

## ЕКСПЕРТНІ ЗНАННЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ АДСОРБЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ ОЛИВ І МАСТИЛ

*Л. Д. Ярошук, кандидат технічних наук, доцент*

*E-mail: [vicleon@i.ua](mailto:vicleon@i.ua)*

*Є. О. Тюріна, асистентка*

*E-mail: [eugenia.turina@gmail.com](mailto:eugenia.turina@gmail.com)*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»*

**Анотація.** *Новизна промислових виробництв з неперервним адсорбційним очищенням відпрацьованих олив та мастил і суттєва складність відповідних процесів затримують впровадження систем їх автоматизації. Сформульовано чотири задачі керування, які пов'язані з зазначеними проблемами виробництва і ґрунтуються на професійному досвіді фахівців. Перша задача – швидке визначення умов очищення при зміні сировини. Вона виникає, оскільки джерелами сировини є відходи промислових підприємств, а також збіднені та забруднені транспортні оливи і мастила. Така сировина не має постійного складу, а початок зміни її властивостей відбувається непередбачувано. Визначено, що розв'язання цієї задачі полягає у пошуку умов очищення аналогів нової сировини. Друга задача – діагностування та прогнозування аварійних ситуацій. Вона актуальна з огляду на токсичність сировини та високий ризик її спалахування. Цю задачу розв'язано за технологією створення експертних систем. Третя задача викликана вимогами до якості очищених речовин – вимог багато і вони не завжди узгоджені. Для задачі керування якістю очищення рекомендовано скористатися алгоритмами fuzzy logic. Четвертою задачею є встановлення пріоритетів серед критеріїв Концепції сталого розвитку у зв'язку з постійною увагою світової спільноти до стану довкілля, економіки та умов життя людей. При розв'язуванні цієї задачі використано методи оптимізації та вибір співвідношень між складовими критеріїв оптимізації. Для кожної задачі визначено типи емпіричних знань, способи їх отримання та застосування. Результати дослідження пояснюють важливість комплексного застосування експертних знань і показують способи їх завчасної класифікації і формування.*

**Ключові слова:** *очищення; олива; мастило; адсорбція; експерт; знання; експертна система; нечітка система; автоматизація; керування*

**Актуальність.** *Основні проблеми керування процесами промислового адсорбційного очищення відпрацьованих олив та мастил (ВОМ) пов'язані зі значною кількістю та нестабільністю нормативних властивостей як забруднених, так*

і очищених речовин. Нестабільність характеристик притаманна відходам, оскільки їх отримують з різних джерел. Зазначені особливості та недостатній досвід використання промислової технології такого очищення стримують розробку математичного забезпечення систем автоматизації. Використання досвіду розробників і оперативного персоналу дають можливість виконувати вимоги до технології, але несистемність залучення знань експертів зменшують їх ефективність. Тому систематизація інтелектуальних задач, конкретних видів емпіричних знань та способів їх отримання є наразі актуальними задачами при автоматизації очищення.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У працях [1, 2] запропоновані рішення для розв'язання задач оптимального адаптивного керування процесів масообміну. У [3] автори розглянули задачу визначення оптимальних технологічних режимів виробництва з урахуванням економічної складової процесу. У цих працях проведений загальний аналіз задач керування виробничих процесів, однак у них не розглянуто задачі, які належать до методів штучного інтелекту.

Разом з цим існує проблема визначення поточного стану об'єкта – технологічних параметрів. У [4] запропонували автоматизовану підсистему поточного моніторингу процесу в режимі реального часу, зокрема, зі створенням бази даних (БД). У [5] розробили додаток, який збирає і вносить у БД інформацію з вимірювачів, а також виконує прогнозування можливих аварій з відстеженням локалізації, де вони можуть відбутися. У дослідженнях [6, 7, 8] запропоновано системи керування виробництвом на базі нечіткої логіки. Автори в [9] на основі алгоритму дерева рішень створили систему діагностування і прогнозування аварійних ситуацій, які можуть виникати на виробництві. У праці [10] також використали цей підхід для класифікації даних, пов'язаних з погодними умовами, які надалі використовують у системі керування роботою відновлюваних джерел електроенергії. Наведені праці, хоча і присвячені втіленню елементів штучного інтелекту у виробничі процеси, але вони не носять комплексного підходу при проектуванні систем автоматизації і, зокрема для процесів очищення мастильних матеріалів. Численні на цей час роботи з отримання та застосування експертних

знань не розкривають методологічних особливостей такої роботи у виробничій сфері.

Математичне забезпечення систем автоматизації повинно враховувати специфіку систем, побудованих на знаннях. Вибір та узагальнення типів задач штучного інтелекту, способів формування та застосування відповідних знань є продовженням досліджень [11].

**Мета дослідження** – визначення сукупності задач, які доцільно та можливо розв'язати методами, пов'язаними не з математично формалізованими знаннями, а з тими, що набувають у результаті практичної діяльності при адсорбційному очищенні речовин. Результати роботи повинні показати, до яких предметних областей належать потрібні знання, як вони можуть бути отримані та як використані.

**Матеріали та методи дослідження.** Для ознайомлення з технологічною системою (ТС) адсорбційного очищення скористаємось фрагментом спрощеної системи автоматизації (рис. 1).

Суміш сировини й розчинника охолоджують у  $R1$  і направляють в адсорбер  $Ad$ . Протитечією з бункера  $B$  подають адсорбент, попередньо регенерований у  $R2$  і охолоджений у  $R3$  (етапи відновлення адсорбенту, такі як десорбція та висушування, на схемі не показано).

В наведеному фрагменті системи автоматизації передбачено, зокрема, контроль витрат сировини й адсорбенту та концентрацій ароматичних вуглеводнів ( $AH$ ), сірчистих з'єднань ( $S$ ) і смол ( $r$ ). У системах керування температурою ( $T_1$ ) і тиском в адсорбері завдання регуляторам  $T_{set}$  і  $P_{set}$  надходять з блоку експертних знань, наповнення якого визначається задачами керування.

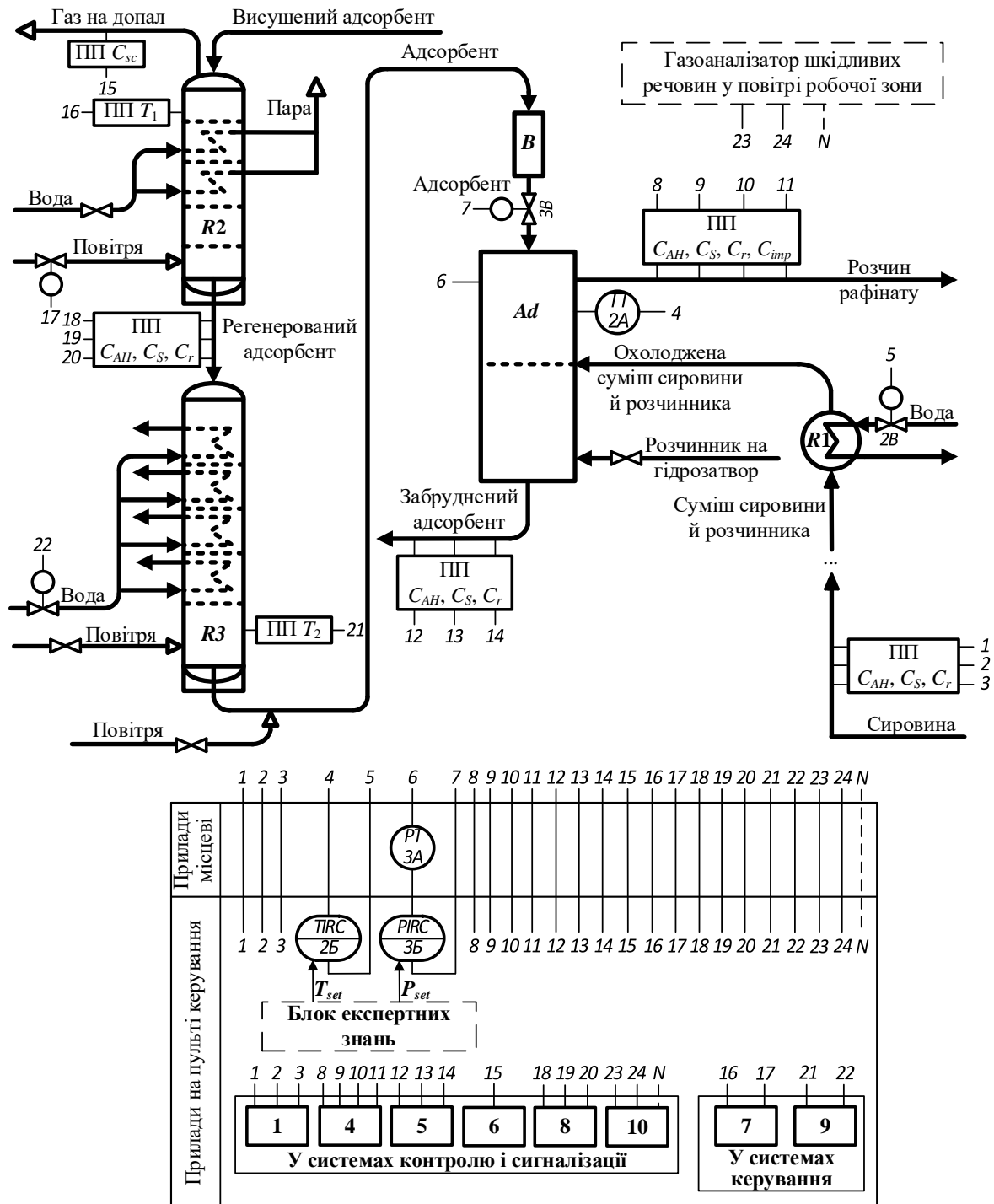


Рис. 1. Фрагмент схеми автоматизації адсорбційного відділення:  
 ПП – первинний перетворювач

*Задача 1 – створення алгоритму керування процесом адсорбції при переході до очищення нової сировини (сировина того ж постачальника, але з іншого джерела, або сировина від іншого постачальника).*

Відпрацьовані оливи та мастила характеризують значною кількістю показників, що пов'язано зі складними умовами експлуатації механізмів. Кожному  $i$ -му набору

властивостей (властивість – випадкова величина, ВВ),  $Q_i$ , повинні відповідати специфічні умови в адсорбері, наприклад, певні тиск  $P_{ad}$  і температура  $\theta_{ad}$ . Для нової сировини ці параметри невідомі.

В [12] запропоновано алгоритм на основі бази даних (БД), яка містить історію відповідності між властивостями  $i$ -ї партії сировини та оптимальними для неї завданнями регуляторам  $P_{ad}$  та  $\theta_{ad}$  ( $Q_i \rightarrow P_{ad,i}, \theta_{ad,i}$ ). Враховуючи кількість властивостей, алгоритм має циклічний характер з двох причин:

- починають шукати збіги за всіма властивостями, а якщо повних збігів не виявляють, то шукають за меншою кількістю властивостей, зменшуючи кількість на 1;
- починають шукати при вузьких діапазонах порівняння властивостей, а якщо не знаходять, то межі діапазонів розширюють.

Зрозуміло, що при виконанні алгоритму регулярно виникають питання, пов'язані з прийняттям рішення щодо можливості визнання попередньої сировини аналогом нової. Це питання про критично малу кількість властивостей і про критично широкі межі діапазону порівняння.

Автори розглядають два способи визначення  $P_{ad}$  та  $\theta_{ad}$  – статистичний та проведення експертизи. Статистику використовують тоді, коли знайдено аналоги, а експертизу – коли треба запропонувати  $P_{ad}$  та  $\theta_{ad}$  за відсутності надійних аналогів.

Для задачі 1 передбачено застосувати емпіричний досвід для таких випадків:

- а) формування переліку властивостей для порівняння;
- б) визначення початкових (найменших) інтервалів порівняння для кожної властивості;
- в) коефіцієнти збільшення інтервалів за відсутності аналогів;
- г) задання  $P_{ad}$  та  $\theta_{ad}$ , якщо немає збігів з жодною властивістю;
- д) задання  $P_{ad}$  та  $\theta_{ad}$ , якщо збіги є за окремими властивостями при поточних інтервалах, але вони видаються сумнівними;
- е) задання  $P_{ad}$  та  $\theta_{ad}$ , якщо при пошуку аналогів перевищено припустимі інтервали порівняння.

Доцільно заздалегідь сформуванати перелік осіб, допущених до експертиз, визначити критерії їх компетентності, створити електронні таблиці опитувань і відповідний комп'ютерний математичний апарат їх обробки.

Знаннями пп. (а – в) володіють хіміки-технологи, а знання про відповідність між властивостями та режимними параметрами адсорбції, пп. (г – е), є в оперативного персоналу та фахівців з автоматизації.

Пункти пп. (а – в) можна виконати заздалегідь шляхом обговорення в експертному середовищі.

Необхідність у виконанні пп. (г – е) з'являється тільки після визнання факту надходження нової сировини й отримання числових значень її властивостей. У цей період швидкість виконання алгоритму впливає на якість очищення і пов'язана з його економічною ефективністю. Отже, саме для цієї задачі важливим є обмеження на тривалість консультаційних заходів.

Програмна реалізація алгоритму має суттєві переваги перед тим або іншим способом активних експертиз. Але і вона в критичні моменти потребує залучення фахівців. Задіяні у виконанні пп. (г – е) фахівці повинні пройти спеціальне навчання, зокрема з правил організації мозкових штурмів, рольових ігор, анкетування тощо.

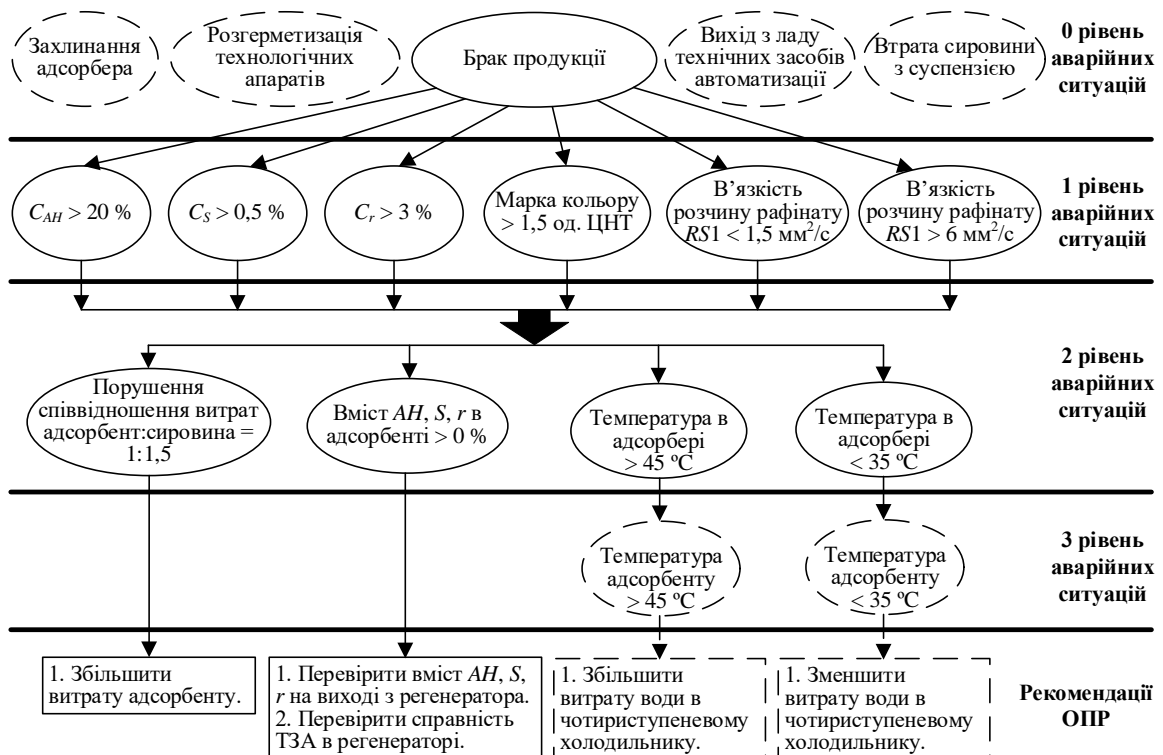
### ***Задача 2 – запобігання аварійним ситуаціям, з'ясування та усунення їх причин.***

У технологічному регламенті виробництва, зазвичай, наведено перелік ситуацій, які визначено як аварійні, та способи їх усунення. Під аварійними ситуаціями автори розуміють і порушення вимог до властивостей очищеної сировини.

Для розв'язання задачі 2 передбачено створення експертної системи (ЕС) – системи програм, яка містить емпіричні знання фахівців. Автори запропонували склад знань, які можуть стати основою бази знань (БЗ) ЕС. Це перелік усіх технологічних змінних, діапазони їх припустимих значень, наслідки виходу значень технологічної змінної за межі припустимих значень та ймовірності таких наслідків. БЗ значною мірою є результатом міркувань експертів, особливо в частині визначення кола технологічних змінних, формулювання фактів порушень, наслідків

кожного з порушень, імовірностей наслідків, тощо. Такі системи стають у нагоді також для навчання оперативного персоналу.

Існує багато способів подання інформації, закладеної в БЗ. Серед них графічний – у вигляді семантичної мережі, так званого дерева аварійних ситуацій (фрагмент показано на рис. 2) [13]. Кожна гілка має позначення кінцевої аварії, її першопричини (якщо рухатися за ієрархічною структурою дерева зверху вниз), та завершується рекомендацією особі, яка приймає рішення (ОПР), з усунення аварії на найнижчому рівні (ЕС діагностувального типу). ЕС прогнозувального типу (рух семантичною мережею знизу нагору) допомагає з'ясувати, до яких наслідків може призвести будь-яка аварія.



**Рис. 2. Фрагмент дерева аварійних ситуацій на виробництві з адсорбційного очищення олив і мастил**

На основі БЗ створюють програмне забезпечення для ЕС як діагностувального, так і прогнозувального типів, спрямованої на допомогу людині у прийнятті рішення в критичних ситуаціях. Під критичними автори розуміють ситуації, які не відповідають нормальному функціонуванню виробництва.

Для створення бази знань, варіант представлення якої наведений на рис. 2, необхідні відповідні знання експертів і вибір способу отримання цих знань. Так,

експертами можуть бути фахівці різних предметних областей (ПО), зокрема ті, які працюють на виробництві з очищення оливних або мастильних матеріалів, та фахівці в області автоматизації. Отримання таких знань не вимагає терміновості, тому доцільно організовувати обговорення в експертних групах та індивідуальні опитування експертів.

**Задача 3** – створення нечіткої автоматичної системи керування (НчАСК) об'єктом.

Автори передбачають декілька алгоритмів дотримання вимог до якості продукції: керування концентрацією одного забруднювача з корекцією за концентраціями інших; керування декількома концентраціями при дотриманні вимог до кожної з них; керування режимними параметрами  $P_{ad}$  та  $\theta_{ad}$  з корекцією за концентраціями забруднювачів.

Застосування емпіричних знань для НчАСК розглянемо на прикладі керування концентрацією ароматичних вуглеводнів ( $C_{AH}$ ) в очищеній речовині з корекцією за концентрацією сірки ( $C_S$ ). Керувальним впливом є витрата адсорбенту  $F_{ad}$ .

Нечітке математичне моделювання почнемо з опису лінгвістичних змінних (ЛЗ). З огляду на опис системи керування ними виступають  $C_{AH}$ ,  $C_S$  та  $F_{ad}$ . Загальний опис лінгвістичної змінної має вид кортежу:

$$\langle \text{Назва ЛЗ}, \mathbf{T}, D, G(\mathbf{T}), M \rangle$$

де  $\mathbf{T}$  – базова терм-множина, тобто назви основних нечітких змінних (НчЗ);  $D$  – діапазон визначення (універсум) тих НчЗ, які входять у склад лінгвістичної змінної ЛЗ;  $G(\mathbf{T})$  – розширена за рахунок синтаксичних процедур множина  $\mathbf{T}$ ;  $M$  – семантична процедура для формування нечітких множин для нових термів розширеної  $\mathbf{T}$  множини (згідно  $G(\mathbf{T})$ ).

Наведемо приклад спрощеного (без  $G$  та  $M$ ) опису однієї з лінгвістичних змінних нашої системи керування –  $C_{AH}$ :

$$\langle \text{Концентрація ароматичних вуглеводнів } (C_{AH}); \left\{ \begin{array}{l} \text{«низька } C_{AH}\text{»}, \\ \text{«нормальна } C_{AH}\text{»}, \\ \text{«висока } C_{AH}\text{»} \end{array} \right\}, X - [10, 40] \rangle$$

Властивості нечітких змінних (НчЗ) теоретично не визначені. У прикладі  $\mathbf{T}$  складається з підмножин *низька*, *нормальна*, *висока*. Цей опис за потреби можна



змінити, розширивши базову множину  $T$  за допомогою зв'язків «і», «або» та модифікаторів «дуже», «не», «близько» тощо (наприклад, «близька до середньої  $C_{АН}$ », «нормальна або дуже висока  $C_{АН}$ » тощо).

Базова терм-множина для поставленої задачі може бути сформульована і таким чином:  $T = \{ \text{«} C_{АН} \text{ близька до } 15 \% \text{»}, \text{«} C_{АН} \text{ близька до } 20 \% \text{»}, \text{«} C_{АН} \text{ близька до } 35 \% \text{»} \}$ .

Як бачимо, складові нечіткого моделювання ТОК не формалізовані й базуються виключно на експертних пропозиціях.

Задачу визначення терм-множини (базової чи розширеної) для кожної ЛЗ доцільно розділити на такі підзадачі: кількість нечітких змінних у ЛЗ,  $N$ ; універсуми кожної НчЗ; вид функції належності кожної НчЗ (множина функцій належностей –  $\mu$ ); параметри функції належності кожної нечіткої змінної (множина  $FP$ ).

Думки експертів стосовно перших трьох властивостей доцільно з'ясовувати, надаючи перелік варіантів відповідей, додаючи пункт опитування «Ваш варіант». Щодо виду функцій, то треба як варіанти навести математичні вирази, які традиційно використовують для математичного опису адсорбції. На жаль, математичні моделі каналу керування для вибраного виробництва відсутні, тому при опитуванні експертів доцільно наводити формули існуючих апроксимацій, що вдало себе зарекомендували та їх графічні зображення, знову таки, з пунктом «Ваш варіант».

Параметри функцій належності кожний експерт може підібрати, використовуючи, наприклад, графічний редактор в бібліотеці *Fuzzy logic* математичного пакету *MatLab*. Для адсорбції доцільно віддати перевагу експонентам та логарифмам.

Вибрати одну нечітку модель з декількох запропонованих доцільно в результаті обговорення або ранжування за процедурою Дельфи.

Рекомендації щодо значень керувальної змінної при певних комбінаціях керованої та корегувальних змінних розробляють у виді правил продукції (ЯКЩО «акцедент», ТО «консеквент»). Існує достатній вибір відповідних алгоритмів, зокрема Мамдані, Цукамото, Ларсена, Сугено тощо. Правил до вибору якогось з них немає – це вирішують експерти.

Аналіз необхідних знань для задачі 3 показав, що найкращим способом як для отримання експертних знань, так і для підготовки фахівців до експертиз є використання графіків і формул, які дозволяють зрозуміти існуючі зв'язки між технологічними змінними. Дуже корисною практикою ознайомлення майбутніх експертів буде створення нечітких моделей у середовищах спеціалізованих математичних процесорів.

*Задача 4 – приєднання виробництва з очищення індустриальних олів і мастил до напрямку міжнародної співпраці «Концепція сталого розвитку».*

Промислове адсорбційне очищення ВОМ супроводжується викидами в атмосферу речовин, які забруднюють довкілля (повітря, воду, ґрунт). Ці причини зобов'язують розробників ХТС та систем автоматизації враховувати світові тенденції організації технологічних процесів, а також відповідні державні стандарти, норми і правила стосовно вмісту шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Головна ідея Концепції – системне поєднання трьох компонентів розвитку суспільства: економіки, екології та соціальної сфери.

Відповідно до цілей сталого розвитку України до 2030 р. [14], стратегія сталого розвитку пов'язана зі зменшенням антропогенного впливу на навколишнє середовище шляхом, зокрема, усунення накопичених у минулому токсичних відходів. Серед таких можуть бути відпрацьовані олівні або мастильні матеріали, які, залежно від способу їх експлуатації, містять у собі шкідливі елементи, які негативно впливають на довкілля.

Для розв'язання наведеної задачі доцільно використовувати методи оптимізації. Постановка задачі в такому випадку може мати такий вигляд:

$$K_{opt}(\mathbf{U}, \mathbf{X}) = f(\mathbf{U}, \mathbf{X}) \rightarrow \min \text{ (або max)};$$

$$\mathbf{U}_{\min} \leq \mathbf{U} \leq \mathbf{U}_{\max}; \mathbf{X}_{\min} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}_{\max}$$

де  $K_{opt}(\mathbf{U}, \mathbf{X})$  – критерій оптимальності;  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{X}$  – вектори керувальних та контрольованих технологічних змінних відповідно;  $f()$  – функція мети.

Така глобальна задача базується на різних моделях знань. Значну частину таких знань формують нормативні документи, що стосуються рівнів виробництва, країни, світу. Документи виробництва потрібні для регулювання гранично припустимих

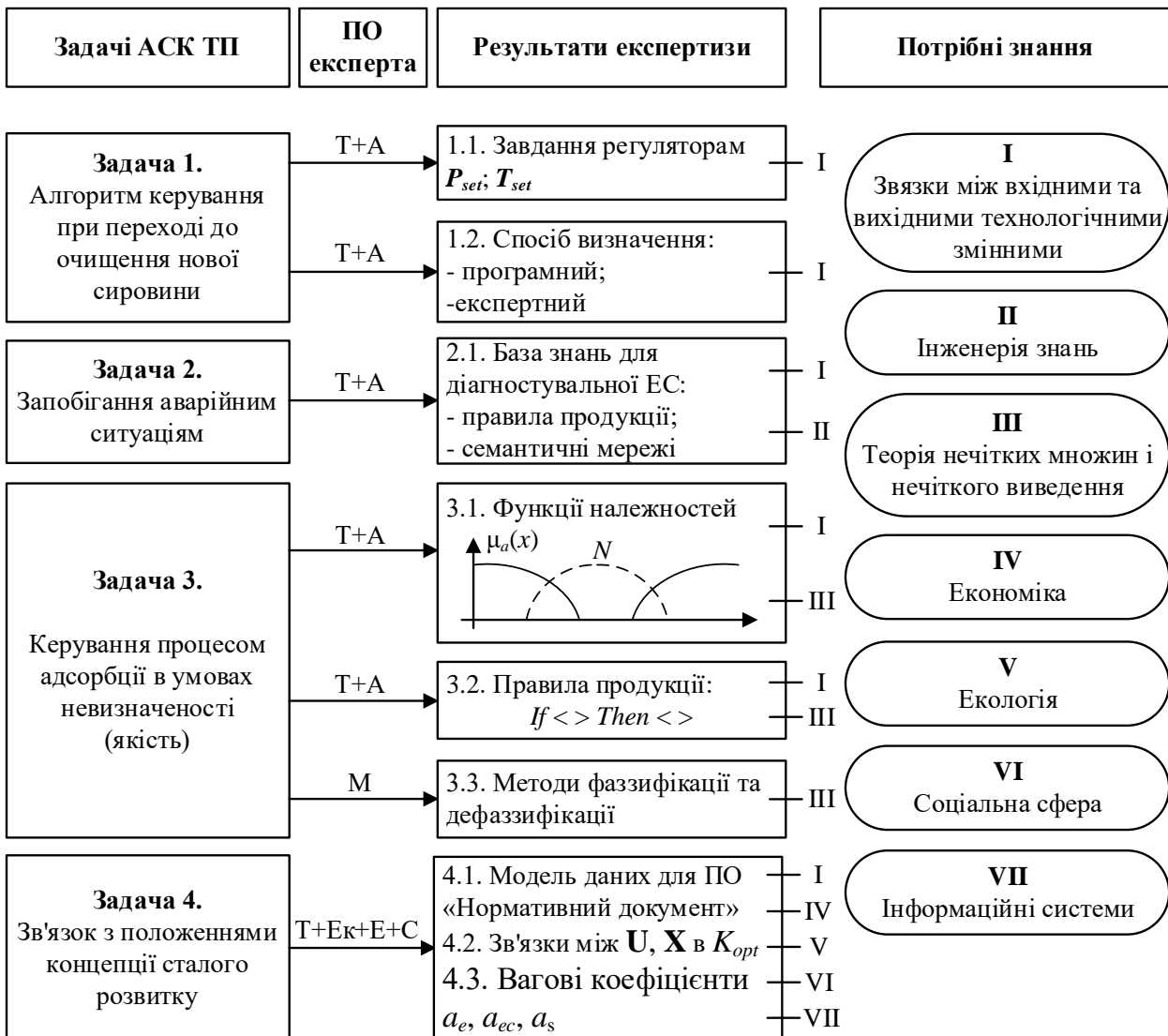
концентрацій (ГДК) у повітрі робочої зони, забезпечення стандартів очищення відпрацьованих матеріалів для отримання товарного продукту тощо. Державні документи (закони, кодекси) фіксують обмеження на викид небезпечних речовин у навколишнє середовищі в рамках всіх підприємств, які діють у межах країни. Документи світового рівня (стратегії), розраховані на довготривалі терміни, у них відображені зобов'язання кожної країни зменшити викиди шкідливих речовин в атмосферу в перспективі десятиліть. Оскільки оптимальне керування технологічними об'єктами в цій задачі повинно враховувати економічну, екологічну та соціальну складові Концепції, то головним завданням експертиз є домовленість про вагові коефіцієнти між цими складовими:

$$K_{opt}(\mathbf{U}, \mathbf{X}) = f(a_e K_{opt,e}; a_{ec} K_{opt,ec}; a_s K_{opt,s}),$$

де  $K_{opt,e}$ ;  $K_{opt,ec}$ ;  $K_{opt,s}$  – критерії оптимальності для економічної, екологічної та соціальної складових загального критерію відповідно;  $a_e$ ,  $a_{ec}$ ,  $a_s$  – вагові коефіцієнти відповідних складових для поточної виробничої, державної та світової ситуації.

Зрозуміло, що ця задача вимагає залучення експертів різних предметних областей. Її розв'язання не передбачає терміновості, методами роботи з експертами можуть бути експертизи типу круглих столів, а також індивідуальні опитування.

Результатом досліджень комплексу задач, які потребують емпіричних знань, є створення системи заходів, які забезпечать більшу ефективність автоматизації виробництва з очищення ВОМ за рахунок збільшення правдивості залучених знань. На рис. 3 зображено схему, яка дозволяє розробникам математичного забезпечення системи автоматизації переходити від аналізу задач виробництва до організації відповідної роботи з експертами.



**Рис. 3. Схема визначення знань для підготовки експертів та експертиз:**  
 ПО – предметна область; М – математика; Т – технологія; А – автоматизація, Ек – економіка, Е – екологія, С – соціальна сфера

### Висновки і перспективи.

Сформульовані у матеріалах статті задачі набувають особливого значення у зв'язку з тим, що, судячи з тенденцій, утилізація та переробка вторинної сировини стає важливою галуззю у світовому масштабі. Пошук шляхів розв'язання кожної задачі засвідчив, що відповідні алгоритми вимушені використовувати неформальні знання фахівців, набуваючи ознак штучного інтелекту.

Сучасний стан розвитку систем штучного інтелекту найбільш розвинений у формах експертних та нечітких систем, нейронних мереж та генетичних алгоритмів. Ці принципово різні форми мають іноді точки дотику, створюючи різноманітні змішані форми (гібридні системи).

Висновки, які можна зробити з проведених досліджень, можна покласти в основу наступних рекомендацій:

- при розробці системи автоматизації доцільно формувати не тільки перелік окремих її задач, а й створювати перелік типів емпіричних знань в кожній з них і в цілому в проєкті;
- створювати експертні групи потрібно не окремо для кожної задачі, а з напрямку знань, який може бути задіяний у декількох задачах;
- майбутні експерти повинні пройти певну підготовку перед проведенням експертизи, по-перше, їм треба надати додаткову інформацію як про властивості технології, так і про існуючі методи розв'язання задач; по-друге, з експертами треба провести тренувальні експертизи для кращого «занурення» у проблематику, використовуючи, зокрема, засоби спеціалізованих математичних процесорів.

Такі рекомендації дозволять підвищити так звану «якість знань» експертів, отже, й ефективність системи автоматизації. Вони сприятимуть також підвищенню кваліфікації виробничого персоналу, який завжди є частиною експертних груп.

### Список використаних джерел

1. Акулинин Е. И., Голубятников О. О., Дворецкий Д. С., Дворецкий С. И. Задачи анализа, оптимизации и управления при разделении газовых смесей. *Вестник ВГУИТ*. 2018. Том 80, вып. 2. С. 93-100. doi: 10.20914/2310-1202-2018-2-93-100.
2. Матвейкин В. Г., Ишин А. А., Скворцов С. А., Дворецкий С. И. Автоматизация процесса адсорбционного разделения газовых смесей и получение водорода. *Вестник ТГТУ*. 2017. Том 23, вып. 4. С. 548-556. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.548-556.
3. Zhulinskyi A., Ladieva, L. Burban A. An Optimization of static operating modes of the installation of contact membrane distillation. *Contemporary Engineering Sciences*. 2017. Vol. 10, no. 9. P. 439-446. <https://doi.org/10.12988/ces.2017.7332>.
4. Лендел М. І., Лендел Т. І, Болбот І. М. База даних реального часу підсистеми моніторингу процесу вирощування овочевої продукції в теплиці. *Енергетика і автоматика*. 2021. № 4. С. 128-136. doi:<http://dx.doi.org/10.31548/energiya2021.04.128>.
5. Кіктев М. О., Бузюрова А. О. Розподілена інформаційна система водопостачання з використанням методів прогнозування для недопущення аварій. *Енергетика і автоматика*. 2022. № 1. С. 111-126. doi:<http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.01.111>.
6. Михайленко В. С., Ложечников В. Ф. Методы настройки нечеткого

адаптивного ПИД-регулятора. *Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы*. 2009. № 2 (24). <https://aaecs.org/mihailenko-vs-lojchnikov-vf-metodi-nastroiki-nechetkogo-adaptivnogo-pid-regulyatora.html>.

7. Богушевский В. С., Зубова К. М. Нечітке управління киснево-конвертерного процесу. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2014. С. 69-74. <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/147530>.

8. Пономаренко Р. М., Демчук А. Б. ШІМ-перетворювач на основі нечіткого логічного виведення такагі-сугено для систем internet of things. *Енергетика і автоматика*. 2022. № 1. С. 49-59. doi:<http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.01.049>.

9. Ковалюк, Д. О., Осіпа, Р. А., Кондратова, В. І. Прийняття рішень в системах керування на основі методів аналізу даних. *Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2021. № 4. С. 30–38. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2021.248902>.

10. Кіктев М. О., Осипенко В. В., Панасюк М. Б., Молітвін Є. О. Автоматизована система керування роботою відновлюваних джерел електроенергії з використанням алгоритму дерева рішень. *Енергетика і автоматика*. 2022. № 1. С. 95-110. doi:<http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.01.095>.

11. Ярощук Л. Д., Тюріна Є. О. Ієрархія задач керування неперервним процесом адсорбційного відновлення мастильних матеріалів. *Вісник ЧДТУ*. 2021. № 2. С. 49-62. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2021.239200>.

12. Ярощук Л. Д., Тюріна Є. О. Моделювання та керування адсорбційним очищенням оливо та мастил у режимі зміни сировини. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2022. № 3. С. 56-68. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2022.265361>.

13. Ярощук Л. Д., Тюріна Є. О. Формалізація знань для експертної системи при керуванні процесом регенерації мастил. *На шляху до індустрії 4.0: інформаційні технології, моделювання, штучний інтелект, автоматизація*, колективна монографія. 2021. С. 459-469.

14. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року [Електронний ресурс] : Указ президента України № 722/2019 від 30.09.2019. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019/> (дата звернення: 01.06.2023). Назва з екрана.

## References

1. Akulinin, E. I., Golubyatnikov, O. O., Dvoretzky, D. S., Dvoretzkii, S. I. (2018). Zadachi analiza, optimizatsii i upravleniya pri razdelenii gazovykh smesey [Problems of analysis, optimization and control in the separation of gas mixtures]. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 80 (2), 93-100. doi: 10.20914/2310-1202-2018-2-93-100.

2. Matvejkin, V. G., Ishin, A. A., Skvorcov, S. A., Dvoreckij, S. I. (2017). Avtomatizatsiya protsessa adsorbtsionnogo razdeleniya gazovykh smesey i polucheniye vodoroda [Automation of the process of adsorption separation of gas mixtures and hydrogen production]. *Proceedings of TSTU*, 23 (4), 548-556. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.548-556.

3. Zhulinskyi, A., Ladieva, L. Burban, A. An Optimization of static operating modes

of the installation of contact membrane distillation (2017). Contemporary Engineering Sciences, 10 (9), 439-446. <https://doi.org/10.12988/ces.2017.7332>.

4. Lendiel, M., Lendiel, T., Bolbot, I. (2021). Baza danykh realnoho chasu pidsystemy monitorynhu protsesu vyroshchuvannia ovochevoi produktsii v teplytsi [Real-time database of the subsystem of monitoring the process of growing vegetable products in the greenhouse]. Energy and Automation, 0(4), 128-136. doi:<http://dx.doi.org/10.31548/energiya2021.04.128>.

5. Kiktev, N., Busiurova, A. (2022). Rozpodilena informatsiina systema vodopostachannia z vykorystanniam metodiv prohnozuvannia dlia nedopushchennia avarii [Distributed information system for water supply using prediction methods to prevent accidents]. Energy and Automation, 0(1), 111-126. doi:<http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.01.111>.

6. Mihajlenko, V. S., Lozhechnikov, V. F. (2009). Metody nastrojki nechetkogo adaptivnogo PID-reguljatora [Tuning Methods for Fuzzy Adaptive PID Controller]. Avtomatika. Avtomatizacija. Jelektrotehnicheskie komplekxy i sistemy, 2 (24). <https://aaecs.org/mihailenko-vs-lozhechnikov-vf-metodi-nastroiki-nechetkogo-adaptivnogo-pid-regulyatora.html>.

7. Bohushevskiy, V. S., Zubova, K. M. (2014). Nechitke upravlinnia kysnevo-konverternogo protsesu [Fuzzy Control of the Oxygen-Converter Process]. Mining Electromechanics and Automation, 69-74. <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/147530>.

8. Ponomarenko, R., Demchuk, A. (2022). ShIM-peretvoriuvach na osnovi nechitkoho lohichnoho vyvedennia takahi-suheno dlia system internet of things [PWM converter based on takagi-sugeno fuzzy logic inference for internet of things systems]. Energy and Automation, 0(1), 49-59. doi:<http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.01.049>.

9. Kovaliuk, D., Osipa, R., Kondratova V. (2021). Pryiniattia rishen v systemakh keruvannia na osnovi metodiv analizu danykh [Decision making in control systems based on data analysis]. Bulletin of NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving», (4), 30-38. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2021.248902>.

10. Kiktev, N., Osypenko, V., Panasiuk, M., Molitvin, Y. (2022). Avtomatyzovana systema keruvannia robotoiu vidnovliuvanykh dzherel elektroenerhii z vykorystanniam alhorytmu dereva rishen [Automated control system for the operation of renewable electricity sources using a decision tree algorithm]. Energy and Automation, 0(1), 95-110. doi:<http://dx.doi.org/10.31548/energiya2022.01.095>.

11. Yaroshchuk, L. D., Tiurina, Y. O. (2021). Iierarkhiia zadach keruvannia neperervnym protsesom adsorbtsiinoho vidnovlennia mastylnykh materialiv [Hierarchy of Control Tasks for Continuous Process of Adsorption Regeneration of Lubricants]. Bulletin of Cherkasy State Technological University, (2), 49-62. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2021.239200>.

12. Yaroshchuk, L., Tiurina, Y. (2022). Modeliuvannia ta keruvannia adsorbtsiinym ochyshchenniam olyv ta mastyl u rezhymi zminy syrovyny [Modeling and control of oils and greases adsorptive purification in the changing raw materials mode]. Bulletin of NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving», (3), 56-68. <https://doi.org/10.20535/2617->

9741.3.2022.265361.

13. Yaroshchuk, L., Tiurina, Y. (2021). Formalizatsiia znan dlia ekspertnoi systemy pry keruvanni protsesom reheneratsii mastyl [Knowledge Formalization for the Expert System in Oil Regeneration Process Control]. On the way to industry 4.0: information technologies, modeling, artificial intelligence, automation, collective monograph, 459-469.

14. Pro Tsili staloho rozvytku Ukrainy na period do 2030 roku [About the Sustainable Development Goals of Ukraine for period until 2030]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019/>.

## **EXPERT KNOWLEDGE IN AUTOMATION SYSTEMS OF OILS AND GREASES ADSORPTIVE PURIFICATION**

*L. Yaroshchuk, Y. Tiurina*

**Abstract.** *The novelty of industrial production with continuous adsorptive purification of used oils and greases and the significant complexity of relevant processes delay the implementation of their automation systems. Four control tasks are formulated, which are related to the specified production problems and are based on the professional experience of specialists. The first task is quick determination of purification conditions when changing raw materials. It arises because the sources of raw materials are waste from industrial enterprises, as well as depleted and contaminated transport oils and greases. Such raw materials do not have a constant composition, and the beginning of changes in their properties occurs unpredictably. It was determined that solution to this problem is in searching for conditions for the purification of new raw materials analogs. The second task is to diagnose and predict emergency situations. It is relevant because of the raw material toxicity and the high risk of its ignition. This task was solved using the technology of creating expert systems. The third task is caused by the quality requirements of purified substances – there are many requirements and they are not always coordinated. It is recommended to use fuzzy logic algorithms for the task of controlling purification quality. The fourth task is to establish priorities among the criteria of the sustainable development Concept in connection with constant attention of the world community to the state of environment, economy, and people's living conditions. When solving this problem, optimization methods and the selection of ratios between components of the optimization criteria were used. For each task, types of empirical knowledge, methods of obtaining and applying them are defined. The results of the study explain the importance of comprehensive application of expert knowledge and demonstrate ways of their early classification and formation.*

**Key words:** *purification; oil; grease; adsorption; expert; knowledge; expert system; fuzzy system; automation; control*