

**183 ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО  
СЕРЕДОВИЩА**

УДК 504.064:662.74:66.097.3

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359939

**ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ КОКСОХІМІЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ  
ШЛЯХОМ КАТАЛІТИЧНОГО ЗНЕШКОДЖЕННЯ ВИКИДІВ  
НА ІНТЕРМЕТАЛІДНИХ Fe-Al КАТАЛІЗАТОРАХ**

- Бєлоконь К.В.** канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2000-4052>, e-mail: [kv.belokon@gmail.com](mailto:kv.belokon@gmail.com);
- Мальований М.С.** д-р техн. наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3868-1070>, e-mail: [myroslav.mal@gmail.com](mailto:myroslav.mal@gmail.com);
- Проскурнін О.А.** д-р техн. наук, ст. наук. співробітник, Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», м. Харків, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9774-9306>, e-mail: [proskurnin\\_o@ukr.net](mailto:proskurnin_o@ukr.net)

Проблема захисту повітряного басейну від викидів підприємств коксохімічного виробництва є актуальною, оскільки у викидах містяться токсичні вуглеводні, такі як фенол, бензол, нафталін та інші. Для знешкодження відхідних газів коксохімічного виробництва доцільним є застосування каталітичного методу. Суттєво знизити забруднення атмосферного повітря можна шляхом використання інтерметалідних залізо-алюмінієвих каталізаторів із добавками перехідних металів. У статті визначено оптимальний склад та параметри експлуатації каталізатора, що забезпечують його максимальну ефективність: частку Al у суміші Al/Fe, кількість лежучої добавки Mn та робочу температуру. З цією метою за експериментальними даними побудовано регресійну залежність ефективності очищення газів від зазначених параметрів. Шляхом розв'язання оптимізаційної задачі отримано такі оптимальні значення робочої температури, частки Al у суміші Al/Fe та кількості добавки марганцю:  $T = 299,16^\circ\text{C}$ ,  $p = 50,51\%$ ,  $f = 10,14\%$  відповідно. Математичне очікування ефективності очищення газів при цьому становитиме 96,18%. Впровадження інтерметалідних каталізаторів на підприємстві ПрАТ «Запоріжжєкокс» дозволить модернізувати виробництво за європейськими екологічними стандартами. Високий ступінь очищення (понад 96%) при достатньо низькій температурі очищення газів (близько  $300^\circ\text{C}$ ) дозволяють зробити інтерметалідний каталізатор конкурентоспроможним порівняно з дорогими аналогами на основі благородних металів. Результати проведених досліджень можуть бути використані в період післявоєнного відновлення України з метою забезпечення екологічної безпеки підприємств коксохімічного виробництва.

**Ключові слова:** забруднення атмосфери; органічні речовини; коксохімічне виробництво; вуглеводні; інтерметалідний каталізатор; перехідні метали; ефективність очищення; оптимізація; робоча температура.

**Постановка проблеми**

Проблема охорони навколишнього середовища протягом останніх років є актуальною для всіх промислово розвинутих регіонів. [1]. Зокрема джерелом інтенсивного забруднення повітря робочих зон і оточуючого середовища пилом та шкідливими газами є коксохімічне виробництво.

Токсичні органічні речовини, що утворюються в процесі коксохімічного виробництва, являють собою складну суміш із високим рівнем перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ), частина яких має яскраво виражені канцерогенні та мутагенні властивості, викликають лейкемію, вроджені вади тощо. Канцерогенні властивості речовин посилюються іншими продуктами – сажею, смолами, олівами [2].

Питомі викиди в середньому по коксохімічних заводах становлять 4,48 кг/т коксу. Цей показник є

досить високим порівняно з європейським, де питомі викиди становлять 2-3 кг/т коксу [3].

При існуючій технології виробництва, вловлювання та переробки хімічних продуктів коксування джерела викидів коксохімічних заводів є різноманітними як за обсягом викидів, так і за складом хімічних забруднень, і кожен із них потребує окремих технічних рішень та значних вкладень коштів для поліпшення екологічної ситуації [4].

Підвищена екологічна небезпека викидів токсичних органічних речовин визначає важливість робіт із впровадження технологій їхнього знешкодження [5].

Найбільш суттєвий вплив на стан повітряного середовища під час виготовлення коксу чинять ділянки підготовки шихти, блоки нагріву печей, а також вузли завантаження сировини та вивантаження готового продукту. Крім того, значна емісія спостерігається на етапах охолодження, сортування та на коксових рампах. Кожна стадія циклу характеризується специфічним переліком імпактних сполук, проте комплексна очистка

багатокомпонентних викидів коксохімії наразі залишається нерозв'язаною технічною проблемою.

Пошук ефективних способів дезактивації кожного окремого виду емісій у коксохімії виступає фундаментальним завданням сучасної інженерної екології. Це зумовлено необхідністю впровадження державних програм з охорони атмосфери та вдосконалення стандартів безпеки праці на великих індустріальних об'єктах. Створення систем поетапного очищення відхідних газів є ключем до сталого розвитку галузі, що гарантує підвищення якості життя населення та створення ергономічного й безпечного простору на робочих місцях.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Вибір методу очищення газових викидів насамперед залежить від концентрації забруднюючих речовин і можливості утилізації вловлених продуктів. На сьогодні для нейтралізації аналогічних викидів застосовуються електростатичне осадження, адсорбційний та абсорбційний методи, метод термічного допалювання, а також каталітичний метод [5].

Електростатичне осадження смолистих речовин є найпоширенішим способом знешкодження газів, що містять ПАВ. До переваг способу можна віднести його нескладність, відносно дешевизну, простоту в обслуговуванні. Однак залишкова концентрація токсичних органічних речовин у очищених газах, що викидаються в атмосферу, залишається значною, що не відповідає існуючим санітарним нормам.

Адсорбційний метод очищення є одним із найпоширеніших засобів захисту навколишнього середовища. Його суть полягає в поглинанні твердими, переважно пористими тілами шкідливих домішок. Цей метод дозволяє повернути у виробництво низку цінних сполук. Проте невелика швидкість очищення, відсутність можливості очищення запиленних газів, а також висока енергомісткість є вагомими недоліками зазначеного методу.

Абсорбційний метод очищення застосовують для викидів, забруднювальні речовини яких добре розчиняються в абсорбенті, при цьому концентрація забруднювальної речовини в газовому потоці має бути більшою за 1,0% [6]. Абсорбцію застосовують для очищення викидів від сірководню, інших сірчистих сполук, парів сульфатної та хлоридної кислот, ціаністких сполук, органічних речовин (фенолу, формальдегіду тощо) [7]. Найчастіше абсорбентом слугує вода, також застосовуються розчини лугу, сульфату натрію, сечовини та інші органічні рідини. Недоліками цього методу є висока вартість очищення, додаткові витрати на регенерацію абсорбенту, необхідність виділення значних виробничих площ для організації процесу газоочищення.

У роботі [8] для боротьби з бензапіреном використовують спосіб опромінення його газових молекул ультрафіолетовим випромінюванням електричного

розряду в інтервалі довжин хвиль 340-410 нм з середньою щільністю світлової енергії  $10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-1}$  Дж/см<sup>2</sup> при робочих температурах від -20°C до + 80°C. При цьому ефективність нейтралізації досягає 35%.

Очищення газових емісій методом термічного допалювання передбачає термічне розкладання шкідливих агентів (передусім вуглеводнів) до мінімально небезпечних метаболітів. Реалізація даного підходу за температурного регламенту 750-1200°C дозволяє радикально знизити концентрацію забруднювальних речовин у викидах [5]. Висока результативність такої нейтралізації робить цей метод одним із найбільш надійних рішень для досягнення жорстких екологічних нормативів очищення повітряного басейну. Також його перевагами є невеликі габарити установок і простота їх експлуатації. Недоліками термічного допалювання відхідних газів є утворення оксидів азоту в процесі високо-температурного горіння та значна витрата палива.

Застосування гетерогенних каталізаторів у системах газоочистки характеризується високою адаптивністю до складу емісій [9]. Ця технологія забезпечує ефективну конверсію сполук сірки, азоту, а також вуглеводнів та оксиду вуглецю (CO) у термодинамічно стійкі та екологічно нейтральні продукти [10]. Важливою перевагою каталітичного методу є можливість селективної обробки розбавлених газових потоків без генерування побічних токсикантів у безперервному циклі. Втім, широке впровадження таких систем часто стримується дефіцитом доступних каталітичних композицій, які б поєднували низьку собівартість із високою стійкістю до дезактивації протягом тривалого часу. Тому є актуальною розробка відносно дешевих та ефективних способів очистки викидних газів підприємств коксохімічного виробництва.

### Мета статті

Метою роботи є розробка інтерметалідного каталізатора для знешкодження токсичних викидів коксохімічного виробництва, оптимізація його складу та параметрів експлуатації (на прикладі підприємства ПрАТ «Запоріжжкокс»).

### Виклад основного матеріалу

Підприємство ПрАТ «Запоріжжкокс» спеціалізується на випуску коксу 6% вологості та пековому коксу.

Супутньою продукцією є коксовий газ і продукти його очищення та переробки – смола кам'яновугільна, кам'яновугільні оливи, сульфат амонію, бензол та газова сірка.

У своєму складі підприємство ПАТ «Запоріжжкокс» має наступні цехи: залізничний, вуглепідготовчий, коксовий, уловлювання, смолоперегонного виробництва, сіркоочищення, ремонтно-механічний, енергоцех, безрейкового транспорту.

Технологічна схема коксохімічного виробництва представлена на рис. 1.

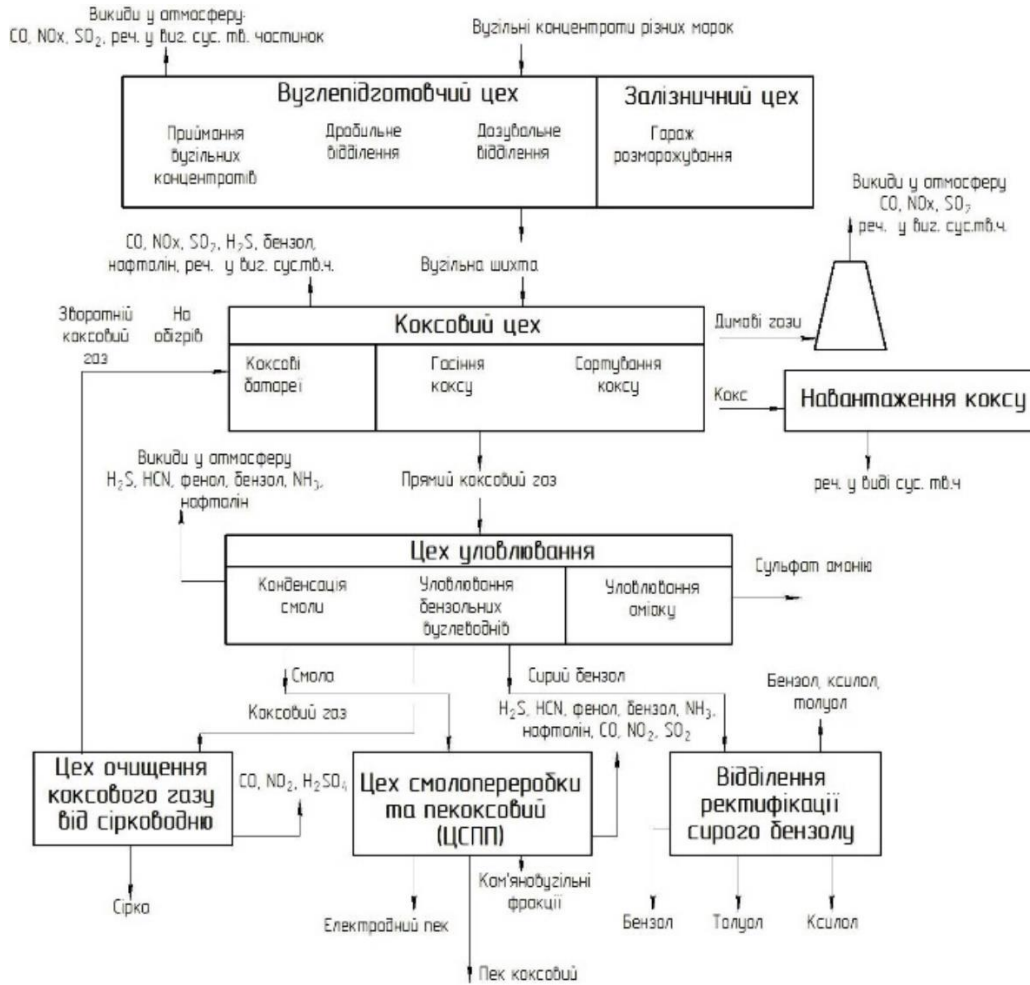


Рис. 1 – Технологічна схема коксохімічного виробництва ПрАТ «Запоріжкокс»

Основним завданням цеху смологонного виробництва є переробка кам'яновугільної смоли з метою виділення з неї компонентів, доведення їх до якісних показників готової продукції та виробництво електродного пеку.

До складу цеху входять такі підрозділи: склад смоли, відділення дистиляції смоли, установки по отриманню електродного пеку, склад масел; відділення мийки масел і склад реактивів, біохімічного очищення [5].

Початковою сировиною для цеху є кам'яновугільна смола – продукт коксування вугілля. Оскільки смола має перебувати у в'язкому стані, резервуари постійно підігріваються, переважно паром. Температура підтримання смоли у придатному для переробки стані становить від 70 до 80°C. При такій температурі відбувається виділення летких компонентів смоли, які є токсичними речовинами, які потребують знешкодження перед викидом в атмосферу. Усереднений склад викидів складу смоли представлено в табл. 1. При аналізі наведених даних, враховуючи токсичність викидів,

особливу увагу слід приділити знешкодженню фенолу, бензолу та нафталіну.

Каталітичний метод в умовах ПрАТ «Запоріжкокс» на дільниці складу смоли реалізовано наступним чином. Установка каталітичного знешкодження газових викидів складу смоли включає два каталітичні апарати (реактори), які підключені паралельно, та тягодутьовий пристрій. Схема установки представлена на рис. 2.

Попередньо очищені на абсорбційних установках викиди надходять у каталітичний реактор (рис. 3), проходять через трубчастий теплообмінник, де їхня температура підвищується до 200-250°C (з використанням тепла очищених газів). Після теплообмінника газ спрямовується в зону електронагрівальних елементів, де нагрівається до температури 300-450°C. Ця температура є достатньою для швидкого перебігу хімічних реакцій окиснення ароматичних вуглеводнів за допомогою інтерметалічних залізо-алюмінієвих каталізаторів. У шарі каталізатора відбувається реакція окиснення вуглеводнів газоповітряної суміші до практично нешкідливих діоксиду вуглецю та води.

Таблиця 1

Склад основних викидів дільниці зберігання смоли ПрАТ «Запоріжжкокс»

Найменування речовини, хімічна формула	Концентрація речовини, мг/м <sup>3</sup>	ГДК, мг/м <sup>3</sup>	Клас небезпеки	Вплив на здоров'я людини
Сірководень, H <sub>2</sub> S	20,26	0,008	2	Токсичний газ із запахом тухлих яєць, порушує обмін речовин та викликає сильні головні болі, нудоту і набряк легень при гострому отруєнні.
Ціанід водню, HCN	20	0,01	2	Дуже сильна отрута, викликає кисневе голодування тканин (гіпоксію), що найперше вражає центральну нервову систему та серце.
Фенол, C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	11,83	0,003	2	Високотоксична сполука, подразнює слизові оболонки. Вражає нирки, печінку та органи дихання.
Бензол, C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	123	0,8	2	Тривалий вплив призводить до ураження кісткового мозку, порушення кровотворення (анемія, лейкемія).
Нафталин, C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	373	0,003	4	Летка сполука з характерним запахом, токсична при вдиханні. Викликає руйнування еритроцитів (гемоліз), що призводить до пожовтіння шкіри та пошкодження нирок.

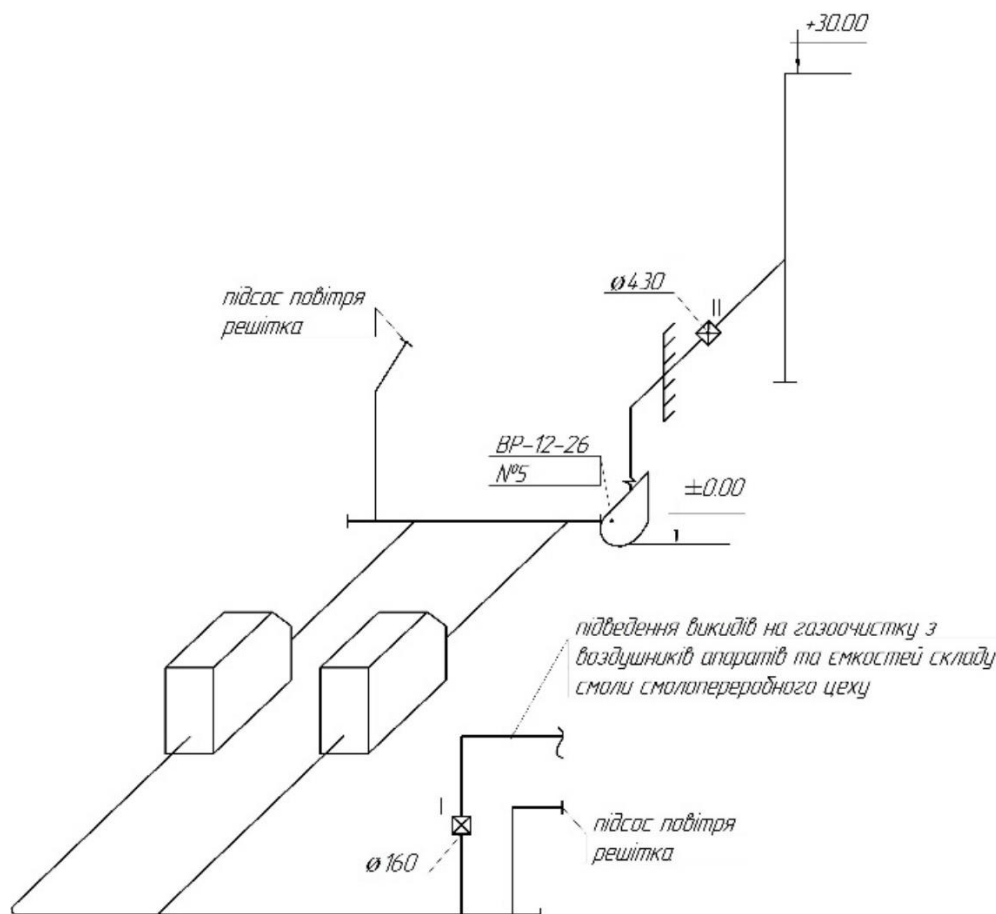


Рис. 2 – Схема утворення та відведення забруднюючих речовин від технологічного обладнання складу смоли смолопереробного цеху

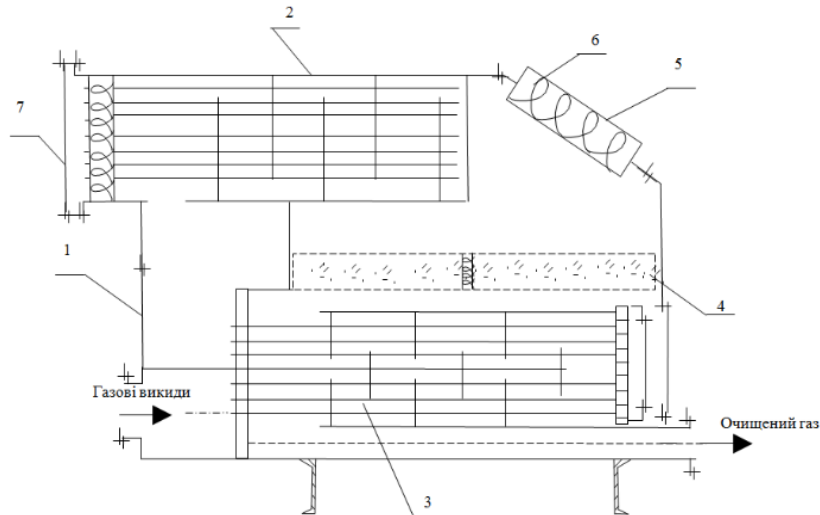


Рис. 3 – Будова термokatалітичного реактора: 1 – корпус; 2 – трубчастий електронагрівач; 3 – труба теплообмінна; 4 – елемент з каталізатором; 5 – корпус електронагрівача, 6 – нагрівальний елемент (ТЕН або спіраль), 7 – кришка

Очищений у термokatалітичному реакторі гарячий газ спрямовують у теплообмінник, у якому його теплом підігрівають забруднений газ, що надходить на очищення. Охолоджений у теплообміннику очищений газ за допомогою димососа через димову трубу викидається в атмосферу.

Альтернативною коштовним каталізаторам у сфері екологічної безпеки стали розроблені марганецьвмісні інтерметаліди на основі заліза та алюмінію. Вибір компонентів обумовлений їхньою здатністю забезпечувати глибоке окиснення токсичних домішок у промислових викидах, поєднуючи це з відмінною термостійкістю та структурною цілісністю контактів. У зв'язку з цим було вирішено розробляти каталізатори на основі інтерметалідів Fe-Al стехіометричного складу  $FeAl_3$ , які синтезовані методом теплового самозаймання [11]. Для збільшення каталітичних властивостей отримані зразки піддавали легуванню перехідними металами в різних концентраціях.

Процедура виготовлення каталітичних систем базувалася на послідовному виконанні операцій з дозування та гомогенізації вихідних компонентів, після чого здійснювалося формування циліндричних пресовок. Використовувалися порошкові фракції з розміром частинок 100-150 мкм, а питоме навантаження при пресуванні варіювалося в межах 30-100 кН. Підготовлену заготовку піддавали контрольованому нагріву в інертній атмосфері всередині матриці для гарячого пресування до моменту ініціювання екзотермічної реакції. Завдяки ефекту теплового самозаймання забезпечувався миттєвий підйом температури по всьому масиву зразка. Завершальний етап включав ізотермічну витримку при 390-460°C протягом 30-60 хвилин із паралельним механічним допресовуванням синтезованого продукту.

Синтезовані сплави піддавали механічному подрібненню з подальшим розсівом для виділення

робочої фракції зернистістю 0,1-0,3 мм. Ключовим етапом формування активної структури була хімічна модифікація поверхні (лужна активація) [12]. Формування скелетного типу каталізатора здійснювали через селективне вилугування алюмінієвої фази з інтерметаліду за допомогою 20%-го водного розчину гідроксиду натрію або калію. Для безпеки та стабілізації системи надлишковий водень нейтралізували пероксидом водню. Завершальний цикл підготовки включав демінералізовану промивку на фільтрувальних установках до досягнення нейтрального показника середовища та подальшу дегідратацію зразків у термостаті при 120°C.

Ефективність інтерметалідного залізо-алюмінієвого (Fe-Al) каталізатора з добавками перехідних металів (мідь, марганець, кобальт, нікель та інші) у каталітичному очищенні газів залежить від складної взаємодії декількох ключових факторів, пов'язаних як із самим матеріалом, так і з умовами проведення реакції. Головними з них є склад і структура каталізатора, метод його синтезу та параметри процесу.

Ідеальне співвідношення Fe:Al та вибір промотора перехідного металу залежатимуть від конкретного застосування, будь то гідрування, метанування чи очищення газу, оскільки кожен з них вимагає різних властивостей для максимальної ефективності та стабільності.

Як добавку до складу каталізатора розглядали марганець, який відіграє роль промотора – змінює фізико-хімічні властивості каталізатора. Добавка марганцю запобігає спіканню (злипання) активних частинок каталізатора при робочих температурах, знижує температуру початку реакції окислення, саме тому можна досягти високої ефективності очищення газових викидів при відносно низькій температурі.

Вихідний матеріал зазвичай має вміст алюмінію від 50% до 70% за вагою. Цей діапазон є гарною відповідною точкою для досягнення високопористої

структури після вилугування. Кількість додаткових перехідних металів зазвичай варіюється від 1% до 20% від загальної ваги сплаву, залежно від конкретного металу та бажаної каталітичної властивості (наприклад, підвищеної активності, нижчої робочої температури або покращеної стійкості до отруєнь). Невелика кількість добавки може значно підвищити активність і стабільність, діючи як промотор. Однак надмірна концентрація часто призводить до агломерації (спікання) частинок добавки, блокування активних центрів і зниження загальної ефективності.

Для пошуку оптимальних параметрів каталізатора були проведені експериментальні випробування, де систематично змінюються пропорції кожного компонента з подальшою метою знайти найкращий баланс між активністю, стабільністю та економічною ефективністю для певного застосування.

Таким чином, оптимізованими змінними є: робоча температура очищення газів ( $T$ ), частка Al у суміші Al/Fe ( $p$ ) та кількість добавки ( $f$ ).

Оптимізаційна задача розв'язувалася класичним методом математичного програмування. Функція мети, яка максимізується,  $E$  являє собою ефективність очищення газових викидів.

Обмеження визначаються технічними можливостями виробництва та експлуатації каталізаторів.

Для розв'язання поставленої задачі виконуються такі дії:

1. Проводиться ряд експериментів із визначення ефективності очищення газових викидів ( $e$ ) при різних значеннях оптимізованих змінних.

2. За вибіркою  $\{T_i, p_i, f_i, e_i\}^N$  будується функція регресії [13]:

$$E = E(T, p, f). \quad (1)$$

Визначення параметрів регресії проводилося за допомогою відповідної функції Excel. Рівень значущості було обрано 95%.

3. Робиться висновок про статистичну значущість розрахованих параметрів регресії на основі перевірки нульової гіпотези – гіпотези про рівність нулю

відповідного параметра за всією генеральною сукупністю можливих комбінацій розглянутих випадкових величин [14]. Згідно з [15], нульова гіпотеза відхиляється (і, таким чином, параметр регресії вважається статистично значущим) за умови виконання наступної нерівності:

$$0 \notin [\gamma - t_{\alpha, N-m-1} \cdot \sigma_\gamma], \quad (2)$$

де  $\gamma$  – параметр регресії;  $N$  – обсяг вибірки;  $\alpha$  – прийнятий рівень значущості;  $m$  – кількість незалежних змінних моделі (регресорів);  $t_{\alpha/2, N-m-1}$  – квантиль розподілу Стьюдента порядку  $\alpha/2$  при кількості ступенів вільності  $N-m-1$ ;  $\sigma_\gamma$  – середньоквадратичне відхилення величини  $\gamma$ .

4. Перевіряється адекватність моделі вихідним даним за допомогою критерію Фішера, який полягає у порівнянні розрахункової величини:

$$F_{розр} = F_{m, N-m-1} = \frac{(N-m-1) \cdot \sum_{i=1}^N (E_i - e_{cp})^2}{m \cdot \sum_{i=1}^N (E_i - e_i)^2}, \quad (3)$$

де  $e_{cp}$  – вибіркове середнє величини  $e$ , з критичним значенням  $F_{крит}$ , що дорівнює квантилі  $F$ -розподілу для прийнятого рівня значущості  $\alpha$  та кількості ступенів вільності  $m$  і  $N-m-1$  [16].

Якщо  $F_{крит} < F_{розр}$ , то отриману регресійну модель можна вважати адекватною вихідним даним із рівнем надійності  $P = 1 - \alpha$ .

5. За допомогою функції Excel «Пошук розв'язання» визначаються оптимальні значення змінних  $T$ ,  $p$ ,  $f$ , що забезпечують максимум функції мети (1) при заданих обмеженнях.

Значення варійованих змінних та величина ефективності очищення газових викидів наведені в табл. 1.

Шукана функція регресії визначалася у вигляді такої функції другого порядку [17]:

$$E = a_{00} + a_{11} \cdot T + a_{12} \cdot p + a_{13} \cdot f + a_{31} \cdot p \cdot f + a_{21} \cdot T^2 + a_{22} \cdot p^2 + a_{23} \cdot f^2 \quad (4)$$

Таблиця 1

Значення варійованих змінних та величина ефективності очищення

Температура, $T$ , °C	Частка Al у суміші Al та Fe, $p$ , %	Кількість добавки, $f$ , %	Ефективність очищення, $E$ , %
100	30	5	36,42
100	30	10	36,45
100	30	15	36,28
100	50	5	77,60
100	50	10	78,78
100	50	15	79,65
100	70	5	37,70
100	70	10	42,06
100	70	15	42,57

Продовження табл. 1

Температура, $T$ , °C	Частка Al у суміші Al та Fe, $p$ , %	Кількість добавки, $f$ , %	Ефективність очищення, $E$ , %
300	30	5	55,46
300	30	10	57,22
300	30	15	57,30
300	50	5	97,05
300	50	10	99,05
300	50	15	100,04
300	70	5	57,87
300	70	10	60,29
300	70	15	62,57
400	30	5	51,31
400	30	10	51,51
400	30	15	51,55
400	50	5	90,93
400	50	10	94,34
400	50	15	94,85
400	70	5	52,11
400	70	10	56,27
400	70	15	58,02

Наявність доданка  $a_{31} \cdot p \cdot f$  пояснюється можливою взаємозалежністю кількості добавки та частки алюмінію у складі каталізатора. У табл. 2 наведено

результати оцінки параметрів регресії та межі довірчого інтервалу.

Таблиця 2

Розрахунок параметрів регресії

Параметр регресії	Розрахункове значення	Межі довірчого інтервалу		Висновок про статистичну значущість параметра
		нижня	верхня	
$a_{00}$	-201,548	-205,254	-197,842	значущий
$a_{11}$	0,301	0,289	0,312	значущий
$a_{12}$	10,009	9,888	10,130	значущий
$a_{13}$	0,291	-0,117	0,699	незначущий
$a_{31}$	0,011	0,008	0,015	значущий
$a_{21}$	-0,001	-0,001	-0,001	значущий
$a_{22}$	-0,100	-0,101	-0,099	значущий
$a_{23}$	-0,028	-0,047	-0,010	значущий

Як видно з таблиці, взаємозв'язок різних факторів у проведеному експерименті виявився незначущим.

Таким чином, функція регресії, що є одночасно цільовою функцією в межах оптимізаційної задачі [13, 18, 19], має такий вигляд:

$$E = -201.548 + 0.301 \cdot T + 10.009 \cdot p + 0.291 \cdot f - 0.001 \cdot T^2 - 0.100 \cdot p^2 - 0.028 \cdot f^2 \quad (5)$$

Адекватність моделі (5) була перевірена за допомогою критерію Фішера. Рівень значущості обрано 0,05. Розрахункова та критична величини дорівнюють відповідно:  $F_{розр} = 1004,60$ ,  $F_{крит} = 8,64$ . Оскільки  $F_{крит} < F_{розр}$ , то отриману регресійну модель можна вважати адекватною вихідним даним із рівнем надійності 95%.

Обмеження оптимізаційної задачі зумовлені технологічними причинами (табл. 3).

Таблиця 3

Обмеження оптимізаційної задачі

Температура, $T$ , °C		Частка Al у суміші Al та Fe, $p$ , %		Кількість добавки, $f$ , %	
min	max	min	max	min	max
100	400	30	70	5	15

Розв'язуючи оптимізаційну задачу за допомогою функції Excel «Пошук розв'язання», були отримані такі оптимальні значення параметрів, що забезпечують максимальну ефективність каталізатора:  $T = 299,16^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 50,51\%$ ,  $f = 10,14\%$ . Підставляючи значення оптимальних параметрів у (5), отримуємо математичне очікування максимальної ефективності очищення:  $E = 96,18\%$ .

### Висновки

Функціонування коксохімічних підприємств супроводжується масивною емісією токсикантів у приземний шар атмосфери. Основну загрозу становлять багатоконпонентні асоціації поліциклічних ароматичних вуглеводнів, що генеруються під час термічної переробки вугілля. Дані сполуки характеризуються високою біологічною активністю, проявляючи кумулятивні канцерогенні та генотоксичні ефекти. Тривалий вплив таких аерозолів корелює з ризиками виникнення онкогематологічних захворювань, серйозними порушеннями ембріогенезу та стійкими мутаційними змінами в організмі людини.

Для знешкодження відхідних газів коксохімічного виробництва доцільним є застосування каталітичного методу. Суттєво знизити забруднення атмосферного повітря можна шляхом використання інтерметалідних залізо-алюмінієвих каталізаторів із добавками перехідних металів, що синтезовані методом теплового самозаймання. Каталізатор одержували шляхом вилуговування отриманого інтерметаліду лугом з подальшим видаленням залишкового водню розчином перекису водню. Каталізатори, які отримані з інтерметалідних прекурсорів на основі заліза та алюмінію, виявили досить високу каталітичну активність.

Впровадження розробленого інтерметалідного залізо-алюмінієвого каталізатора з добавкою Mn в системах газоочищення на підприємстві ПрАТ «Запоріжжя-кокс» дозволить модернізувати виробництво за європейськими екологічними стандартами. Високий ступінь знешкодження (понад 96%) при порівняно низькій температурі очищення газів (близько  $300^{\circ}\text{C}$ ) дозволяють зробити інтерметалідний каталізатор конкурентоспроможним порівняно з дорогими аналогами на основі благородних металів. Результати проведених досліджень можуть бути використані в період післявоєнного відновлення України з метою забезпечення екологічної безпеки підприємств коксохімічного виробництва.

### Перелік використаних джерел

- [1] Белоконь К. В., Тулушев С. О. Аналіз впливу технологій промислових підприємств та автотранспорту на стан екологічної безпеки атмосферного повітря (на прикладі м. Запоріжжя) : монографія. Запоріжжя : ВД «Гельветика», 2020. 230 с.
- [2] Health risk assessment of hazardous VOCs and its associations with exposure duration and protection measures for coking industry workers / L. Cheng et al. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 379. Article 134919. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134919>.
- [3] Assessment of ultralow emission standards and emission abatement potential of China's coking industry via real-time monitoring data / L. Tang et al. *Energy*. 2026. Vol. 344. Article 139818. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139818>.
- [4] Greenhouse Gas Emissions by the Chinese Coking Industry / X. Ge et al. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2016. Vol. 25(2). Pp. 593–598. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/61065>.
- [5] Ecological aspects of the neutralization of gas emissions leaving from the resin storehouse of Joint-stock company «Zaporozhkoks» / V. Rumiantsev et al. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. No. 4. Pp. 105–109.
- [6] Energy, safety, and absorption efficiency evaluation of a pilot-scale H<sub>2</sub>S abatement process using MDEA solution in a coke-oven gas / J. Park et al. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9. Article 105037. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105037>.
- [7] Removal of hydrogen sulfide from coke oven gas by catalytic oxidative absorption in a rotating packed bed / H. Zou et al. *Fuel*. 2017. Vol. 204. P. 47–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.05.017>.
- [8] Тишук В. Ю. Вплив коксохімічних процесів на забруднення повітря робочих зон і розробка засобів його очищення і покращення умов праці. *Збірник наукових праць НГУ*. 2017. № 51. С. 226–233.
- [9] Черненко Я. М., Волошин М. Д., Ларичева Л. П. Каталізатори та сорбенти : навч. посібник. Кам'янське : ДДТУ, 2017. 317 с.
- [10] Constructing active copper species in Cu-zeolites for coal-gas-SCR and elucidating the synergistic catalytic function of CuO and Cu<sup>2+</sup> ion species / J. Cheng et al. *Environmental Science: Nano*. 2022. Vol. 9. Pp. 2372–2387. DOI: <https://doi.org/10.1039/d2en00269h>.
- [11] Жаромічний інтерметалідний сплав : пат. 107101 Україна : МПК C22C 1/05 (2006.01), C22C 19/03 (2006.01). № u 2015 10428 ; заявл. 26.10.2015 ; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.
- [12] Белоконь К. В. Розробка інтерметалідних каталізаторів для знешкодження вуглецевмісних компонентів газових викидів в атмосферу : монографія. Херсон : Видавничий дім «Гельветика», 2019. 174 с.
- [13] Малайчук В., Клименко С., Астахов Д. Комп'ютерна обробка вимірювань в задачах спостереження за станом технічних об'єктів. *Вісник Дніпровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка*. 2023. Вип. 30(4). С. 99–106. DOI: <https://doi.org/10.15421/452213>.
- [14] Федоренко О. Д., Клим В. Ю., Клименко С. В. Непараметрична статистика випадкових величин з

невідомими функціями розподілу ймовірності. *Системні технології*. 2025. Вип. 5(160). С. 101–111. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-11>.

- [15] Турчин В. М. Теорія ймовірностей і математична статистика : підручник. Дніпропетровськ : ІМА-прес, 2014. 556 с.
- [16] Fisher's Linear Discriminant. URL: [https://dafriedman97.github.io/mlbook/content/c3/s1/fisher\\_discriminant.html](https://dafriedman97.github.io/mlbook/content/c3/s1/fisher_discriminant.html) (дата звернення: 05.11.2025).
- [17] Godliuk V. Mathematical Models for Management Information Systems on Digital Platforms: from

Resource Management to Demand Forecasting. *Cybernetics and Computer Technologies*. 2025. Vol. 2. Pp. 37–46. DOI: <https://doi.org/10.34229/2707-451X.25.2.3>.

- [18] Димченко А. В., Панфілов О. Г., Клименко С. В. Система оптичної обробки даних. *Вісник Дніпровського університету. Серія: Ракетно-космічна техніка*. 2024. Вип. 33(4). С. 98-107. DOI: <https://doi.org/10.15421/452431>.
- [19] Bkshytynov V. Computational Optimization: Success in Practice. Chapman and Hall/CRC, New York, 2023. 414 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003275169>.

## IMPROVING THE ENVIRONMENTAL SAFETY LEVEL OF COKE-CHEMICAL ENTERPRISES THROUGH CATALYTIC EMISSION NEUTRALIZATION ON INTERMETALLIC FE-AL CATALYSTS

<b>Belokon K.V.</b>	<i>PhD (Engineering), associate professor, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0003-2000-4052">https://orcid.org/0000-0003-2000-4052</a>, e-mail: <a href="mailto:kv.belokon@gmail.com">kv.belokon@gmail.com</a>;</i>
<b>Malovany M.S.</b>	<i>D.Sc. (Engineering), professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-3868-1070">https://orcid.org/0000-0002-3868-1070</a>, e-mail: <a href="mailto:myroslav.mal@gmail.com">myroslav.mal@gmail.com</a>;</i>
<b>Proskurnin O.A.</b>	<i>D.Sc. (Engineering), senior researcher, Research Institution «Ukrainian Scientific Research Institute of Ecological Problems», Kharkiv, ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0001-9774-9306">https://orcid.org/0000-0001-9774-9306</a>, e-mail: <a href="mailto:proskurnin_o@ukr.net">proskurnin_o@ukr.net</a></i>

*Protection of the air basin from emissions produced by coke-chemical plants is a critical issue, as these emissions contain toxic hydrocarbons such as phenol, benzene, naphthalene, and others. To neutralize the waste gases of coke-chemical production, the application of the catalytic method is most appropriate. Atmospheric air pollution can be significantly reduced by using intermetallic iron-aluminum catalysts with transition metal additives. This article determines the optimal composition and operational parameters of the catalyst that ensure maximum efficiency: the fraction of Al in the Al/Fe mixture, the amount of the Mn alloying additive, and the operating temperature. To this end, a regression dependence of gas cleaning efficiency on the specified parameters was constructed based on experimental data. By solving the optimization problem, the following optimal values for the operating temperature, the Al fraction in the Al/Fe mixture, and the amount of manganese additive were obtained:  $T = 299.16^{\circ}\text{C}$ ,  $p = 50.51\%$ , and  $f = 10.14\%$ , respectively. Under these conditions, the mathematical expectation of gas cleaning efficiency is 96.18%. The implementation of intermetallic catalysts at the Private Joint-Stock Company «Zaporizhkoks» plant will allow for the modernization of production in accordance with European environmental standards. The high degree of purification (over 96%) at a relatively low cleaning temperature (approximately  $300^{\circ}\text{C}$ ) makes the intermetallic catalyst competitive compared to expensive analogs based on noble metals. The research results can be utilized during the post-war recovery of Ukraine to ensure the ecological safety of coke-chemical production enterprises.*

**Keywords:** *air pollution; organic substances; coke-chemical production; hydrocarbons; intermetallic catalyst; transition metals; purification efficiency; optimization; operating temperature.*

### References

- [1] K. V. Belokon, and Ye. O. Tulushev, *Analiz vplyvu tekhnologii promyslovykh pidpriemstv ta avtotransportu na stan ekolohichnoi bezpeky atmosfery (na prykladi m. Zaporizhzhia): monohrafiia* [Analysis of the impact of industrial enterprise technologies and motor transport on the state of environmental safety of atmospheric air (on the example of Zaporizhzhia): a monograph]. Zaporizhzhia, Ukraine: VD «Helvetyka», 2020. (Ukr.)
- [2] L. Cheng et al., “Health risk assessment of hazardous VOCs and its associations with exposure duration and protection measures for coking industry workers,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 379, article 134919, 2022. doi: [10.1016/j.jclepro.2022.134919](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134919).
- [3] L. Tang et al., “Assessment of ultralow emission standards and emission abatement potential of China's coking industry via real-time monitoring data,” *Energy*, vol. 344, article 139818, 2026. doi: [10.1016/j.energy.2025.139818](https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139818).

- [4] X. Ge, L. Chang, J. Yuan, J. Ma, X. Su, and H. Ji, "Greenhouse Gas Emissions by the Chinese Coking Industry," *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 25, no. 2, pp. 593–598, 2016. doi: [10.15244/pjoes/61065](https://doi.org/10.15244/pjoes/61065).
- [5] V. Rumiantsev, N. Yakubin, K. Belokon, E. Matukhno, and C. Leventsova, "Ecological aspects of the neutralization of gas emissions leaving from the resin storehouse of Joint-stock company «Zaporozhkoks»,» *Metallurgical and Mining Industry*, no. 4, pp. 105–109, 2015.
- [6] J. Park, S. Lee, J. Kim, W. Um, I. Lee, and C. Yoo, "Energy, safety, and absorption efficiency evaluation of a pilot-scale H<sub>2</sub>S abatement process using MDEA solution in a coke-oven gas," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, article 105037, 2021. doi: [10.1016/j.jece.2021.105037](https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105037).
- [7] H. Zou et al., "Removal of hydrogen sulfide from coke oven gas by catalytic oxidative absorption in a rotating packed bed," *Fuel*, vol. 204, pp. 47–53, 2017. doi: [10.1016/j.fuel.2017.05.017](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.05.017).
- [8] V. Yu. Tyshchuk, "Vplyv koksokhimichnykh protsesiv na zabrudnennia povित्रia robochykh zon i rozrobka zasobiv yoho ochyshchennia i pokrashchennia umov pratsi" ["Influence of coke-chemical processes on air pollution in working areas and development of means for its purification and improvement of working conditions"], *Zbirnyk naukovykh prats NHU – Collection of Scientific Papers of the NGU*, no. 51, pp. 226–233, 2017. (Ukr.)
- [9] Ya. M. Chernenko, M. D. Voloshyn, and L. P. Larycheva, *Katalizatory ta sorbenty: navch. posibnyk* [Catalysts and sorbents: a study guide]. Kamianske, Ukraine: DDTU, 2017. (Ukr.)
- [10] J. Cheng et al., "Constructing active copper species in Cu-zeolites for coal-gas-SCR and elucidating the synergistic catalytic function of CuO and Cu<sup>2+</sup> ion species," *Environmental Science: Nano*, vol. 9, pp. 2372–2387, 2022. doi: [10.1039/d2en00269h](https://doi.org/10.1039/d2en00269h).
- [11] Yu. O. Belokon and K. V. Belokon, "Zharomitsnyi intermetalidnyi splav" ["Heat-resistant intermetallic alloy"], UA Patent 107101 Appl. u201510428, May 25, 2016. (Ukr.)
- [12] K. V. Belokon, *Rozrobka intermetalidnykh katalizatoriv dlia zneshkodzhennia vuhletsevmisnykh komponentiv hazovykh vykydiv v atmosferu: monohrafiia* [Development of intermetallic catalysts for the neutralization of carbon-containing components of gas emissions into the atmosphere: a monograph]. Kherison, Ukraine: Helvetyka, 2019. (Ukr.)
- [13] V. Malaichuk, S. Klymenko, and D. Astakhov, "Kompiuterna obrobka vymiriuvan v zadachakh sposterezhennia za stanom tekhnichnykh ob'ektiv" ["Computer processing of measurements in problems of observation of the condition of technical objects"], *Visnyk Dniprovskoho universytetu. Serii: Raketno-kosmichna tekhnika – Journal of Rocket-Space Technology*, vol. 30, no. 4, pp. 99–106, 2023. doi: [10.15421/452213](https://doi.org/10.15421/452213). (Ukr.)
- [14] O. D. Fedorenko, V. Yu. Klym, and S. V. Klymenko, «Neparametrychna statystyka vypadkovykh velychyn z nevidomymy funktsiiami rozpodilu imovirnosti» [«Non-parametric statistics of random variables with unknown probability distribution functions»], *Systemni tekhnologii – System technologies*, vol. 5, no. 160, pp. 101–111, 2025. doi: [10.34185/1562-9945-5-160-2025-11](https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-11). (Ukr.)
- [15] V. M. Turchyn, *Teoriia imovirnosti i matematychna statystyka* [Probability theory and mathematical statistics]. Dnipropetrovsk, Ukraine: IMA-press, 2014.
- [16] D. Friedman, Fisher's Linear Discriminant, Machine Learning from Scratch. [Online]. Available: [https://dafriedman97.github.io/mlbook/content/c3/s1/fisher\\_discriminant.html](https://dafriedman97.github.io/mlbook/content/c3/s1/fisher_discriminant.html). Accessed on: Mar. 5, 2026.
- [17] V. Godliuk, "Mathematical Models for Management Information Systems on Digital Platforms: from Resource Management to Demand Forecasting," *Cybernetics and Computer Technologies*, vol. 2, pp. 37–46, 2025. doi: [10.34229/2707-451X.25.2.3](https://doi.org/10.34229/2707-451X.25.2.3).
- [18] A. V. Dymchenko, O. H. Panfilov, and S. V. Klymenko, "Systema optychnoi obrobky danykh" ["Optical data processing system"], *Visnyk Dniprovskoho universytetu. Serii: Raketno-kosmichna tekhnika – Journal of Rocket-Space Technology*, vol. 33, no. 4, pp. 98–107, 2024. doi: [10.15421/452431](https://doi.org/10.15421/452431). (Ukr.)
- [19] V. Bukshtynov, *Computational Optimization Success in Practice*, 1st Ed., Chapman and Hall/CRC, New York, 2023. doi: [10.1201/9781003275169](https://doi.org/10.1201/9781003275169).

Стаття надійшла 30.12.2026

Стаття прийнята 28.01.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

**Цитуйте цю статтю як:** Белоконь К. В., Мальований М. С., Проскурнін О. А. Підвищення рівня екологічної безпеки коксохімічних підприємств шляхом каталітичного знешкодження викидів на інтерметалідних Fe-Al каталізаторах. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 100–109. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359939>.