Контактний тел.: (044) 406-82-12

E-mail: gen.statyukha@mail.ru

*Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут»
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Сталий розвиток та захист навколишнього середовища потребують зелених процесів та продуктів, керування викидами забруднювачів в природне середовище. Для реалізації чистих процесів та зелених продуктів необхідно обробити велику кількість даних пов'язаних з навколишнім середовищем, економікою та екологією. Обробка даних пов'язана з різноманітними неточностями та припущеннями, тому для прийняття

рішення необхідно використовувати різноманітні техніки та методології.

Здійснюється прийняття рішення щодо використання в хімічному виробництві певної технології очистки газів - вибір за рядом критеріїв з групи очисних методів найбільш оптимального набору методів очистки газу, та вироблення очисної стратегії. В якості методології прийняття рішення використовується методологія GreenPro [1,2]. Алгоритм GreenPro використовується для оцінювання технологій очистки

газових викидів та вироблення комплексу стратегій з очистки знешкодження газових викидів.

Методологія GreenPro достатньо гнучка, може бути застосована для будь-якої стадії хімічного виробництва, може використовуватися для оцінки екологічного забруднення продуктом навколишнього середовища, для оцінювання можливості вдосконалення процесу. В роботі алгоритм методології використовувався для оцінки технологій очистки газів. Для формування стратегії очистки використовується вагова схема, що дозволяє об'єднати різні методи очистки таким чином, щоб було сформовано найбільш оптимальне рішення очистки. Методологія оцінки технологій очистки газів включає теорію нечітких множин, яка дозволяє використовувати якісні експертні дані. Для оцінки ваг ознак технологій в ієрархічній структурі використовується метод аналізу ієрархій. Методологія оцінки технологій очистки газів є трьох стадійною, в якій результати отримані на попередній стадії, використовуються на наступній стадії розрахунку.

2. Методи оцінювання альтернативних рішень

Існує багато підходів для прийняття рішень при наявності декількох критеріїв оцінювання. Автори робіт [1-3] запропонували методологію під назвою GreenPro (GreenPro-1) для формулювання проблем виробництва, використовуючи аналіз життєвого циклу всього виробництва, прийняття рішень на підставі декількох критеріїв оцінювання та проведенням багатоцільової оптимізації. У даній роботі алгоритм методології GreenPro-1 був дещо змінений, шляхом використання різних методів ранжирування даних, які збільшують надійність і вірогідність прийняття правильного рішення.

GreenPro-1 складається з двох основних модулів: 1) аналіз життєвого циклу хімічного виробництва; 2) прийняття рішень в умовах існування декількох критеріїв оцінювання [3]. Ці два модулі далі розгалужуються на численні під кроки.

Традиційна форма запису проблеми прийняття рішення при наявності декількох критеріїв оцінювання може бути представлена у формі матриці [3-5]:

$$\begin{matrix} & X_1 & X_2 & \dots & X_n \\ \left. \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \end{matrix} \right\} & \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

де $A_i = 1, 2, \dots, m$ – альтернативні курси дії (методи очистки газу для ХТС); $X_i = 1, 2, \dots, n$, ознаки, якими вимірюються альтернативи (економічні, технологічні), X_{mn} – оцінка альтернативи (A_i) щодо ознаки або критерію X_i .

Часто X_{mn} не може бути точно визначене через неможливість його виразити в кількісній формі, неповній або недоступній інформації. Суб'єктивна ситуація також може виникнути через незнання фактичних умов протікання певного процесу. Інформація, що виражається не в кількісній формі, відноситься до суб'єктивних понять (вираження типу «добре», «пога-

но», «високо» й «низько»). Використання наближених даних, даних що виражені не в кількісній формі пояснюється тим, що вони можуть бути отримані з меншими зусиллями і витратою часу, ніж обробка точних даних. Часто через відсутність інформації або ресурсів можуть бути корисні лінгвістичні змінні. Типові лінгвістичні змінні зображені в табл. 1.

Таблиця 1

Лінгвістичні одиниці виміру (лінгвістичні змінні)

TFN - трикутне нечітке число

Значима інтенсивність, I_{mj}	Значення змінної (TFN)*
Дуже погано (VL)	0.00 0.05 0.10
Погано (L)	0.10 0.18 0.25
Краще, ніж погано (ML)	0.25 0.33 0.40
Непогано (M)	0.40 0.50 0.60
Досить непогано (MH)	0.60 0.68 0.75
Добре (H)	0.75 0.83 0.90
Дуже добре (VH)	0.90 0.95 1.00

Нечіткість при прийнятті рішення за наявності декількох критеріїв оцінювання включає в себе два основних кроки: об'єднання (групування) й ранжирування. Об'єднання визначає кінцеве корисне значення для кожної альтернативи шляхом групування різних індивідуальних ознак (критеріїв). У чіткій логіці при прийнятті рішення кінцева множина дій - це дійсні числа, у такий спосіб ранжирування очевидно. В нечіткій логіці при прийнятті рішення за наявності декількох критеріїв оцінювання, ранжирування містить у собі впорядкування всіх альтернативних рішень так як результат одержання нечіткого кінцевого значення також буде нечітким.

Для прийняття рішення за наявності декількох критеріїв оцінювання необхідна інформація про відносну важливість критеріїв, включених в процес оцінювання. У випадку n критеріїв, ряд навантажень на середовище може бути записаний як [3]

$$W^T = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_j, \dots, \omega_n), \quad \sum_{j=1}^m \omega_j = 1 \quad (1)$$

Чим вище значимість ознаки, тим вище очікуване навантаження (вага). Кожна значимість ω_j (вага) ознаки у групі розраховується по наступній формулі [6]:

$$\omega_j = \frac{I_{mj}}{\sum_{j=1}^m I_{mj}} \quad (2)$$

де I_{mj} - фактор значимості, що може бути обраний з табл. 1 для кожної ознаки в даній групі.

Групування ознак

Композиційне нечітке програмування - це поступова процедура групування основних ознак оцінювання, для формування узагальнених ознак. Економічні витрати від впровадження методу очистки газу та ступінь очистки газів визначені як основні ознаки. Перший крок в композиційному нечіткому програмуванні - нормалізація основних ознак, щоб перетворити їх в безрозмірні. Це необхідно, так як всі базові ознаки мають різні одиниці виміру й буде важко здійснити їх

порівняння. Групування різних ознак проводиться послідовно до одержання кінцевого індексу системи. Всі методи очистки газів в залежності від своєї природи також можуть бути розділені на групи: за технологічними ознаками (рис. 1). Групування різних ознак проводиться послідовно до отримання кінцевого індексу системи. Такий аналіз для різних альтернатив може бути зроблено на різних ієрархічних рівнях. Таким чином формуємо ієрархічну групу структуру з декількома рівнями. Групування проводиться на різних ієрархічних рівнях. Значення індексу системи на рівні три являє собою значення згрупованих індексів на другому рівні (рис. 1).

Як видно з рис. 1 кінцева оцінка технологій очистки газових викидів включає два головних елементи – технології грубої очистки (X_1) та технології детальної очистки газових викидів (X_2) на другому рівні. Кожен елемент другого рівня поділяється далі на два елементи першого рівня, наприклад технології грубої очистки розподілені на фізичні технології (X_{11}) та фізико-хімічні технології (X_{12}), і аналогічно технології детальної очистки розділені на технології тонкої очистки (X_{21}) і технології селективності (X_{22}). Елементи першого рівня далі розділені на основні елементи оцінювання, наприклад фізичні технології очистки газових викидів розділені на пилоочисні камери X_{111} , термічну обробку X_{112} та абсорбцію водою X_{113} .

Фізико-хімічні технології на першому рівні розподілені на циклон X_{121} абсорбцію лугами X_{122} , батарейні циклони X_{123} та каталітичне відновлення X_{124} . Технології тонкої очистки на першому рівні розподілені на хемосорбцію карбамідом X_{211} , адсорбцію вугіллям X_{212} та плазмакаталітичну очистку X_{213} . Технології селективної очистки розподілені на гідро циклон X_{221} , адсорбцію цеолітами X_{222} та селективну газоочистку X_{223} .

Ранжирування ознак

Ранжирування ознак дозволяє отримати кінцеву оцінку (ранг) альтернатив (методу очистки газу),

визначає як добре альтернатива відповідає корисному прийнятому рішення. Альтернатива з найвищою оцінкою (рейтингом) буде найкращою. Якщо кінцеве ранжирування - це дійсні числа, то процес ранжирування проводиться дуже просто.

Але ранг (оцінка) $X_{i,j}$ - може бути нечітким, ясным, і/або лінгвістичним. Коли використовуються нечіткі дані в прийнятті рішення при умові існування декількох критеріїв оцінювання, кінцеві ранги будуть також нечіткими числами, які не можливо порівняти. Для прийняття рішення по нечітким даним використовуються різні методи ранжирування.

Методи ранжирування можна класифікували по змінним у чотири великі групи: чіткі змінні, нечіткі змінні, нечіткі кількісні оцінки й лінгвістичні змінні. Нечіткі кількісні оцінки є найбільш популярними. У даній роботі, використовуються два методи для ранжирування: простий метод ранжирування й зважений метод усереднення, що формують об'єднане правило ранжирування. Об'єднане правило ранжирування

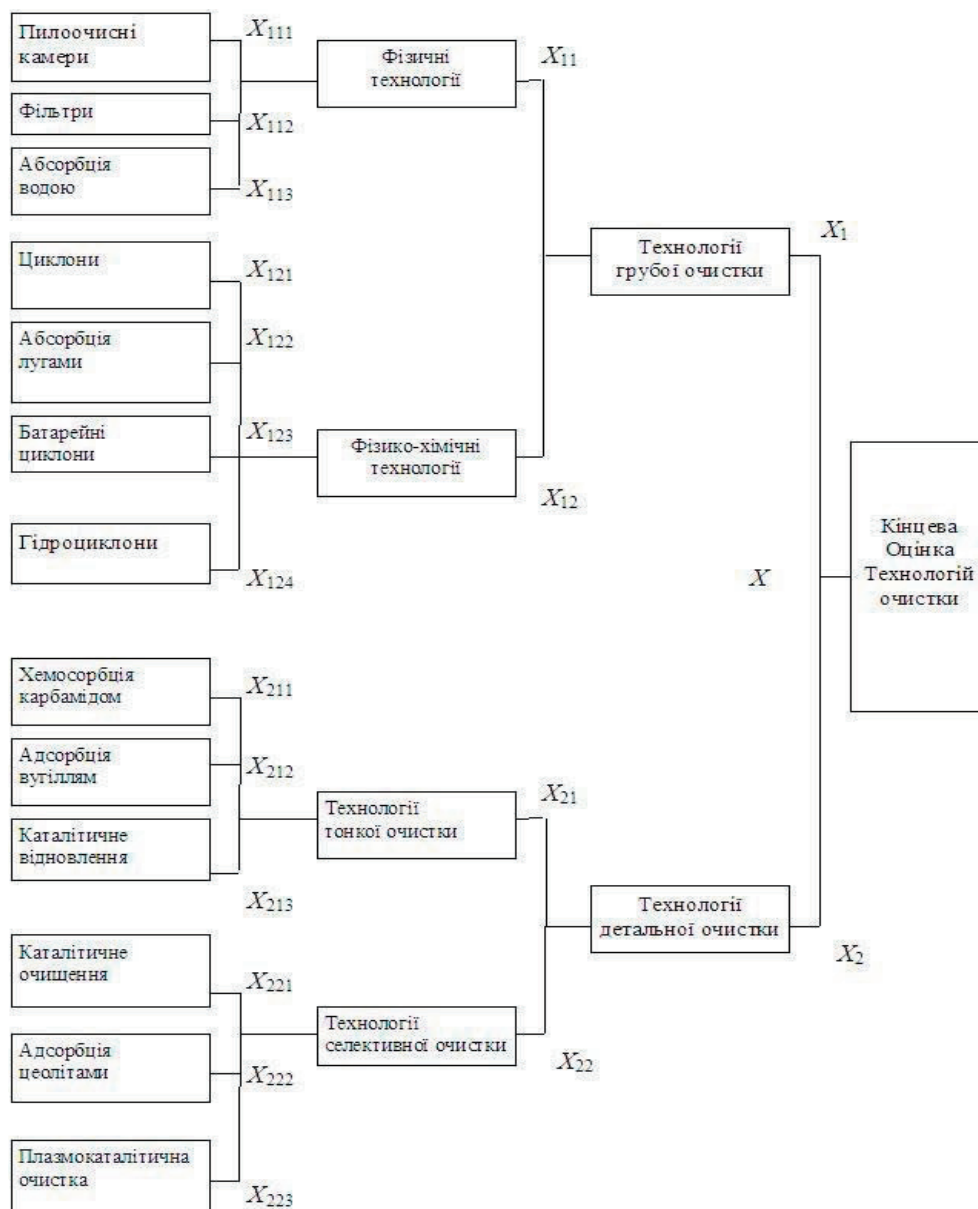


Рис. 1. Модель ієрархічної структури оцінки технологій газових викидів

розраховується як середнє ранжирування альтернатив, що є середнім арифметичним від ранжирування всіх методів (перша стадія оцінки) [2]:

$$R_{A_i}^N = \text{rank} \left(\frac{\sum_{k=1}^N R_{A_i,k}}{N} \right), i \in m \quad (3)$$

де A_i – альтернативне рішення.

На другій стадії оцінюють число альтернатив r , які об'єднуються і характеризують стратегію очистки з урахуванням результатів першої стадії оцінки. Стратегія другої стадії може бути представлена в наступному вигляді:

$$S_r = W(1)A_1 + W(2)A_2 + \dots + W(r)A_r \quad (4)$$

де $W(1)$ и $W(2) = 0.50$, коли $r = 2$; $W(1)$, $W(2)$ і $W(3) = 0.33$, коли $r = 3$ і так далі.

3. Оцінка впливу забруднюючих викидів на навколишнє середовище

Аналіз впливу забруднюючих викидів на навколишнє середовище й аналіз ризиків дозволяє досліджувати навколишнє середовище й життя людей в залежності від використання ними ресурсів і здійснюваних викидів. Дослідження впливу забруднюючих речовин на навколишнє середовище здійснюється

протяжі трьох стадій: класифікації, характеристики та оцінки викидів.

Класифікація викидів: група, категорія в залежності від матеріальної бази й категорії гомогенного впливу. В розряд потенційно небезпечних речовин можуть також включатися складні речовини й ланцюгові впливи, тому що в багатьох речовин є багаторазові впливи, і первинні впливи можуть привести до вторинного (більшого) впливу на навколишнє середовище.

Характеристика викидів: впливи викидів на навколишнє середовище потрібно певним чином характеризувати. Отже, кожен категорію впливу на навколишнє середовище приводимо в єдину систему виміру для єдиного опису впливів викидів.

Оцінка викидів: дозволяє встановити значимі значення різних впливів викидів на навколишнє середовище.

Оцінка впливів викидів дозволяє сформувати ієрархічну структуру впливів в залежності від їх величини, встановити взаємозв'язки між впливами, підготувати структуру для формулювання дерева рішення. Значимість впливів викидів оцінюється ґрунтуючись на рішеннях групи експертів, які повинні прийти до єдиної думки щодо впливу викиду.

Ключові технології очистки газів, що були оцінені в даній роботі представлені в табл. 2. Вибрані найбільш використовуванні технології очистки газів (SO_2 , CO_2 , NO_2 , пилю), далі проводимо їх оцінку та приймаємо рішення щодо найбільш оптимальних.

Таблиця 2

Технології очистки газів – перша стадія оцінки

Назва технології	Альтернатива	Ранжир R	Ефективно при використанні:				
			Пил крупний	Пил мілкий	NO ₂	SO ₂	CO ₂
Фізичні методи очистки							
Пилоочисні камери	A ₁	0.658	Так	Ні	Ні	Ні	Ні
Фільтри	A ₂	0.651	Так	Ні	Ні	Ні	Ні
Абсорбція водою	A ₃	0.644	Так	Ні	Ні	Небагато	Небагато
Фізико-хімічні методи очистки							
Циклон	A ₄	0.678	Так	Небагато	Ні	Ні	Ні
Абсорбція лужними розчинами	A ₅	0.651	Так	Небагато	Небагато	Небагато	Небагато
Батарейні циклони	A ₆	0.688	Так	Небагато	Ні	Ні	Ні
Методи тонкого очищення							
Хемосорбція розчинами карбаміду	A ₇	0.699	Так	Так	Так	Так	Небагато
Адсорбція вугіллям	A ₈	0.674	Так	Так	Небагато	Небагато	Небагато
Каталітичне відновлення	A ₉	0.664	Ні	Ні	Так	Так	Небагато
Гідроциклон	A ₁₀	0.696	Так	Так	Так	Так	Так
Плазмо-каталітична очистка	A ₁₁	0.705	Ні	Ні	Небагато	Небагато	Небагато
Каталітична очистка	A ₁₂	0.711	Ні	Ні	Так	Так	Небагато
Адсорбція цеолитами	A ₁₃	0.737	Так	Так	Так	Так	Небагато
Селективна газоочистка	A ₁₄	0.454	Так	Так	Так	Так	Небагато

Надалі, поєднавши найбільш оптимальні технології очистки газових викидів, можна сформуванати стратегію очистки S_r для більш комплексної очистки газів.

При оцінці технологій очистки газових викидів необхідно враховувати ознаки якими ці технології характеризуються. При цьому точно визначити ймовірність і величину окремих ознак іноді неможливо, або ж у край важко. Відкидання окремих ознак з метою спрощення розрахунку може призвести до неточних результатів. Тому необхідна методика для оцінки технологій очистки газових викидів, яка гарантує проведення оцінки без внесення спрощень в структуру, і яка дозволяє здійснювати розрахунок на підставі думок експертів при відсутності статистичних даних. В якості такої методики може служити метод оцінювання технологій очистки з використанням методу аналізу ієрархій (МАІ) і теорії нечітких множин [5-7]. Дана методологія дозволяє побудувати структуру оцінювання у виді ієрархій і при цьому не вдаватися до спрощення – ієрархічна структура може бути складною і дуже точно моделювати реальну ситуацію. Теорія нечітких множин дозволяє використовувати якісні думки експертів при оцінці.

Група експертів може визначити ступінь очистки газових викидів та капітальні затрати пов'язані з впровадженням технології для кожної технології очистки. В цій роботі для розробки якісної шкали в межах від 1 - 11 і для ступеня, і для капітальних затрат, використовувалося рішення експертів (табл. 3). За цією якісною шкалою оцінювання може бути проведено з моделі ієрархічної структури, яка показана на рис. 1.

Таблиця 3

Лінгвістична класифікація ступеня очистки газів та капітальних затрат від впровадження технологій та відповідні трикутні нечіткі числа (TFN)

Рівень ранжирування (l)	Якісне позначення для ступеня очистки (r)	Якісне позначення для значимості очистки (i)	Трикутні нечіткі числа (TFN)
1	Абсолютно низький	Абсолютно незначимий	(0.0, 0.0, 0.1)
2	Критично низький	Критично незначимий	(0.0, 0.1, 0.2)
3	Дуже низький	Дуже незначимий	(0.1, 0.2, 0.3)
4	Низький	Незначимий	(0.2, 0.3, 0.4)
5	Нижче нормального	Нижче нормального	(0.3, 0.4, 0.5)
6	Нормальний	Нормальний	(0.4, 0.5, 0.6)
7	Вище нормального	Вище нормального	(0.5, 0.6, 0.7)
8	Високий	Значимий	(0.6, 0.7, 0.8)
9	Дуже високий	Дуже значимий	(0.7, 0.8, 0.9)
10	Критично високий	Критично значимий	(0.8, 0.9, 1.0)
11	Абсолютно високий	Абсолютно значимий	(0.9, 1.0, 1.0)

Кожен якісний масштаб $N = 1, 2, \dots, 11$ (і для ступеня очистки, і для значимості очистки) описує невизначеності та нечіткості в лінгвістичному тлумаченні, і

виражений трикутним нечітким числом (TFN). Для оцінки технології очистки газових викидів необхідно знайти добуток цих двох факторів:

$$R = r * I \tag{5}$$

Добуток двох TFN – є також нечітке число. Для дефазікації отриманого значення R в роботі використовується методом центроїди [3,7]:

$$g(r,i) = \frac{\int_a^b x \mu_{Nr \otimes Ni}(x) dx}{\int_a^b \mu_{Nr \otimes Ni}(x) dx} \tag{6}$$

де μ - функція належності для нечіткого числа.

4. Ієрархічна структура оцінки технологій очистки газових викидів

Запропонована методологія представляє покрокову процедуру, що використовує поняття нечітких множин та ієрархічний аналіз, щоб оцінити технології очистки на різних рівнях [2,3,7]. Аналогічним чином відбувається оцінка стратегій очистки газових викидів, після їх формування на основі технологій очистки.

Таблиця 4

Триступінчатая структурна модель для оцінювання технологій очистки газових викидів

Другий рівень елементів	Перший рівень елементів	Елементи оцінювання	W3(k)	W2(k,j)	W1(k,j,i)	r	i	g(r,i)
X ₁			W3(1)					
	X ₁₁			W2(1,1)				
		X ₁₁₁			W1(1,1,1)	r ₁₁₁	i ₁₁₁	g(r ₁₁₁ ,i ₁₁₁)
		X ₁₁₂			W1(1,1,2)	r ₁₁₂	i ₁₁₂	g(r ₁₁₂ ,i ₁₁₂)
		X ₁₁₃			W1(1,1,3)	r ₁₁₃	i ₁₁₃	g(r ₁₁₃ ,i ₁₁₃)
	X ₁₂			W2(1,2)				
		X ₁₂₁			W1(1,2,1)	r ₁₂₁	i ₁₂₁	g(r ₁₂₁ ,i ₁₂₁)
		X ₁₂₂			W1(1,2,2)	r ₁₂₂	i ₁₂₂	g(r ₁₂₂ ,i ₁₂₂)
		X ₁₂₃			W1(1,2,3)	r ₁₂₃	i ₁₂₃	g(r ₁₂₃ ,i ₁₂₃)
		X ₁₂₄			W1(1,2,4)	r ₁₂₄	i ₁₂₄	g(r ₁₂₄ ,i ₁₂₄)
X ₂			W3(2)					
	X ₂₁			W2(2,1)				
		X ₂₁₁			W1(2,1,1)	r ₂₁₁	i ₂₁₁	g(r ₂₁₁ ,i ₂₁₁)
		X ₂₁₂			W1(2,1,2)	r ₂₁₂	i ₂₁₂	g(r ₂₁₂ ,i ₂₁₂)
		X ₂₁₃			W1(2,1,3)	r ₂₁₃	i ₂₁₃	g(r ₂₁₃ ,i ₂₁₃)
	X ₂₂			W2(2,2)				
		X ₂₂₁			W1(2,2,1)	r ₂₂₁	i ₂₂₁	g(r ₂₂₁ ,i ₂₂₁)
		X ₂₂₂			W1(2,2,2)	r ₂₂₂	i ₂₂₂	g(r ₂₂₂ ,i ₂₂₂)
		X ₂₂₃			W1(2,2,3)	r ₂₂₃	i ₂₂₃	g(r ₂₂₃ ,i ₂₂₃)

Нехай $n(k)$ - кількість елементів оцінювання на другому рівні для елемента $X_k, k=1,2$. Для випадку, що розглядається, $n(1) = 2$ і $n(2) = 2$. Ваги $W_3(1)$ і $W_3(2)$

можуть бути призначені для елементів другого рівня X_1 і X_2 . Ці ваги обчислюються з використанням МАІ [6]. Для кожного елемента другого рівня (X_1 і X_2), X_{kj} ($j = 1, 2$), ($k = 1, 2$), і $W_2(k,j)$ - ваги елемента на першому рівні. Так само для кожного елемента оцінювання X_{kji} ($i = 1, 2, \dots, n(k,j)$) ($j = 1, 2$) і ($k = 1, 2$) можуть використовуватися ваги, що можуть бути визначені, використовуючи МАІ. Ієрархічна структура для даного прикладу наведена в табл. 4. Табл. 5 містить ваги, оцінені для різних елементів структурної ієрархічної моделі методом аналізу ієрархій [7, 8].

$$L_1 = (0,0,1/6)$$

$$L_n = ((n-2)/6, (n-1)/6, n/6)$$

$$L_7 = (5/6, 1, 1)$$

$$\mu_{L_1}(x) = \begin{cases} 1-6x, & 0 \leq x < \frac{1}{6}, \\ 0, & 0.1 \leq x \leq 1, \end{cases}$$

$$\mu_{L_n}(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x < \frac{n-2}{6}, \\ 6x - (n-2), & \frac{n-2}{6} \leq x < \frac{n-1}{6}, \\ n-6x, & \frac{n-1}{6} \leq x \leq \frac{n}{6}, \\ 0, & \frac{n}{6} \leq x \leq 1. \end{cases} \quad (7)$$

($n = 2, 3, 4, 5, 6$)

$$\mu_{L_7}(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq \frac{5}{6} \\ 6x - 5, & \frac{5}{6} \leq x \leq 1. \end{cases}$$

Таблиця 5

Ваги, які отримані методом аналізу ієрархій з векторів пріоритетів

Визначення	W3(k)	W2(k,j)	W1(k,j,i)	Значення
Технології грубої очистки	W3(1)			0.3333
Фізичні технології		W2(1,1)		0.4571
Пилеосідні камери			W1(1,1,1)	0.5357
Фільтри			W1(1,1,2)	0.3572
Абсорбція водою			W1(1,1,3)	0.1071
Фізико-хімічні технології		W2(1,2)		0.4000
Циклони			W1(1,2,1)	0.4546
Абсорбція лугами			W1(1,2,2)	0.3031
Батарейні циклони			W1(1,2,3)	0.1514
Гідроциклони			W1(1,2,4)	0.0909
Технології детальної очистки	W3(2)			0.4857
Технології тонкої очистки		W2(2,1)		0.2874
Хемосорбція карбамідом			W1(2,1,1)	0.4526
Адсорбція вугіллям			W1(2,1,2)	0.0791
Каталітичне відновлення			W1(2,1,3)	0.3683
Технології селективної очистки		W2(2,2)		0.0909
Каталітичне очищення			W1(2,2,1)	0.5870
Адсорбція цеолітами			W1(2,2,2)	0.6667
Плазмокаталітична очистка			W1(2,2,3)	0.3364

4. Оцінка технологій очистки газових викидів

Оцінка технологій очистки газових викидів була виконана з використанням треступінчастої процедури [2,3]. Оцінка ознак технологій є лінгвістичними змінними $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7$. Ці змінні були визначені як «критично низький», «дуже низький», «низький», «нормальний», «високий», «дуже високий» і «критично високий», відповідно. Ці лінгвістичні змінні були визначені потім визначені через TFN з наступними функціями приналежності [7]:

Центри мас (центроїди) вищезгаданих семи якісних шкал в висхідному порядку $L_G(1) = 0.058, L_G(2) = 0.157, L_G(3) = 0.335, L_G(4) = 0.518, L_G(5) = 0.668, L_G(6) = 0.837, L_G(7) = 0.958$, відповідно. Нехай $L_n - \{L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7\}$ - набір критеріїв, які ранжирують технології очистки газів по кожному елементу оцінювання (оцінка для групи технологій). Матриця нечіткої оцінки для елементів оцінювання першого рівня може бути встановлена для X_{11}, X_{12}, X_{21} та X_{21} індивідуально. Для $X_{kj} = X_{j1}$, технології очистки газу, які включаються в оцінювання - $X_{111}, X_{112}, X_{113}$ та оцінка ознак цих технологій ($g(r_{111}, i_{111}), g(r_{112}, i_{112}), g(r_{113}, i_{113})$) відповідно (табл. 4). Величина кожного $g(r_{kij}, i_{kij})$ використовувалася при розрахунку (7) для оцінки $L(r_{kij}, i_{kij}, n)$, де $n = 1, 2, \dots, 7$. Тоді матриця нечіткої оцінки можна сформувати таким чином:

$$F(X_{11}) = \begin{bmatrix} L(r_{111}, i_{111}, 1)L(r_{111}, i_{111}, 2) \dots L(r_{111}, i_{111}, 7) \\ L(r_{112}, i_{112}, 1)L(r_{112}, i_{112}, 2) \dots L(r_{112}, i_{112}, 7) \\ L(r_{113}, i_{113}, 1)L(r_{113}, i_{113}, 2) \dots L(r_{113}, i_{113}, 7) \end{bmatrix} \begin{matrix} X_{111} \\ X_{112} \\ X_{113} \end{matrix} \quad (8)$$

Аналогічно матриці нечіткої оцінки можна сформувати для всіх елементів ієрархічної структури. Тепер оцінка технологій очистки газових викидів для першої стадії оцінювання може бути отримана для елемента X_{11} в такий спосіб:

$$[S(1,1,1), \dots, S(1,1,7)]_{1 \times 7} = [W1(1,1,1), W1(1,1,2), w1(1,1,3)]_{1 \times 3} \times F(X_{11})_{3 \times 7} \quad (9)$$

де

$$S(1,1,n) = \sum_{i=1}^3 W1(1,1,i) \times L(r_{11i}, i_{11i}, n), \quad n = 1, 2, \dots, 7. \quad (10)$$

Тому, $S1(1,1) = [S(1,1,1), S(1,1,2), \dots, S(1,1,7)]$ може бути позначений, як вектор оцінювання першої стадії для елемента X_{11} .

Оцінка на другій стадії (для X_1) виконується наступним чином:

$$[S(1,1), S(1,2), \dots, S(1,7)]_{1 \times 7} = [W2(1,1), W2(1,2)]_{1 \times 2} \otimes \begin{bmatrix} S1(1,1) \\ S1(1,2) \end{bmatrix}_{2 \times 7}$$

де

$$S2(1) = [S(1,1), S(1,2), \dots, S(1,7)] \text{ и}$$

$$S2(1,n) = \sum_{j=1}^2 W2(1,j) \times S2(1,j,n) \text{ для } n = 1, 2, \dots, 7.$$

Подібно для X₂:

$$[S(2,1), S(2,2), \dots, S(2,7)]_{1 \times 7} =$$

$$= [W2(2,1), W2(2,2)]_{1 \times 2} \otimes \begin{bmatrix} S1(2,1) \\ S1(2,2) \end{bmatrix}_{2 \times 7},$$

де

$$S2(2) = [S(2,1), S(2,2), \dots, S(2,7)] \text{ и}$$

$$S2(2,n) = \sum_{j=1}^2 W2(2,j) \times S2(2,j,n) \text{ для } n = 1, 2, \dots, 7.$$

Оцінка на третій стадії для X наступна:

$$[S(1), S(2), \dots, S(7)]_{1 \times 7} = [W3(1), W3(2)]_{1 \times 2} \otimes \begin{bmatrix} S2(1) \\ S2(2) \end{bmatrix}_{2 \times 7}$$

де S3(n) = [S(1), S(2), ..., S(7)].

Кінцева оцінка технологій очистки газів може бути отримана, використовуючи дефазифікацію методом центроїди (5,6):

$$R = \sum_{n=1}^7 L_G(n) \times S3(n) \tag{11}$$

В результаті отримаємо кінцеву оцінку всіх технологій очистки газових викидів, представлену на рис. 2 та в табл. 2 - перша стадія оцінки.

Як видно з рисунку найбільш ефективною технологією очистки газових викидів є адсорбція цеолітами та каталітичне очищення.

Було проведено аналіз літературних джерел, внаслідок якого запропоновані для аналізу та оцінки наступні сім стратегій (S_i) очистки газових викидів, що є поєднанням технологій очистки газових викидів, які були оцінені на першій стадії (табл. 6).

Таблиця 6

Вибрані системи технологій очистки – друга стадія оцінки

Стратегії	Система технологій	Коментарі	Ранжування	
S ₁	Циклон + Адсорбція (хемосорбція) розчином карбаміду A4 + A7	Циклон Розмір часток 20 – 1000 мкм Хемосорбція розчином карбаміду	0.699	2
S ₂	Циклон + Каталітичне відновлення A4 + A9	Циклон Розмір часток 20 – 1000 мкм Каталітичне відновлення 2NO ₂ + CH ₄ → N ₂ + CO ₂ + 2H ₂ O 2NO ₂ + 4H ₂ → N ₂ + 4H ₂ O	0.664	5
S ₃	Циклон + Адсорбція цеолітами A4 + A13	Циклон Розмір часток 20 – 1000 мкм Адсорбція цеолітами	0.708	1
S ₅	Батарейні циклони + Гідроциклон A6 + A10	Батарейні циклони Розмір часток 5 – 1000 мкм Гідроциклон Розмір часток 20 – 100 мкм	0.697	3
S ₆	Циклон + Адсорбція водою + Адсорбція лугами A4 + A3 + A5	Циклон Розмір часток 20 – 1000 мкм Адсорбція водою 3NO ₂ + H ₂ O ↔ 2HNO ₃ + NO SO ₂ + H ₂ O ↔ H ⁺ + HSO ₃ CO ₂ + H ₂ O ↔ H ⁺ + HCO ₃ Адсорбція лугами 2NO ₂ + Na ₂ CO ₃ ↔ NaNO ₃ + CO ₂ SO ₂ + Na ₂ CO ₃ ↔ Na ₂ SO ₃ + CO ₂ CO ₂ + Na ₂ CO ₃ + H ₂ O ↔ 2NaHCO ₃	0.651	6
S ₇	Пилоочисні камери + Адсорбція вугіллям A1 + A8	Пилоочисні камери Розмір часток 50 – 1000 мкм Адсорбція вугіллям	0.666	4

Методи очистки газів	Середнє ранжування методів		Значимість середнього ранжування		Результат ранжування
	Ut1a	Порядок	Ut2a	Порядок	
Пилоочисна камера	0.6580	10	0.6310	9	8
Фільтри	0.6510	11	0.6210	11	10
Адсорбція водою	0.6440	13	0.6150	13	13
Циклон	0.6780	7	0.6450	7	6
Адсорбція лугами	0.6510	12	0.6180	12	12
Батарейні циклони	0.6880	6	0.6580	5	4
Хемосорбція карбамідом	0.6990	4	0.6620	4	4
Адсорбція вуглем	0.6740	8	0.6380	8	9
Каталітичне відновлення	0.6640	9	0.6250	10	11
Плазмокаталітична очистка	0.7050	3	0.6650	3	3
Розділ газового потоку	0.4540	14	0.4210	14	14
Каталітичне очищення	0.7110	2	0.6750	2	2
Адсорбція цеолітами	0.7370	1	0.6950	1	1
Гідроциклон	0.6950	5	0.6510	6	7

Рис. 2. Кінцеве ранжування технологій очистки газів

В результаті об'єднання технологій очистки газів, отримаємо стратегії очистки газів, які є більш ефективними для процесу очистки. Оцінка стратегій очистки газів проводиться аналогічним чином, як і оцінювання технологій очистки газів, тобто формуємо аналітичну ієрархічну структуру, матрицю парних порівнянь для кожної стратегії очистки газів, визначаємо з матриць порівнянь власний вектор пріоритетів (вектор рангів), та проводимо ран-

жування стратегій очистки газів і їх оцінку. В результаті отримуємо кінцеву оцінку стратегій очистки газів, яка отримана в результаті автоматизованого програмного розрахунку та представлена на рис. 3. Таким чином, найкращою стратегією очистки газових викидів є поєднання циклону та адсорбції цеолітами.

дологія оцінки технологій очистки газових викидів і програмне забезпечення, що можуть застосовуватися для будь-яких технологічних систем.

Створено універсальне програмне забезпечення для проведення оцінки технологій очистки газових викидів; програмне забезпечення створено

в середовищі MatLab з використанням пакету Fuzzy Logic ToolBox. Найкращими технологіями очистки газових викидів за результатами розрахунків є технології тонкої очистки – адсорбція цеолітами та каталітичне очищення. Найкращою стратегією очистки газових викидів є поєднання циклону та адсорбції цеолітами.

Стратегія очистки газів	Середнє ранжування методів		Значимість середнього ранжування		Результат ранжування
	Ut1a	Порядок	Ut2a	Порядок	
Циклон+ Хемосорбція карбамідом	0.6990	2	0.6620	2	2
Циклон+ Каталітичне відновлення	0.6640	5	0.6250	5	5
Циклон + Адсорбція цеолітами	0.7080	1	0.6780	1	1
Батарейні циклони+ Гдроциклон	0.6970	3	0.6600	3	3
Циклон+Адсорбція водою+ Адсорбція лугами	0.6510	6	0.6180	6	6
Пилосідна камера + Адсорбція вуглем	0.6660	4	0.6340	4	4

Рис. 3. Кінцеве ранжування стратегій очистки газів

Висновки

Сформовані стратегії очистки газових викидів та проведено оцінку цих технологій. Розроблена мето-

ди. Також вироблені рекомендації до впровадження даної стратегії для реальних хімічних виробництв для більш ефективної очистки газових викидів.

Література

1. GreenPro: A new methodology for cleaner and greener process design [Text] / Khan F. I., Natrajan B. R., Revathi, P. // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2001. - Vol.14. – p. 307–328.
2. GreenPro-I: A methodology for risk-based process plant design considering life cycle assessment [Text] / Khan F. I., Sadiq R., Husain T. // Journal Environmental Modeling and Software. – 2002. - Vol.17. – p. 669–692.
3. Evaluating offshore technologies for produced water management using GreenPro-I – a risk-based life cycle analysis for green and clean process selection and design [Text] / Sadik R., Khan F., Veitch B. // Computers and Chemical Engineering.- 2005. Vol.29. – p. 1023-1039.
4. Трухав, Р.И. Модели принятия решений в условиях неопределенности [Текст] / Р.И.Трухав. - М.: Наука, 1981. – 258 с.
5. Орловский, С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации [Текст] / С. А. Орловский – М.: Наука, 1981. - 208 с.
6. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. [Текст] : пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
7. Статюха, Г.А. Оценка сложного экологического риска химического производства с использованием анализа иерархии и теории нечетких множеств [Текст] / Г.А. Статюха, Ю.А. Безносик, Л.Н. Бугаева // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. - № 5, частина 1, том 2. – с. 24 – 31.
8. Демидовский, Р.Ю. Разработка и проектирование экологически чистых «зеленых» производств [Текст] / Р.Ю. Демидовский, Ю.А. Безносик - Сб. трудов XXIII международной научной конференции Математические методы в технике и технологиях ММТТ-23. - Саратов, 2010. - том 4. – с. 16 – 19.