

## ОЧИЩЕННЯ ДИМОВИХ ГАЗІВ ВУГІЛЬНИХ КОТЛІВ ВІД ОКСИДІВ АЗОТУ. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ТА ПЕРСПЕКТИВ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

З безперервним розвитком економіки та суспільства глобальне споживання енергії продовжує зростати, відповідні екологічні проблеми стають все очевиднішими. Велика кількість шкідливих викидів димових газів котельних установок, таких як оксиди азоту, сірки, вуглецю спричинила глобальне погіршення екологічного стану довкілля, негативних змін показників якості атмосферного повітря, утворення кислотних опадів та ін. Упродовж періоду експлуатації вугільних опалювальних котлів потребує вирішення актуальної екологічної проблеми нейтралізації значної кількості оксидів азоту  $\text{NO}_x$ , утворених під час спалювання в процесі вироблення теплової енергії. В статті проаналізовані ефективні технології очищення димових газів вугільних котлів від оксидів азоту та сірки: селективне каталітичне відновлення (SCR), селективне некаталітичне відновлення (SNCR), адсорбційна денітрифікація активованим вугіллям та плазмовий метод. В ході досліджень систематизовано основні характеристики цих технологій, вимоги до впровадження, галузі практичного застосування, рівні ефективності та проведено порівняльний аналіз за такими критеріями: забезпечувана швидкість денітрифікації, принцип дії, переваги та недоліки, ступінь використання. Ефективність, особливість застосування та практична привабливість різних засобів денітрифікації димових газів вугільних котлів досліджені та систематизовані з метою створення інформаційної бази сучасних екологічних методів та технологій нейтралізації шкідливого впливу на довкілля продуктів згоряння твердих палив енергогенерувальних установок. В ході досліджень встановлено, що наявні вискоелективні технології SCR і SNCR будуть широко використовуватися в технології денітрифікації димових газів у майбутньому, а інтеграційні технології десульфурзації та денітрифікації, такі як метод адсорбції та плазмовий метод, будуть активно удосконалюватися з урахуванням локальних виробничих особливостей застосування.

**Ключові слова:** вугільний котел; димові гази, технологія, денітрифікація, ефективність, систематизація.

### Вступ

Вугільні котли відносяться до розповсюдженого енергогенерувального обладнання і посідають важливе місце в енергетичній галузі та промисловому виробництві. Проте у процесі згоряння вугільного палива під час експлуатації котлів цього типу, утворюється значна кількість забруднених димових газів, які задають значної шкоди довкіллю. Ці димові гази міститимуть велику кількість діоксиду сірки, оксиду азоту та інших частинок важких металів, а також  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  та інші кислі газоподібні забруднювачі, серед яких  $\text{NO}_x$  є забруднювачем атмосфери, що не тільки спричиняє кислотні дощі, але також і фотохімічний смог, і пошкодження рослин. Денітрифікація димових газів означає відновлення утворених  $\text{NO}_x$  до  $\text{N}_2$ , таким чином видаляючи  $\text{NO}_x$  з димових газів [1]. Для забезпечення екологічної безпеки промислових підприємств необхідно проводити денітрифікацію димових газів котлів.

Дослідження денітрифікації димових газів почалися у 1980-х роках, і вони переважно застосовувалися для денітрифікації димових газів котлів електростанцій. Існує багато способів денітрифікації димових газів, які загалом можна розділити на три категорії: суха, напівсуха та мокра денітрифікація. Серед них сухий спосіб можна розділити на селективне каталітичне відновлення (SCR), селективне некаталітичне відновлення (SNCR), високоенергетичне окислення електронної активації, опромінення електронним пучком, карботермічне відновлення, фотокаталіз тощо. Напівсухий спосіб включає каталітичне окислення, адсорбцію активованим вугіллям, методи абсорбції тощо. Мокрий метод поділяється на метод абсорбції води, метод абсорбції кислоти, метод абсорбції лу-

гу, метод комплексної абсорбції тощо.

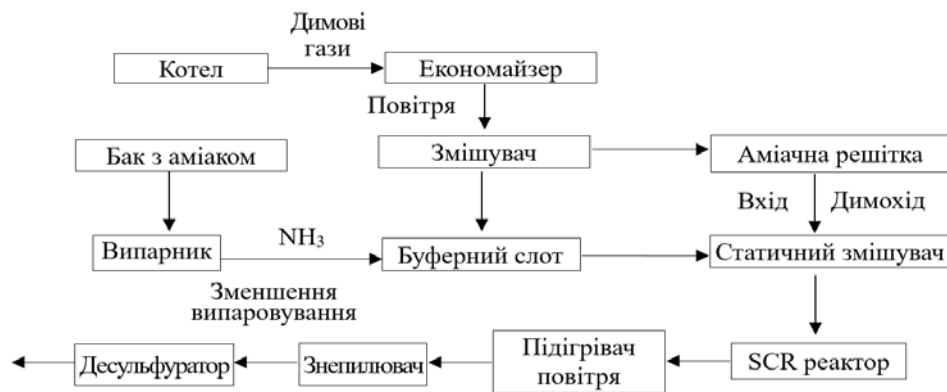
Серед сухих, напівсухих і мокрих способів денітрифікації димових газів найбільшого поширення набув сухий спосіб. Основна причина полягає в тому, що процес сухої денітрації простий, ефективність денітрації його висока (до 95 %), немає необхідності водопостачання та очищення стічних вод. Існує багато способів сухої денітрифікації, і фактично застосовано більше десяти видів, серед яких найширше використовуваними методами денітрифікації є метод селективного каталітичного відновлення (SCR) і метод селективного некаталітичного відновлення (SNCR).

*Мета роботи* полягає у аналізі екологічних проблем експлуатації вугільних котлів в енергетиці і промисловості та визначенні перспектив їхнього вирішення шляхом впровадження ефективних технологій денітрифікації та десульфурації токсичних продуктів згоряння твердих палив.

## Результати дослідження

### 1. Технологія денітрації селективного каталітичного відновлення SCR

Технологія SCR базується на використанні газоподібного аміаку, рідкого аміаку, сечовини та інших відновників, які підтримуються оксидами металів як каталізаторами,  $\text{NH}_3$  вибірково каталізує відновлення  $\text{NO}_x$  до  $\text{N}_2$  та  $\text{H}_2\text{O}_{(g)}$  на поверхні каталізатора без окислення  $\text{O}_2$  у димовому газі (рис.).



Принципова схема технології SCR

З 1950-х років зарубіжні країни почали вивчати технологію SCR. У 1950 році компанія Eegelhord у Сполучених Штатах вперше запропонувала метод SCR і подала заявку на патент на винахід у 1959 році. У подальшому Японія взяла на себе лідерство в промисловому застосуванні SCR у 1979 році. Німеччина та Сполучені Штати запровадили японську технологію у 1984 та 1993 роках відповідно та створили перший комплект обладнання для денітрації вугілля в Китаї. Наразі понад 90 % теплових енергоблоків у Сполучених Штатах, Японії та Німеччині використовують процес денітрифікації цим методом. Серед вугільних установок денітрифікації димових газів, які введено в експлуатацію в Китаї, технологія SCR становить 95 % [2].

Технологія денітрифікації SCR в основному використовує високотемпературні комірчасті ванадієві та титанові каталізатори  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3(\text{MoO}_3)/\text{TiO}_2$  [3], які мають високу активність і хороші показники проти  $\text{SO}_2$  у температурному вікні 280...420 °С. Недоліки широкомасштабного використання ванадій-титанових каталізаторів у SCR, його токсичною інактивацією, відносно вузьким температурним інтервалом і активним компонентом  $\text{V}_2\text{O}_5$ , який є високотоксичним, стають все очевиднішими, і тому вчені почали розробляти нові ефективні, недорогі каталізатори без вмісту ванадію з низьким рівнем забруднення. Тепер розробка нових каталізаторів в Україні та за кордоном в основному зосереджена на каталізаторах  $\text{Ce}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Fe}$  та  $\text{Mn}$  на основі  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , активованого вугілля та цеоліту, але більшість з цих досліджень залишаються на лабораторній стадії. В роботі [4] зазначається, що основа  $\text{Ce}$  є свого роду каталізатором, який, як очікується, замінить  $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$ , вивчено механізм взаємодії  $\text{H}_2\text{O}$  і  $\text{SO}_2$ , що сприяють  $\text{Ce}/\text{TiO}_2$  для зменшення  $\text{NO}$  за високої температури. Автори роботи [5] отримували  $\text{CeO}_2\text{-MoO}_3/\text{TiO}_2$  методом спільного осадження, методом просочення та золь-гель методом, і виявили, що каталізатор, отриманий золь-гель методом, мав найширше вікно температури реакції (250...475 °С). Автори [6] розробили новий мезопористий каталізатор  $\text{TiO}_2$ , легований  $\text{W}$ , на основі змішаних оксидів  $\text{Mn}$  і  $\text{Ce}$ . Дослідження показали, що швидкість конверсії  $\text{NO}$  з  $\text{MnCeW/m-TiO}_2$  може досягати понад 95 %, коли швидкість реактора стано-

вила  $40000 \text{ год}^{-1}$  за температури  $140...340 \text{ }^\circ\text{C}$ , а експеримент продемонстрував, що додавання W корисне для підвищення каталітичної ефективності. Автори [7] вивчали реакцію видалення NO шляхом додавання Pr до  $\text{CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , результати показали, що коли молярне співвідношення Pr/Ce становило 0,10, швидкість повітря —  $5000 \text{ год}^{-1}$  за температури  $290...450 \text{ }^\circ\text{C}$ , середня швидкість видалення становила понад 90 %, а найвища швидкість денітрифікації — 98,17 % за  $360 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Метод SCR важливий в технології денітрифікації димових газів через його переваги у високої ефективності денітрифікації та найдосконалішої технології, але не можна ігнорувати такі проблеми, як висока інвестиційна вартість ванадій-титанових каталізаторів і забруднення твердими відходами. Відходи ванадійових і титанових каталізаторів можна переробляти шляхом промивання водою, термічного відновлення, розчину кислоти та інших методів [8], що може ефективно сповільнити забруднення твердими відходами та зменшити інвестиційні витрати, а також досягти безпрограшної ситуації як для навколишнього середовища, так і для економічних переваг. Розробка каталізаторів SCR у майбутньому, як і раніше, в основному базується на широкому застосуванні ванадій-титанових каталізаторів і поглибленні досліджень методів їхньої регенерації, а також інтенсивно розроблюються екологічні та недорогі каталізатори без ванадію.

## 2. Технологія денітрифікації селективного некаталітичного відновлення (SNCR)

Технологія процесу SNCR — це технологія некаталітичного відновлення, температура диму на виході котла  $850...1100 \text{ }^\circ\text{C}$ , сечовина або аміак та інші відновники безпосередньо вводяться у разі високої температури, аміак і оксиди азоту в реакції димових газів, відновлення оксидів азоту, зниження концентрації оксидів азоту.

Технологія SNCR має короткий термін будівництва, просту конструкцію, не потребує заміни вентилятора, вимагає менше інвестицій, нечутлива до змін у вугіллі, має середню ефективність денітрифікації та підходить для трансформації старих котлів. Недоліком цієї технології є те, що ефективність денітрифікації низька, і можливий витік аміаку [9]. Таким чином, з погляду денітрифікації димових газів, використання лише технології SNCR має деякі обмеження.

У процесі денітрації каталізатор не використовується, і  $\text{NH}_3$  виділяється за  $10...15 \text{ ppm}$ . Під час розпилення відновника в піч, оскільки реакція відновлення  $\text{NO}_x$  відбувається лише між  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  і  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура реакції відновника є одним з ключових факторів для ефективності відновлення. Оптимальна температура реакції становить  $950 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ключ до успішного впровадження технології SNCR полягає в тому, що відновник повинен бути розпилений у найефективнішому температурному діапазоні в печі, а загальний час перебування реагентів у реакторі повинен контролюватися якомога довше, щоб диспергувати відновник і рівномірно змішати з димовим газом за найсприятливішої температури, для максимізування ефективності використання відновника та контролю мінімального витоку аміаку [10].

Порівняно з технологією SCR, SNCR має відносно невеликі інвестиційні та експлуатаційні витрати та потребує невеликого простору, але ефективність денітрифікації невисока, і важко контролювати витік аміаку.

Метод використання безпечного відновника сечовини, не утворює рідких або твердих відходів, є простим, установка нейтралізатора є компактною і потребує невеликого простору. Ефективність видалення  $\text{NO}_x$  цим методом не є високою, лише  $25...50 \%$ . Водночас, метод потребує менших інвестицій, забезпечує низькі експлуатаційні витрати.

У разі застосування технології денітрації SNCR, варто звернути увагу на такі дві проблеми:

- 1) ступінь використання аміаку в процесі SNCR невисокий, щоб досягти ефекту зменшення викидів  $\text{NO}_x$ , можна додати більшу кількість аміаку, додатковий вихід якого легко забезпечити;
- 2) ККД котла знижується; введення відносно низькотемпературного відновника може призвести до зниження температури печі, що спричинить неповне згоряння, збільшення вмісту CO та збільшення втрат від неповного згоряння.

## 3. Метод адсорбційної денітрації активованим вугіллям

Активоване вугілля має розвинену мікропористу структуру, сильну питому поверхню та велику кількість поверхневих функціональних груп і є хорошим адсорбентом, каталізатором та носієм каталізатора. Активоване вугілля використовується для адсорбції та видалення оксидів азоту в димових газах. Суть його основного принципу видалення полягає в тому, що активоване вугілля адсорбує NO на поверхні димового газу за допомогою серії процесів каталітичного окислення, а потім окислюється до  $\text{NO}_2$  під дією кисню. Водночас активоване вугілля як каталізатор може зна-

чно знизити енергію активації реакції  $\text{NH}_3$  і  $\text{NO}_x$  і ефективно підвищити швидкість денітрифікації димового газу [9]—[11]. Перевага методу адсорбції активованим вугіллям полягає в тому, що немає проблеми зі стічними водами та залишками відходів, а активоване вугілля також може поглинати та видаляти деякі забруднювачі з важких металів у димових газах. Він також має деякі недоліки, такі як велика кількість адсорбенту активованого вугілля, низький коефіцієнт використання та легке прилипання активованого вугілля до стінки труби, що спричиняє закупорку трубопроводу [12], [13]. Автори [14] повідомили, що активний кокс використовувався як адсорбент і каталізатор, а  $\text{NH}_3$  як відновник для видалення  $\text{SO}_2$  і  $\text{NO}_x$  у димових газах. Виявлено, що активний кокс може не тільки адсорбувати  $\text{SO}_2$  і перетворювати його в  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , але також каталізувати відновлення  $\text{NO}$  використанням  $\text{NH}_3$  до  $\text{N}_2$ . Найкращі експериментальні результати показують, що швидкість видалення  $\text{SO}_2$  може досягати 95 %, а швидкість перетворення  $\text{NO}$  може досягати понад 80 %.

#### 4. Плазмовий метод

Технологія плазмової диференціальної дисперсії вперше запропонована японською компанією Stubara у 1970 році, а через два роки вони співпрацювали з Японським науково-дослідним інститутом атомної енергії над цією технологією. Принцип полягає в тому, що під дією прикладеного електричного поля згенеровані високоенергетичні електрони бомбардують забруднювальні речовини, такі як  $\text{SO}_2$  і  $\text{NO}_x$ , у димових газах, викликаючи серію складних фізичних і хімічних реакцій, таких як іонізація, дисоціація та збудження, і, врешті,  $\text{NO}_x$  перетворюється на нешкідливу речовину  $\text{N}_2$  [15], [16]. Згідно з різними методами генерації плазми, плазмовий метод в основному включає метод електронного променя, метод імпульсної корони та метод розряду бар'єрного середовища.

Електронно-променевий метод може одночасно проводити десульфурізацію та денітрифікацію, ефект десульфурізації може досягати понад 80%, і адаптованість до коливань складу димових газів сильна, але проблеми високого споживання енергії та складної системної структури цього методу не вирішені, тому популяризація та використання його обмежені. Також є багато досліджень методу імпульсного коронування, але немає демонстрації та застосування в техніці [17], [18]. Метод бар'єрного діелектричного розряду є центром поточних досліджень, основний напрямок досліджень зосереджено на виборі відновника та каталізатора та конструкції реактора. Дослідження показали [19], що коли  $\text{CO}$  та  $\text{H}_2$  використовуються як відновники, реакція відновлення має вищі вимоги до температури реакції без каталізатора, а ефективність денітрифікації становить близько 40% за умов слабого окислення та слабого відновлення. За умови сильного скорочення він може досягати більше 90%.

#### Аналіз отриманих результатів

У таблицю зведено результати систематизації та порівняльного аналізу розглянутих технологій за такими критеріями: швидкість денітрифікації, принцип дії, переваги та недоліки, ступінь використання.

Порівняння поширених схем денітрифікації димових газів

Метод очищення / ефективність	Хімізм процесу	Переваги методу	Недоліки методу	Літературні джерела
селективне каталітичне відновлення (SCR) / 80...90 %, до > 95 %	$\text{NO}_x$ відновлюються до нетоксичних $\text{N}_2$ і $\text{H}_2\text{O}$ за допомогою аміновідновника під каталізатором	Найсучасніша технологія, висока швидкість денітрації, десульфурізації; має широке застосування	Значні інвестиційні та експлуатаційні витрати, вартісний, чутливий каталізатор, процес супроводжується витоком аміаку	[2]—[8]
селективне некаталітичне відновлення (SNCR) / понад 60 %, до 75 %	$\text{NO}_x$ безпосередньо відновлюється до $\text{N}_2$ і $\text{H}_2\text{O}$ за допомогою аміновідновників	Сучасна технологія, низькі інвестиційні та експлуатаційні витрати; має широке застосування; рекомендований для виробництв з малими викидами	Процес супроводжується значним витоком аміаку	[9], [10]
Адсорбційна денітрація активованим вугіллям / 80...90 %	Адсорбент (активоване вугілля/кокс, молекулярне сито тощо) каталізує та адсорбує $\text{NO}_x$ , а потім відновлює його до аміногруп; адсорбент регенерується нагріванням або паром	Просте обладнання, скоординована десульфурізація; має широке застосування; рекомендовано для виробництв з малими викидами	Малий адсорбційний потенціал, значна кількість адсорбенту, часта регенерація	[9]—[14]

Продовження табл.

Метод очищення /ефективність	Хімізм процесу	Переваги методу	Недоліки методу	Літературні джерела
Плазмовий електронно-променевий метод / >70 %	Вільний радикал, утворений високоенергетичними електронами, використовується для окислення NO до NO <sub>2</sub> , а потім у NH <sub>3</sub> і H <sub>2</sub> O для отримання нітрату амонію	Простота експлуатації, одночасна десульфурація та видалення пилу, відсутність відходів і стічних вод	Високий рівень енергоспоживання; немає широкого застосування	[15]—[19]

Трансформація та модернізація традиційних технологій денітрифікації димових газів, таких як SCR та SNCR, дозволила вугільній, цементній та хімічній промисловості досягти наднизьких викидів, тому такі технології мають широке промислове застосування та високу ефективність видалення. Кожен підхід має свою унікальність, обмеження, а також переваги та недоліки. У практичному інженерному застосуванні ефект денітрації може досягти ідеального рівня лише шляхом поєднання його характеристик, вибору та комбінування відповідних методів. У майбутньому наявні високоефективні SCR і SNCR будуть широко використовуватися в технології денітрифікації димових газів, а інтеграційні технології десульфурації та денітрифікації, такі як метод адсорбції та плазмовий метод, будуть активно розвиватися для впровадження технології денітрифікації димових газів, яка враховує місцеві особливості.

### Висновки

Гнучке застосування технології денітрифікації димових газів твердопаливних котлів у виробничому процесі може не тільки видалити забруднювальні речовини в димових газах, але й зменшити забруднення навколишнього середовища. Для підвищення ефективності застосування даних технологій варто враховувати конкретні умови їхнього використання відповідно до попиту на денітрацію.

В роботі розглянуто чотири ефективні технології денітрифікації димових газів вугільних котлів, які використовуються в енергетиці та різних галузях промисловості, а саме: селективне каталітичне відновлення (SCR), селективне некаталітичне відновлення (SNCR), адсорбційна денітрифікація активованим вугіллям та плазмовий метод. В ході досліджень систематизовано основні характеристики цих технологій, вимоги до впровадження, галузі практичного застосування, рівні ефективності та проведено порівняльний аналіз за такими критеріями: забезпечувана швидкість денітрифікації, принцип дії, переваги та недоліки, ступінь використання. Ефективність, особливість застосування та практична привабливість різних засобів денітрифікації димових газів вугільних котлів досліджено та систематизовано з метою створення інформаційної бази сучасних екологічних методів з технологіями нейтралізації шкідливого впливу на довкілля продуктів згорання твердих палив енергогенерувальних установок.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Хуан Цзіжун, і Чжун Чао, «Дослідження технології денітрифікації димових газів вугільного котла», *Щоб очистити світ*, № 39 (4), с. 4-6, 2023.
- [2] Ши Цзяньюн, *Аналіз витрат і переваг технологій десульфурації та денітрифікації димових газів для вугільних електростанцій*. Ханчжоу: Чжецзянський університет, 2015.
- [3] CAO Jun, FU Min, ZHOU Lin та ін. «Прогрес дослідження отруєння прискорювачами денітрації SCR», *Хімічна інженерія застосування*, № 47 (2), с. 380-385, 2018.
- [4] Сяо Х, Xiong S, Shi Y, та ін. «Вплив H<sub>2</sub>O і SO<sub>2</sub> на селективне каталітичне відновлення NO за допомогою NH<sub>3</sub> на каталізаторі Ce/TiO<sub>2</sub>. Механізм і кінетичне дослідження», *Journal of Physical Chemistry C*, no. 120 (2), pp. 1066-1076, 2016.
- [5] J. Ye, X. Wang, Z. Xing, та ін. «Приготування та характеристика каталізаторів CeO<sub>2</sub>-MoO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> для селективного каталітичного відновлення NO за допомогою NH<sub>3</sub>», *Дослідження аерозолів і якості повітря*, № 17, с. 2726-273, 2017.
- [6] Чжа К, Цай С, Ху Х та ін. «In situ DRIFT дослідження стимулюючого впливу вольфраму на каталізатори MnO<sub>x</sub>-CeO<sub>2</sub>/meso-TiO<sub>2</sub> для зменшення викидів NO<sub>x</sub>», *Journal of Physical Chemistry C*, № 121 (45), с. 25243-25254, 2017.
- [7] Цзінь Кю, Шень І, і Чжу С. «Модифікований оксид празеодиму CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> каталізатор для селективного каталітичного відновлення NO NH<sub>3</sub>», *Китайський хімічний журнал*, № 34 (12), с. 1283-1290, 2016.
- [8] WU Weihong, WU Hua, LUO Jia та ін., «Прогрес досліджень регенерації прискорювачів денітрифікації димових газів SCR», *Прикладна хімічна інженерія*, № 42 (7), с. 1304-1307, 2013.
- [9] Сунь Цзінь, і Сюй Чжен, «Застосування активованого вугільного матеріалу в десульфуризації та денітрифікації димових газів на теплових електростанціях», *Електроенергетика. Охорона навколишнього середовища*, № 2 (1), с. 5-7, 2008.
- [10] Л. І. Тунчуань, «Дослідження десульфурації та денітрифікації активованого вугілля», *Нові вуглецеві матеріали*, № 20 (2), с. 178-182, 2005.

- [11] Yao Gang, Huang Guangyu, «Прогрес дослідження активованого вугілля для денітрифікації димових газів,» *Журнал хімічної інженерії*, № 28 (8), с. 42-46, 2014.
- [12] Luo Shuanglong, «Дослідження переваг і недоліків і розробки комбінованого процесу десульфурації та денітрифікації активованого вугілля,» *PetroChina та стандарти та якість хімічної промисловості*, № 37 (24), с. 164-165, 2017.
- [13] Liu Zhi-hua, Xie Zhao-wei, Luo Yan та ін., «Дослідження переваг і недоліків і розробки комбінованого процесу десульфурації та денітрифікації активованим вугіллям,» *Технологія та дизайн архітектурної інженерії*, № (33), с. 4713, 2018.
- [14] К. Гарлік, Е. Суддя, і Харальд Юнтген, «Застосування активного коксу в процесах видалення SO<sub>2</sub> — і NO<sub>x</sub>, з димових газів,» *Паливо*, № 60(9), с. 832-838, 1981.
- [15] Мен Лей, «Стан і перспективи технології плазмової денітрифікації,» *Науково-технічна інформація*, № 16 (3), с. 68-69, 2018.
- [16] Ван Дун, *Видалення оксидів азоту діелектричним бар'єрним розрядом*. Пекін: Північно-Китайський університет електроенергетики, 2014.
- [17] Cao X Xiaoxia, *Дослідження видалення NO<sub>x</sub> із димових газів плазмою діелектричного бар'єрного розряду*. Jinan: Shandong University, 2016.
- [18] Zhang Xudong, *Дослідження видалення NO холодними ізолятами в діелектричному бар'єрному розряді*. Пекін: Університет Цінхуа, 2003.
- [19] Jin Ping, Wang Haochen, Li Lei та ін., «Стан і перспективи технології десульфурації димових газів,» *Сучасна хімічна інженерія*, 48 (1), с. 119-121, 2019.

Рекомендована кафедрою екології, хімії та технологій захисту довкілля ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 26.02.2025

**Чжан Ле** — аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: 121287197@qq.com;  
**Полиев'ячук Андрій Павлович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: polyvianchuk\_a@vntu.edu.ua .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**Zhang Le<sup>1</sup>**  
**A. P. Polyvianchuk<sup>1</sup>**

## Analysis of the Efficiency of Modern Denitrification Technologies for Flue Gases from Coal-Fired Boilers

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*With the continuous development of economy and society, global energy consumption continues to grow, and the corresponding environmental problems are becoming more and more obvious, and a large number of harmful emissions of flue gases from boiler plants, such as nitrogen oxides, sulfur oxides, carbon oxides, have led to the problem of global deterioration of the ecological state of the environment, negative changes in atmospheric air quality indicators, the formation of acid rain, etc. During the operation period of coal-fired heating boilers, the urgent environmental problem of neutralizing a significant amount of nitrogen oxides NO<sub>x</sub> formed in the process of generating thermal energy during combustion needs to be solved. The article analyzes effective technologies for cleaning flue gases of coal-fired boilers from nitrogen and sulfur oxides: selective catalytic reduction (SCR), selective non-catalytic reduction (SNCR), adsorption denitrification with activated carbon and plasma method. In the process of research, main characteristics of these technologies, requirements for implementation, areas of practical application, levels of efficiency were systematized and a comparative analysis was conducted according to the following criteria: provided denitrification rate, principle of operation, advantages and disadvantages, the degree of use. The effectiveness, features of application and practical attractiveness of various means of denitrification of flue gases of coal-fired boilers were studied and systematized in order to create the information base of modern environmental methods and technologies for neutralizing the harmful effects of combustion products of solid fuels of power generating plants on the environment. The research found that the existing high-efficiency SCR and SNCR technologies will be widely used in flue gas denitrification technology in the future, and the integration technologies of desulfurization and denitrification, such as adsorption method and plasma method, will be actively developed to explore flue gas purification technologies suitable for the application of local production characteristics.*

**Keywords:** coal boiler, flue gases, technology, denitrification, efficiency, systematization.

**Zhang Le** — Post-Graduate Student of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Technologies e-mail: 121287197@qq.com ;

**Polyvianchuk Andrii P.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Technologies e-mail: polyvianchuk\_a@vntu.edu.ua