

**Ярошук Л.Д.**<https://orcid.org/0000-0001-8441-6692>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»**Савченко Т.В.**<https://orcid.org/0009-0003-3614-5885>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

## ЕКСПЕРТНІ МЕТОДИ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ В ЗАДАЧАХ РЕСУРСОЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА ФОСФОРНОЇ КИСЛОТИ

Статтю присвячено актуальній темі підвищення надійності та ресурсоефективності виробництва фосфорної кислоти термічним способом, теплові та масообмінні процеси якого відбуваються при високих температурах з речовинами, шкідливими для обладнання та довкілля. Задачі підвищення ефективності цього виробництва передбачено розв'язувати шляхом використання експертних емпіричних знань в математичному забезпеченні комп'ютерно-інтегрованих систем керування.

Проведено аналіз хіміко-технологічної системи в цілому та окремих технологічних об'єктів керування з метою виявлення в них причин нестаціонарності процесів, шкідливих речовин, аварійних станів, а також їх наслідків. Головні причини зазначених порушень технологічного регламенту, зазвичай, зразу не очевидні, натомість стан об'єктів у цей час потребує швидкого аналізу, класифікації, локалізації причин та прийняття рішень по їх усуненню. Без такої послідовності інтелектуальних процедур сама по собі констатація порушення ще не дозволяє швидко визначити оптимальний ланцюг пошуку та вибір корегувальних дій. Для виявлення та прогнозування найбільш загрозливих технологічних зон ризиків використано методи експертного оцінювання, зокрема ранжування. Для зазначеного виробництва запропоновано розглядати два основних напрямки порушень – порушення норм екологічної безпеки та зниження показників ресурсоефективності. Виконано формалізацію зв'язків між окремими технологічними порушеннями режимів виробництва фосфорної кислоти термічним способом. Вона базується на запропонованій структурно-параметричній схемі технологічної системи та досвіді експертів. Сформовано основу бази знань діагностувальної експертної системи, що сприяє зменшенню часу пошуку першопричин аварій та реалізації відновлюваних дій. Синтезовано автоматичну систему керування концентрації готової фосфорної кислоти на основі правил нечіткого висновку, що дозволяє дотримуватись умов до якості продукції за рахунок врахування властивостей сировини на вході бапти гідратації-охолодження.

**Ключові слова:** фосфорна кислота, термічний спосіб виробництва, система експертного оцінювання, експертна система, база знань, система керування, нечітка система, нестаціонарність, ресурсоефективність, надійність.

**Постановка проблеми.** Сучасний стан розвитку хімічної промисловості, зокрема виробництва термічної фосфорної кислоти (ТФК) характеризується постійним зростанням вимог до ресурсоефективності та надійності комп'ютерно-інтегрованих технологічних систем. Критичними викликами у цій галузі є дотримання обґрунтованих режимних параметрів у кожному окремому технологічному об'єкті керування (ТОК) для виконання

планових завдань хіміко-технологічної системи (ХТС) у цілому. На цьому побудована основна ідея функціонування ISO-систем та різноманітних екологічних та соціальних систем розвитку людства (зокрема положення стратегії сталого розвитку, яка є об'єднавчою платформою для впровадження технологічних впливів людини на довкілля).

ХТС, які складаються з поширених типових процесів (і, відповідно, обладнання), мають

обґрунтовані й перевірені рішення з автоматичного та автоматизованого керування. Інша справа – виробництва, які використовують обладнання, що можна розглядати як певною мірою унікальне, з нестабільними режимами функціонування. Такі виробництва вимагають ретельного аналізу об'єктів для прийняття рішень (часто нетипових) щодо алгоритмів керування ХТС у цілому.

Сучасний рівень керування процесами технології ТФК має недостатню теоретичну підтримку через об'єктивні причини: інтенсивне тепловиділення при екзотермічній реакції окиснення фосфору, занадто різкі зміни фазового стану речовин, коливання тиску у форсунках, нестабільність хімічного складу сировини, неперервне зростання корозійного шару на поверхнях теплообмінних апаратів, багатофазність та агресивність середовищ тощо. Сталі параметри налаштування регуляторів з класичними ПІД-законами в наведених умовах втрачають початкову оптимальність. Тому для поставлених завдань ресурсоефективності та надійності ХТС виникає об'єктивна потреба у впровадженні більш гнучких і перевірених досвідом вдалого використання системах керування, наприклад, з інтелектуальною підтримкою прийняття рішень (СК ІППР).

Актуальною проблемою цього дослідження є визначення способів підвищення ефективності виробництва ТФК шляхом дотримання заданих показників якості готового продукту, зменшення наднормових ресурсних втрат через порушення технології (аварійні ситуації) та негативного впливу на довкілля. Вирішення проблеми шляхом автоматизації гальмується тим, що традиційні аналітичні методи опису процесів в обладнанні технології ТФК не дозволяють отримувати адекватні та прості для керування математичні моделі. На жаль, алгоритми керування не передбачають глибокого аналізу причин можливих технологічних порушень, зв'язків між ними, а також активного залучення персоналу як з метою поточного корегування керувальних впливів, так і для цілеспрямованих дій по оцінюванню стану ХТС та попередженню аварійних ситуацій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Фундаментальні аспекти технології та ідентифікація джерел викидів висвітлені у звіті US EPA [1], а питання енергоефективності камери згорання фосфору досліджено С. Zap та ін. [2]. Водночас більшість цих праць зосереджена на стаціонарних режимах, тобто без урахування динамічної деградації обладнання.

Методологічні основи управління ризиками, визначені стандартом ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013

[3], адаптуються до специфіки хіміко-технологічних систем через інтеграцію експертних методів з аналізом дерев відмов та аналізом небезпек HAZOP [4, 5]. Ефективність такого поєднання в межах функціонування ІСППР обґрунтована у роботі В. Кисельова [6]. Питання впровадження інтелектуальних систем у контури автоматизації та формалізації неструктурованих знань для подолання інформаційної невизначеності складних об'єктів ґрунтовно розглядаються у працях [7–9].

Дослідження J. B. Savkovic-Stevanovic та T. J. Ross [10, 11] доводять практичну ефективність застосування нечітких контролерів у ХТС, обґрунтовуючи доцільність використання нечіткої логіки як інструмента фільтрації шумів та компенсації інформаційної невизначеності.

Незважаючи на існування окремих методів інтелектуального керування та діагностики, саме для виробництва термічної фосфорної кислоти досі не розроблено систему підтримки прийняття рішень. Зокрема, потребують вирішення в реальному часі питання контролю показників якості продукту та оцінювання безпекового стану процесів, зокрема їх негативного впливу на довкілля.

**Постановка завдання.** Метою роботи є підвищення ресурсоефективності та надійності системи автоматизованого керування процесами виробництва термічної фосфорної кислоти шляхом створення інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень на основі емпіричних експертних знань.

**Виклад основного матеріалу.** Для визначення джерел підвищення ресурсоефективності та надійності потрібно уважно проаналізувати особливості конструкцій обладнання та фізико-хімічних основ процесів виробництва, яке прийнято розглядати як двостадійне.

Згідно із технологічною схемою (рис. 1), у електропечі 2 за температури 1500–1600 °С відбувається сублимація фосфору з шихти (кокс, фосфат та оксид кремнію подають з бункеру 1). Отримана парогазова суміш після очищення в електрофільтрі 3 надходить до конденсаторів 4 та 5, де пара фосфору конденсується під шаром води для запобігання самозайманню.

Друга стадія починається з подачі рідкого жовтого фосфору зі збірників 6 та 7 через відстійник 8 в камеру згорання 9, де за надлишку повітря відбувається його інтенсивне спалювання. Процес відбувається при температурах 1650–2760 °С, що забезпечує високий ступінь перетворення сировини на газоподібний фосфорний ангідрид ( $P_2O_5$ ).

Утворений ангідрид спрямовують до башти

гідратації-охолодження (гідратора-абсорбера) 10, де відбувається завершальна гідратація та охолодження газоподібної фази  $P_2O_5$  шляхом зрошення водою, що призводить до утворення кислотного туману.

Друга стадія виробництва визначається двома послідовними екзотермічними реакціями: власне окисненням фосфору та його подальшою гідратацією з утворенням концентрованої термічної фосфорної кислоти ( $H_3PO_4$ ). Особливістю окиснення є високе питоме тепловиділення, що потребує керування витратами охолоджуючих потоків для стабілізації температурного профілю апарата, оскільки будь-яке відхилення може призвести до термічного пошкодження обладнання або зниження якості кінцевого продукту.

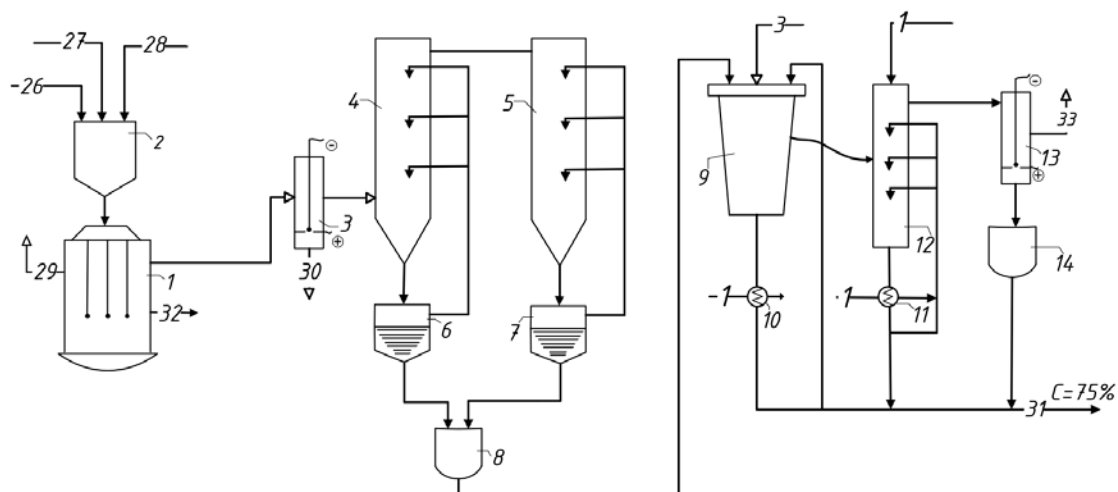
Готову кислоту з концентрацією в межах діапазону 75...85% відводять з нижньої частини гідратора-абсорбера 9 на склад, а решту після охолодження в холодильниках 10, 11 повертають у процес для зрошення апаратів. Газові потоки, що містять дрібнодисперсний кислотний туман, який не встиг абсорбуватися рідкою фазою через високу швидкість потоку або недостатню площу контакту, спрямовують на завершальний етап – демістинг (фільтрацію). Використання систем очищення 13, таких як електрофільтри або скрубери Вентурі, забезпечує сепарацію аерозолу з потоку димових газів.

Досліджувана ХТС має низку специфічних особливостей. Наприклад, екзотермічність, коли

реакція горіння фосфору супроводжується миттєвим виділенням значної кількості тепла, тому найменша затримка в надходженні води для охолодження може призвести до перегрівання газу. Багатофазність – одночасна присутність у башті гідратації газу, пари, кислотного туману кислоти та рідкої фази. Ці складові мають різні швидкості теплопередачі, що формує стохастичний характер властивостей ТОК, ускладнюючи прогнозування їх поведінки. Через агресивність середовища швидка корозія та утворення нальоту на поверхнях технічних засобів автоматизації (ТЗА) спричиняють отримання хибних даних.

На основі аналізу ХТС визначено основні фактори й умови, що забезпечують якість ТФК та екологічну безпеку: температурна стабільність у камері згорання, оптимальне співвідношення між витратами кисню й фосфору, рівномірність та стабільність розпилення фосфору та води, температура, витрата води та концентрація ангідриду на вході у БГО, а також стабільність напруги в електрофільтрі.

Проте реалізація цих вимог ускладнюється наявністю зовнішніх і внутрішніх джерел збурення. Так, фізико-хімічні властивості жовтого фосфору стають нестабільними внаслідок варіативності складу мікродомішок, а також залежності в'язкості розплаву від температури, що викликає зміни дисперсності розпилення та умов горіння. Стан внутрішнього середовища апаратів також характеризується динамічною мінливістю через



**Рис. 1. Технологічна схема виробництва термічної фосфорної кислоти:**  
 1 – бункер, 2 – електропіч, 3, 13 – електрофільтри, 4 – конденсатор-промивач гарячий, 5 – конденсатор-промивач холодний, 6, 7, 14 – збірники, 8 – відстійник, 9 – башта згорання, 10, 11 – холодильники, 12 – башта гідратації-охолодження.  
 Потоки: 1 – вода, 3 – повітря, 26 – кокс, 27 – фосфат, 28 – оксид кремнію, 29 – оксид вуглецю, 30 – пил, 31 – фосфорна кислота, 32 – шлаки, 33 – газ

суттєву корозію стінок та поступове наростання шару осаду на поверхнях теплообміну. Отже, стан кожного з апаратів ХТС можна вважати у загальному випадку нестационарним, тобто погано визначеним для прийняття керувальних рішень. Неконтрольована нестационарність може стати причиною порушень технологічного регламенту й призводити до аварійних ситуацій.

З метою обґрунтування задач та структури відповідної СК ІППР було розроблено структурно-параметричну схему ХТС з ідентифікацією кожного з апаратів, матеріальних потоків та показників властивостей (фрагмент СПС з ідентифікаторами стосовно однієї з башт гідратації – охолодження, БГО1, зображено на рис. 2). Уведено наступні ідентифікатори потоків, апаратів та змінних: КЗ1, ЕФ1 – камера згоряння та електрофільтр відповідно;  $T_{бго}$  – температура в середині башти гідратації,  $S_{пов}$ ,  $D_{кр}$  – характеристики стану внутрішніх поверхонь та дисперсності розпилення в середині башти гідратації;  $Q_{фа}$ ,  $F_{фа}$ ,  $T_{фа}$  – концентрація, витрата та температура  $P_2O_5$  відповідно;  $Q_{фкп1}$ ,  $F_{фкп1}$  – концентрація, витрата ТФК на склад відповідно;  $Q_{фк}$ ,  $F_{фк}$  – концентрація, витрата ТФК з вмістом газу відповідно;  $F_{в}$ ,  $T_{в}$ ,  $P_{в}$  – витрата, температура та тиск води відповідно [1, 2].

Зазначені властивості об'єктів керування у виробництві ТФК показують, що порушення заданих умов функціонування процесів мають достатню кількість причин, проявів (брак, зни-

ження продуктивності, вихід з ладу обладнання) і наслідків. Тому дуже важливо мати систему узгоджених алгоритмів, які дозволяють:

- визначати та прогнозувати найбільш критичні зони ХТС для спрямування туди відповідних ресурсів та виконання захисних дій;
- при визнанні факту порушення технологічного режиму визначати його першопричини, ланцюги наслідків, а також рекомендації по усуненню першопричин.

Враховуючи перманентну нестационарність ХТС, треба періодично уточнювати актуальну критичну зону (зону загроз). Поточне визначення такої зони ХТС запропоновано визначати методами експертного оцінювання (ранжування), згідно до яких отримують та математично обробляють думки кваліфікованого персоналу.

Було визначено два типи критичних зон найбільш важливі з точки зору екологічної безпеки та з точки зору ресурсозбереження.

До переліку об'єктів ранжування за типом *екологічної безпеки* було внесено електрофільтр першої стадії, що очищує газоподібний фосфор після спалювання, електрофільтр другої стадії для вловлювання кислотного туману та башту гідратації-охолодження, де безпосередньо утворюється готова продукція. В дослідженні були враховані дані про концентрації часток  $P_2O_5$  та  $H_2O$ , об'єми викидів, ГДК, а також інформація про періоди між забиваннями фільтрів та трудомісткості їх обслуговування.

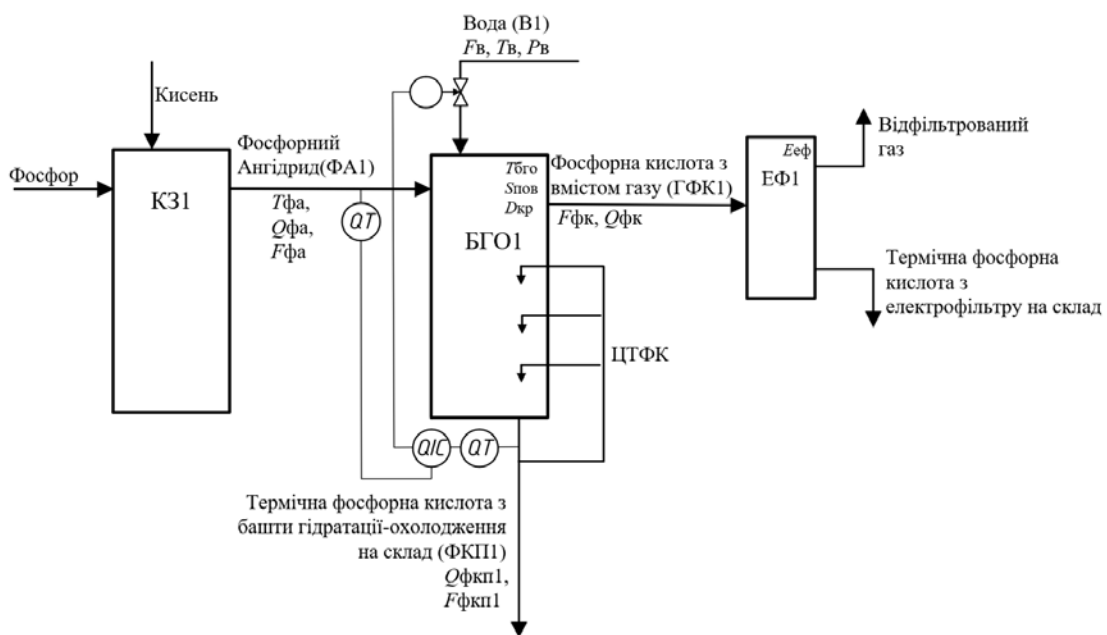


Рис. 2. Структурно-параметрична схема для БГО1 з контуром керування якістю ТФК

Нормальна матриця ранжування (табл.1) за одночасним методом (чим більше шкоди від роботи апарата, тим менший його ранг) показала, що найбільш критичним об'єктом є електрофільтр другої стадії.

Таблиця 1

**Нормальна матриця ранжування апаратів**

Експерти, <i>j = 1,5</i>	Вхідні змінні (фактори), <i>j = 1,3</i>		
	1 (електро-фільтр)	2 (електро-фільтр)	3 (башта гідратації)
1	1,5	1,5	3
2	1	2	3
3	3	1,5	1,5
4	2	2	2
5	3	1,5	1,5
Σрангів	10,5	8,5	11

Для підвищення ефективності дослідження додатково було проведено оцінювання компетентності експертної групи за критеріями стажу та кваліфікації, що дозволило розрахувати вагові коефіцієнти думки кожного фахівця. Після проведення корекції результатів із урахуванням компетентності експертів електрофільтр другої стадії підтвердив статус найбільш проблемного апарату за рівнем шкідливості викидів.

Для обґрунтованості висновків додатково була застосована ще одна система експертного оцінювання – попарного ранжування, яка базується на протилежному принципі вибору важливішого чинника (чим більше шкоди від роботи апарата, тим більший його ранг). Результати обох систем ранжування з врахуванням компетентностей та без нього виявили однакові тенденції у силі впливу факторів.

На основі аналізу теоретичних положень [2] та експертного опитування як найважливішу критичну зону ХТС з точки зору **ресурсоефективності** було визнано башти гідратації-охолодження.

Отримані результати ранжування стали науковим підґрунтям для створення дерева відмов та розробки інтелектуальних алгоритмів стабілізації технологічного процесу. Задача пошуку першопричин аварій та ланцюгів наслідків розв'язувалася на основі методики створення бази знань ЕС діагностувального типу [7]. Фрагмент таблиці, яка дозволяє з'єднувати факти окремих аварій, наведено у табл. 2.

Для системного оцінювання цих ризиків та обґрунтування структури керування у статті враховано методологію ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013. Згідно з положеннями стандарту щодо аналізу складних систем з високим рівнем невизначеності, було застосовано комбінацію методу *FTA (Fault Tree Analysis)* – аналіз дерева аварійних ситуацій, ДАС) та експертних оцінок. На рис.3 зображено фрагмент ДАС для виробництва фосфорної кислоти.

До аварійних ситуацій виробництва термічної фосфорної кислоти належать наступні факти: погіршення показників якості продукції (за потреби – брак), зниження тиску (розгерметизація обладнання), перевищення ГДК шкідливих речовин, критичні значення режимних параметрів в апаратах тощо.

Традиційні ПД-регулятори в умовах експлуатаційного зносу обладнання та постійної нестабільності вхідних потоків сировини демонструють незадовільну якість перехідних процесів [11]. Це зумовлено тим, що лінійні структури стандартних регуляторів не здатні адаптуватися до суттєвої нелінійності хіміко-технологічних процесів та відчутного дрейфу характеристик теплообмінних поверхонь. Відповідно до концепції Т. Росса [12], у ситуаціях, коли інформація про стан процесу є неповною через агресивність середовища, використання жорстко налаштованих коефіцієнтів регулювання стає джерелом додаткових ризиків керування.

Дослідження [2] підтверджують, що найбільш ймовірною критичною подією ХТС є відхилення концентрації  $H_3PO_4$  на виході БГО за межі припус-

Таблиця 2

**Фрагмент бази знань системи підтримки прийняття рішень для БГО**

№ п/п	Ідентифікатор	Один. вимір.	Припустимі межі (верхня/нижня)	Ознака порушення	Наслідок порушення			Імовірн. Наслідку, %
					Ідентифікатор	Один. вимір.	Ознака поруш.	
1	Qфа	%	25	< 25	Qфкп1	%	< 73	85
			30	> 30			> 80	
2	Qфа	%	25	< 25	Qфк	°C	< 73	85
			30	> 30			> 80	
3	Fфа	м³/год	0.53	<0.53	Fфк	м³/год	< 0.2	60
			0.59	> 0.59			> 0.4	
...	...	...	...	...	...	...	...	...

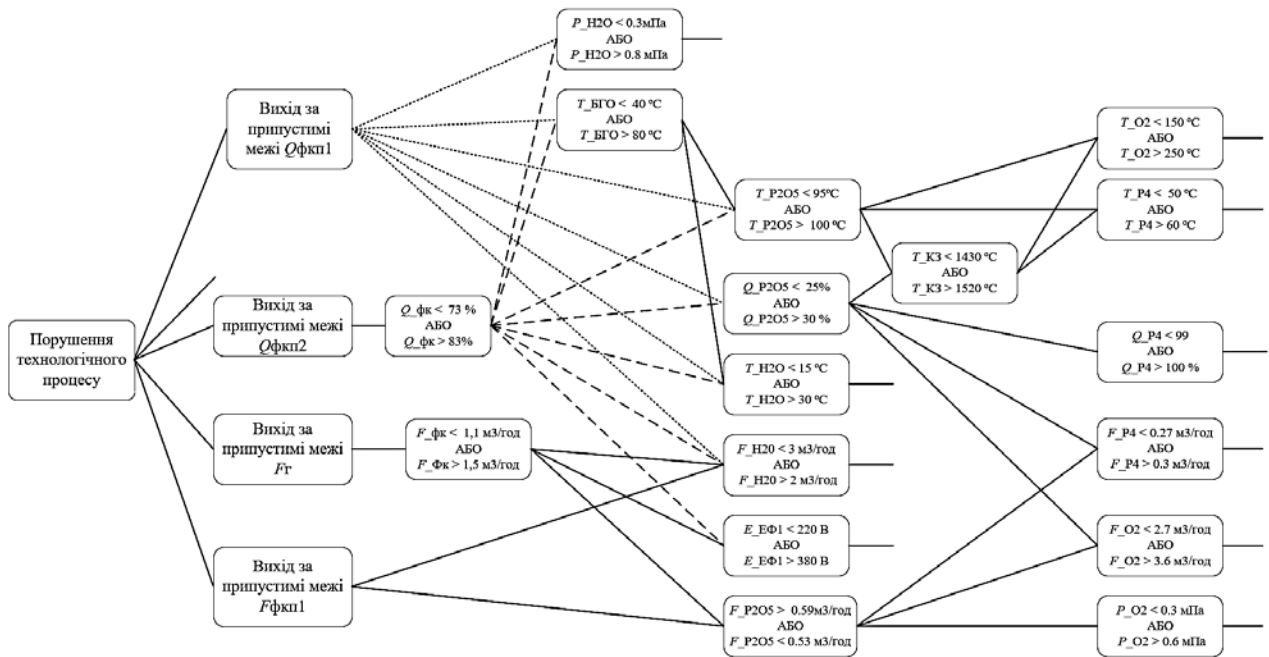


Рис. 3. Фрагмент дерева аварійних ситуацій для виробництва фосфорної кислоти:  $Q$  – концентрація,  $F$  – витрата,  $T$  – температура,  $P$  – тиск,  $E$  – напруга; фкп2 – потік фосфорної кислоти з ЕФ1, г – потік відфільтрованого газу

тимого діапазону, спричинене нестабільністю температури води та концентрації  $P_2O_5$  вхідних речовин. Впровадження нечіткої автоматичної системи керування (НчАСК) концентрації  $H_3PO_4$  на виході БГО (рис. 2) у цьому контексті розглядається як інструмент попередження аварійних ситуацій та зниження ризику до прийнятного рівня (принцип *As Low As Reasonably Practicable*, ALARP). Контур системи керування концентрації термічної фосфорної кислоти на виході з башти гідратації-охолодження ( $Q_{H_3PO_4}$ ), наведено на рис. 2.

Вхідними змінними нечіткого контролера є концентрація фосфорного ангідриду у речовині на вході в башту гідратації-охолодження ( $Q_{P_2O_5}$ ) та концентрація термічної фосфорної кислоти у її потоці на виході з башти гідратації-охолодження ( $Q_{H_3PO_4}$ ). Керувальна дія (вихідна змінна) – витрата води ( $F_{H_2O}$ ). На рис. 4 наведено графіки функцій належності для лінгвістичної змінної  $Q_{P_2O_5}$ . Практичне застосування системи дає змогу ефективно компенсувати стохастичні збурення, підтримуючи стабільну концентрацію кислоти на рівні 80% з мінімальним відхиленням.

Сформовано продукційні правила НчАСК. Одне з правил має вигляд:

**ЯКЩО Концентрація  $P_2O_5$  «висока» та Концентрація  $H_3PO_4$  «низька», ТО Витрата води повинна бути «висока».**

Використання *Fuzzy Logic Toolbox* дозволило візуалізувати поверхню відгуку системи (рис.5) та перевірити доцільність рекомендацій (рис.6).

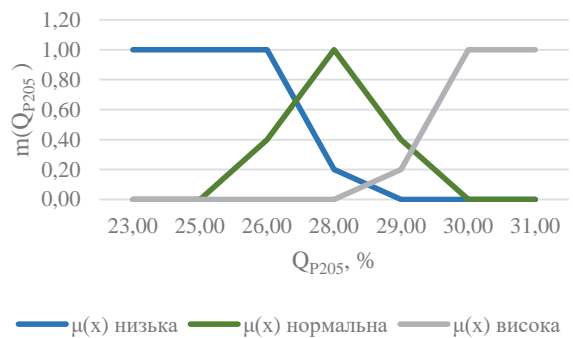


Рис. 4. Графік всіх функцій належності керувальної змінної «Концентрація  $P_2O_5$ »

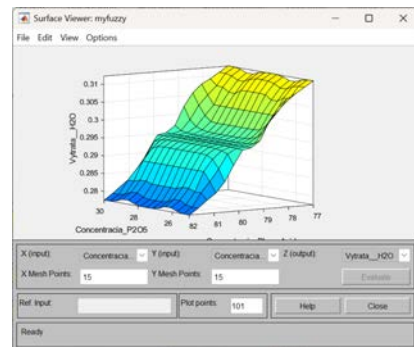


Рис. 5. Поверхня відгуку (Surface View) нечіткої системи керування

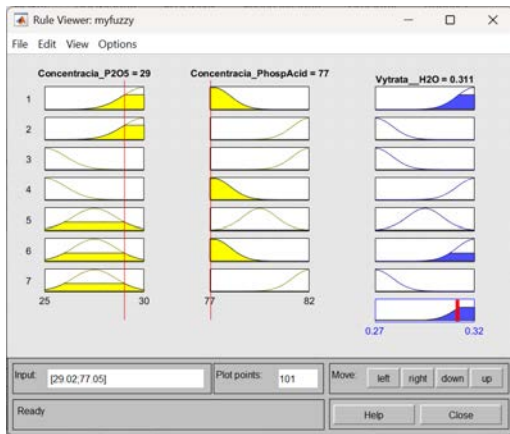


Рис. 6. Вікно програми перегляду роботи системи нечіткого висновку для значень вхідних змінних [29, 77]

**Висновки.** Предметом проведеного дослідження були процеси виробництва фосфорної кислоти термічним способом, а об'єктом дослідження – система керування з інтелектуальною підтримкою прийняття рішень, призначена для забезпечення ресурсоефективності виробництва. Як основні причини зниження ресурсоефективності були визначені порушення норм технологічного регламенту, що призводять до погіршення якості продукції, збільшення шкід-

ливих речовин та аварій із зупинкою обладнання. Запропоновано використовувати системи експертного оцінювання для поточних актуалізацій місць таких загроз в структурі ХТС. Виконано формалізацію зв'язків між окремими технологічними порушеннями режимів виробництва для формування бази знань аварійних ситуацій експертної системи. Запропонована нечітка автоматична система керування концентрації фосфорної кислоти після башти гідратації-охолодження зі врахуванням нестационарності властивостей потоку фосфорного ангідриду на вході в цю башту.

Наукова новизна дослідження полягає в об'єднанні трьох систем, побудованих на емпіричних знаннях, у цілісний контур, забезпечуючи комплексну інтелектуальну підтримку процесу автоматизованого керування.

Ця підтримка дозволяє впровадити більш глибокий підхід до моніторингу головних показників ХТС, обґрунтовано виконувати пошукові та відновлювані роботи після порушень, що має практичну цінність.

Отримані результати можуть бути використані для інших виробництв із небезпечними ресурсовитратними процесами та шкідливими речовинами.

#### Список літератури:

1. Source Category Survey: Thermal Process Phosphoric Acid Manufacturing Industry. US EPA, 1980. 120 p. (EPA-450/3-80-018). URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/91010OYY.TXT> (дата звернення: 24.03.2026)
2. Zan C. et al. Evaluation method for thermal processing of phosphoric acid with waste heat recovery. *Energy*. 2006. Vol. 31. P. 2791–2804.
3. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (IEC/ISO 31010:2009, IDT) : ДСТУ IEC/ISO 31010:2013. [Чинний від 2014-07-01]. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. 73 с. URL: <https://wiki.nazk.gov.ua/wp-content/uploads/2020/10/UA-dstu-31010.pdf> (дата звернення: 24.03.2026).
4. Bogarin Geymayr J. A., Ebecken N. F. F. An expert system for fault tree analysis. *Artificial Intelligence in Engineering*. 1993. Vol. 1. P. 741–752.
5. Noriyati R. D. et al. Hazard and Operability Study and Risk Management Case Study: Phosphoric Acid Concentration Process. *International Journal of Engineering & Technology*. 2016. Vol. 16, No. 01. P. 20–26.
6. Кисельов В. Б. та ін. Модель попередження надзвичайних ситуацій в системі підтримки прийняття рішень на об'єктах критичної інфраструктури. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75), № 2. С. 98–103. doi: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/13>
7. Експертні методи в автоматизованих системах керування : Формування та напрями використання експертних знань : [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Л. Д. Ярошук. – 2-ге вид., допов. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 43 с.
8. Чигур І. І., Чигур Л. Я. Огляд методів і напрямків розвитку технологій інтелектуальної підтримки прийняття рішень при автоматизації процесів керування. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35 (74), № 3. С. 248–255. doi: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/35>
9. Субботін С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. 341 с.
10. Savković-Stevanović J. B. A fuzzy logic controller for pH control of a chemical stirred tank. *Scientific Paper*. 1998. 66.012-52. URL: <https://scispace.com/pdf/a-fuzzy-logic-controller-for-ph-control-of-a-chemical-4qigirm359.pdf> (дата звернення: 24.03.2026)
11. Ross T. J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. 3rd ed. John Wiley & Sons, Ltd, 2010. 607 p.

**Yaroshchuk L.D., Savchenko T.V. EXPERT DECISION SUPPORT METHODS  
IN RESOURCE EFFICIENCY TASKS OF PHOSPHORIC ACID PRODUCTION**

*The article is devoted to the relevant topic of improving the reliability and resource efficiency of thermal phosphoric acid production, where heat and mass transfer processes occur at high temperatures involving substances hazardous to both equipment and the environment. The tasks of increasing the efficiency of this production are proposed to be solved by incorporating empirical expert knowledge into the software and mathematical support of computer-integrated control systems.*

*An analysis of the chemical-technological system as a whole, as well as individual technological control objects, was conducted to identify the causes of process non-stationarity, hazardous substances, emergency states, and their consequences. The root causes of these technological deviations are usually not immediately apparent, while the state of the objects during such periods requires rapid analysis, classification, localization of causes, and decision-making for their elimination. Without such a sequence of intellectual procedures, the mere observation of a violation does not allow for the rapid determination of an optimal search chain or the selection of corrective actions. Expert evaluation methods, specifically ranking, were used to identify and predict the most critical technological risk zones. For the specified production, it is proposed to consider two main directions of violations: environmental safety breaches and a decrease in resource efficiency indicators. The formalization of connections between individual technological violations in thermal phosphoric acid production modes has been performed. It is based on the proposed structural-parametric diagram of the technological system and expert experience. The foundation of a diagnostic expert system's knowledge base has been formed, contributing to a reduction in the time required to search for root causes of accidents and implement recovery actions. An automatic control system for finished phosphoric acid concentration based on fuzzy inference rules has been synthesized, allowing for the maintenance of product quality standards by accounting for raw material properties at the inlet of the hydration-cooling tower.*

**Keywords:** *phosphoric acid, thermal production process, expert evaluation system, expert system, knowledge base, control system, fuzzy system, non-stationarity, resource efficiency, reliability.*

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026