

УДК 624.31

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/40>**Шелешей Т.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Беднарська І.С.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Панченко К.А.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Федорук Р.О.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ БОРОТЬБИ З ОКСИДАМИ АЗОТУ В ГАЗОВИХ КОТЛАХ

У статті розглядаються різні способи зменшення викидів оксидів азоту в навколишнє середовище при спалюванні природного газу в енергетичних установках різної потужності. Вказано про актуальність розробки та впровадження ефективних методів боротьби з викидами NO_x у газових котлах. Розглянуто активні і пасивні методи зменшення викидів оксидів азоту. Особливу увагу приділено селективному каталітичному відновленню та селективному некаталітичному відновленню, які є найбільш перспективними. Охарактеризовано їхню ефективність: метод селективного некаталітичного відновлення менш ефективний, ніж метод каталітичного відновлення (ККД до 90%), але цей метод дешевший і простіший у використанні. Метод селективного каталітичного відновлення є дуже ефективним методом (ККД до 95%) і використовується на різних промислових підприємствах. Також описані переваги та недоліки технології рециркуляції димових газів в контексті зменшення викидів оксидів азоту. Опасно значний вплив коефіцієнта надлишку повітря на температуру котла та викиди NO_x . Вказано, що метод рециркуляції димових газів пропонує баланс між ефективністю, вартістю та складністю впровадження. Однак дуже важливо підтримувати оптимальний рівень рециркуляції, щоб уникнути погіршення стабільності горіння та ефективності котла. Приведений метод зменшення теплової потужності котла шляхом зменшення швидкості згорання (інтенсивності пального), що може значно зменшити утворення NO_x . Сказано, що шляхом спалювання суміші метану (CH_4) і вуглекислого газу (CO_2) можна зменшити утворення оксидів азоту. Також приведено інші методи зменшення викидів оксиду азоту: використання пальників з низьким вмістом оксиду азоту, використання вибіркового каталітичного відновлення, використання вибіркового некаталітичного відновлення, використання каталізаторів окислення.

Ключові слова: оксиди азоту, енергетика, активні методи, пасивні методи, зменшення викидів, рециркуляція димових газів, каталітичне селективне відновлення, надлишок повітря, каталізатор.

Постановка проблеми. Енергетика – одна з пріоритетних галузей світової промисловості. Електрична енергія необхідна для функціонування як і компаній, так і життя громадян, а також для розвитку окремих регіонів і цілих континентів. Без електрики не можуть працювати автівки, лікарні, школи, фабрики та заводи. Однак використання та збільшення виробництва енергії за рахунок теплових, гідро- та атомних електростанцій призводить до ряду негативних

наслідків, які є зворотною стороною технічного прогресу.

Багато років глави держав не реагували на застереження екологів, які закликали до раціонального використання електростанцій. Після аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 році людство по-новому подивилося на ризики, пов'язані з роботою АЕС та інших електростанцій.

Екологічні проблеми електростанцій привертають увагу вчених і громадськості. Вони станов-

лять реальну загрозу, спричиняючи забруднення повітря, виділенню шкідливих димових газів і пилю, забрудненню навколишнього середовища радіоактивними та токсичними відходами виробництва електроенергії, підвищенню середньорічної температури на декілька градусів, виникненню електромагнітних полів.

Екологічні проблеми необхідно вирішувати негайно, інакше наслідки забруднення повітря можуть стати незворотними. Необхідно узгодити збільшення споживання енергії з ризиком забруднення навколишнього середовища та зосередитися на розвитку альтернативних джерел енергії, заснованих на використанні відновлюваних джерел, таких як сонце, вода чи вітер, щоб вирішити проблему поводження з відходами.

Тільки комплексний підхід до питань охорони навколишнього середовища на міжнародному рівні дозволить вирішити екологічні проблеми електростанцій, тим самим захистивши навколишнє середовище та життя і здоров'я людей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оксиди азоту (NO_x), продукти згоряння палива, представляють значну проблему для навколишнього середовища. Вони піддаються фотохімічним реакціям, які призводять до утворення смогу та кислотних дощів, негативно впливають на здоров'я людини та викликають респіраторні захворювання [1].

Головним джерелом викидів NO_x є теплова енергетика. Загальна кількість цих забруднюючих речовин складає 0,8 кг на 1 тону продукту [2]. NO_x – це назва оксидів нітрогену – NO і NO_2 , для яких встановлено санітарно-гігієнічні обмеження. Під час згоряння палива приблизно 90% об'єму оксидів нітрогену утворюється у формі нітрогену (II) оксиду – NO . Решта 10% об'єму припадає на нітрогену (IV) оксид – NO_2 . Однак в ході хімічних реакцій в атмосфері значна частина NO перетворюється на NO_2 – набагато більш небезпечну речовину, що підтверджується значеннями санітарно-гігієнічних нормативів ДСП-201-97.

У цьому контексті розробка та впровадження ефективних методів боротьби з викидами NO_x у газових котлах є актуальним завданням великої наукової та практичної важливості [2].

Постановка завдання. Метою даної статті є аналіз сучасних методів боротьби з оксидами азоту в **газових котлах**, оцінка їх ефективності та перспектив застосування та внесення власних пропозицій щодо вирішення проблеми.

Виклад основного матеріалу. Було доведено, що викиди оксиду азоту (NO_x) є основною причи-

ною забруднення повітря, яке негативно впливає на здоров'я людини та навколишнє середовище. Існує два основні методи зменшення викидів NO_x : активний і пасивний [2].

Активні методи використовують технології, спеціально розроблені для зменшення викидів NO_x , тоді як пасивні методи використовують двигуни або пальники, які природним чином створюють менші викиди NO_x . У цій статті ми розглянемо плюси та мінуси кожного методу та порівняємо їхню ефективність у зменшенні викидів NO_x .

Активні методи зниження викидів NO_x включають використання спеціальних технологій зниження цих викидів. Однією з таких технологій є використання селективного каталітичного відновлення (СКВ), яке передбачає впорскування розчину у вихлопну систему для перетворення NO_x на азот і воду [3]. Іншим активним методом є рециркуляція вихлопних газів (РВГ), при якій частина вихлопних газів рециркулює в двигун для зниження температури та концентрації кисню в камері згоряння, тим самим зменшуючи викиди NO_x [4]. Нарешті, оптимізація системи впорскування палива передбачає коригування часу та кількості впрыскування палива для зменшення викидів NO_x .

Пасивні методи зменшення викидів NO_x включають використання двигунів або пальників, які природно виробляють менші викиди NO_x . Одним із методів є використання двигунів з бідним спалюванням, які працюють із вищим співвідношенням повітря та палива, що призводить до нижчих температур згоряння та нижчих викидів NO_x [5]. Іншим пасивним методом є використання пальників із низьким викидом оксидів азоту у промислових котлах, які використовують комбінацію палива та повітря для зменшення викидів NO_x [6]. Пасивні методи, як правило, недорогі та не потребують обслуговування, що робить їх придатними для застосування з низьким попитом.

Хоча і активні, і пасивні методи можуть ефективно зменшити викиди NO_x , між ними є деякі ключові відмінності. Активні методи, як правило, більш ефективні для зменшення викидів оксидів азоту, ніж пасивні методи. Однак активні методи також дорожчі в установці та обслуговуванні, ніж пасивні методи. З іншого боку, пасивні методи більше підходять для енергетичних установок із низьким попитом, тоді як активні методи більше підходять для тих, які користуються високим попитом серед споживачів. Вибираючи між активним і пасивним методами зменшення викидів NO_x , важливо враховувати конкретні вимоги кожного застосування.

У [7] автори розглядають різні методи очищення викидів оксиду азоту (NO_x) від стаціонарних джерел. Особливу увагу приділено селективному каталітичному відновленню (СКВ) та селективному некаталітичному відновленню (СНКВ), які є найбільш перспективними. У статті наведено огляд доступних методів очищення викидів NO_x , зокрема:

- основні методи: низькотемпературне спалювання, факельне горіння, рециркуляція диму;
- вторинні методи: адсорбція, каталітичне відновлення (СКВ), селективне некаталітичне відновлення (СНКВ).

Каталітичне відновлення (СКВ) – це метод очищення викидів оксидів азоту, який передбачає відновлення NO_x до азоту (N_2) і води (H_2O) у присутності каталізатора за допомогою відновника (зазвичай аміаку). СКВ є дуже ефективним методом (ККД до 95%) і використовується на різних промислових підприємствах.

Селективне некаталітичне відновлення (СНКВ) – це ще один метод очищення викидів оксидів азоту, який включає введення NO_x у пуч або димохід разом із відновником (зазвичай аміаком або ціаністим воднем). СНКВ менш ефективний, ніж метод каталітичного відновлення (ККД до 90%), але цей метод дешевший і простіший у використанні.

Зведемо всі переваги та недоліки вищезгаданих методів до таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння методів селективного каталітичного та некаталітичного відновлення

	Критерії оцінки	Метод СКВ	Метод СНКВ
1	Ефективність	до 95%	до 90%
2	Вартість	висока	низька
3	Складність	складний	простий
4	Каталізатор	потрібен	не потрібен
5	Температурний діапазон	широкий	обмежений

Отже, до переваг методу СНКВ можна віднести: низьку вартість порівняно з іншими методами, простоту у використанні, відносно високий ККД (до 90%) і каталізатор не потрібен.

Головним недоліком цього способу є те, що він підходить не для всіх типів котлів. Також варто наголосити, що при використанні селективного некаталітичного відновлення можуть виникати такі побічні продукти, як N_2O (закис азоту). А ще одним недоліком є обмеження щодо діапазону температур.

У роботі [8] досліджено ефективність рециркуляції димових газів (РДГ) щодо зменшення викидів оксиду азоту (NO_x) від газових котлів. Автори використовують моделювання обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD) для аналізу впливу різних витрат надлишкового повітря та швидкостей рециркуляції димових газів на температуру спалювання та утворення NO_x .

Показано, що коефіцієнт надлишку повітря має значний вплив на температуру котла та викиди NO_x . У міру збільшення надлишку повітря середня температура спочатку підвищується, а потім знижується, оскільки надлишок кисню поглинає тепло. Це зниження температури призводить до зменшення утворення оксидів азоту.

Метод рециркуляції димових газів ефективно знижує температуру печі шляхом введення інертних димових газів і таким чином пригнічує теплове утворення NO_x . Дослідження показало зниження викидів оксидів азоту на 70% (від 140 мг/м^3 до 40 мг/м^3) при коефіцієнті надлишку повітря 1,1 і 20% РДГ.

Перевагами рециркуляції димових газів для зменшення викидів NO_x є: ефективне скорочення вищезгаданих викидів: РДГ може значно зменшити утворення NO_x шляхом зниження максимальної температури згоряння в топці; відносно проста реалізація: порівняно з іншими технологіями контролю NO_x , РДГ може бути реалізована шляхом модифікації існуючих котельних систем; економічна ефективність: технологія часто розглядається як економічно ефективний підхід до скорочення викидів NO_x .

Недоліками рециркуляції димових газів є: обмежена ефективність при високих значеннях УЗВ: надмірне використання РДГ може знизити концентрацію кисню в топці, що призведе до неповного згоряння палива та збільшення викидів оксиду вуглецю; можливість нестабільності полум'я: високі значення РДГ можуть спричинити нестабільний стан полум'я, що вплине на роботу та безпеку котла; підвищене енергоспоживання: вентилятор, який використовується для рециркуляції димових газів, потребує додаткової енергії, що призводить до незначного зниження ефективності котла.

Отже, метод рециркуляції димових газів – це встановлений і перевірений метод зменшення викидів NO_x від газових котлів, що працюють на природному газі. Він пропонує баланс між ефективністю, вартістю та складністю впровадження. Однак дуже важливо підтримувати оптимальний рівень рециркуляції, щоб уникнути погіршення стабільності горіння та ефективності котла.

У статті [9] розглядаються різні методи зменшення викидів оксиду азоту при спалюванні природного газу в котлах. Зазначено, що хоча нові котли можуть бути розроблені відповідно до більш суворих стандартів викидів, модернізація існуючих котлів є більш економічно ефективною. У статті розглядаються три основні методи: зменшення об'ємного теплового навантаження; рециркуляція димових газів; спалювання біогазу з використанням CO_2 .

Зменшення теплової потужності котла шляхом зменшення швидкості згоряння (інтенсивності паливника) може значно зменшити утворення NO_x . Дослідження показало, що зниження теплового навантаження топки котла ТГМП-314 до $0,09 \text{ МВт/м}^3$ (приблизно 55% від номінальної потужності) у поєднанні з рециркуляцією димових газів на 17% дозволило скоротити викиди оксидів азоту на 75%.

Про рециркуляцію димових газів повідомляється, що шляхом повернення частини газів згоряння в камеру згоряння максимальна температура полум'я знижується, тим самим зменшуючи теплове утворення NO_x . Дослідження показує, що використання існуючої системи РДГ у водогрійному котлі КВГМ-180 з коефіцієнтом рециркуляції 30% зменшило викиди NO_x на 67%, зберігаючи рівень CO в допустимих межах.

Шляхом спалювання суміші метану (CH_4) і вуглекислого газу (CO_2) можна зменшити утворення оксидів азоту. Дослідження показало, що використання біогазової суміші 76% CH_4 і 24% CO_2 в котлі ДКВР-6,5-13 призвело до викидів NO_x , які відповідають європейським нормам ($63\text{--}76 \text{ мг/нм}^3$). Проте дослідження показує, що навіть нижчі рівні NO_x можуть бути досягнуті в контрольованих лабораторних умовах.

Варто відзначити, що оксиди азоту є основним забруднювачем повітря, спричиняючи смог, кислотні дощі та респіраторні захворювання. В статті [10] було досліджено різні методи зменшення викидів оксиду азоту від котлів: використання паливників з низьким вмістом оксиду азоту; використання вибіркового каталітичного відновлення; використання вибіркового некаталітичного відновлення; використання каталізаторів окислення.

Пальники з низьким вмістом оксиду азоту сприяють поетапному горінню шляхом змішування палива та повітря в кілька етапів, що призводить до зниження максимальних температур полум'я та меншого утворення NO_x .

У системах вибіркового каталітичного відновлення газоподібні продукти згоряння пропускаються через шар каталізатора, у який вводять

аміак. Аміак реагує з NO_x і утворює нешкідливий азот і водяну пару.

Подібно до вибіркового каталітичного відновлення, вибіркоче некаталітичне відновлення передбачає введення відновника (сечовини або аміаку) у верхню камеру печі, де він реагує з NO_x при високих температурах.

А каталізатори окислення допомагають перетворювати CO в CO_2 , але лише в деяких випадках також можуть призвести до незначного зниження викидів NO_x .

Ще одним методом зниження NO_x є мінімізація коефіцієнта надлишку повітря та раціональний розподіл палива. Зменшення коефіцієнта надлишку повітря призводить до зменшення кількості кисню в зоні горіння. А раціональний розподіл палива між паливниками забезпечує більш рівномірне горіння. Таким чином зростає ККД, що призводить до більш повного згоряння палива.

Утворення NO_x може бути зменшено на 20–30%, а в деяких випадках навіть більше. Переваги методу:

- простота впровадження: не потребує значних інвестицій у нове обладнання;
- ефективність: забезпечує значне зниження викидів NO_x .
- економічність: більша ефективність призводить до економії палива.

Недоліки методу:

- необхідність точного контролю α : для досягнення максимального ефекту важливо точно контролювати α (коефіцієнт надлишку повітря);
- складність раціонального розподілу палива: може знадобитися додаткове обладнання та кваліфікація персоналу;
- можливість утворення інших забруднюючих речовин: надмірне зниження α може призвести до утворення монооксиду вуглецю (CO).

Прикладом застосування цього методу є його впровадження в промислові котельні. Його також можна використовувати в житлових котельнях, але для цього може знадобитися додаткове обладнання.

Висновки. Отже, зменшення викидів NO_x є важливим кроком до покращення якості повітря та захисту здоров'я людини та навколишнього середовища. Як активні, так і пасивні методи можуть ефективно зменшити викиди NO_x , але варто пам'ятати, що кожен має свої переваги та недоліки. Активні методи ефективніші, але дорожчі, пасивні більш доступні, але менш ефективні. При виборі між активним і пасивним методами зниження NO_x для досягнення найбільшої ефективності перевагу надають комбінованому методу.

Список літератури:

1. Вольчин, І.А., Рашепкін І.А. Про Національний план скорочення викидів. Зб. тез доповідей «Вугільна теплоенергетика: проблеми реабілітації та розвитку». 2014. С. 23–26.
2. Сайт Сталій розвиток для України. – Режим доступу : <http://www.sd4ua.org/golovni-temi-stalogo-rozvitku/zabrudnennya-atmosferного-povitrya/> .
3. Варламов Г. Б., Любчик Г. М., Маляренко В. А. . Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії. – К.: ІВЦ Вид-во «Політехніка», 2003. – 232 с.
4. Внуков О.К., Розанова Ф.А. Ціна придушення оксидів азоту рециркуляцією газів на котлах. *Енергетик*. 2007. № 7. С.35-36.
5. Любчик Г. М. Проблеми екології ТЕС. Метод. рек. до вивч. курсу “*Основи екології*”. К.: КПІ, 1995. 24 с.
6. Національний план скорочення викидів від великих енергетичних установок, від 8 листопада 2017 року № 796-р. *Розпорядження, Кабінет міністрів України*. Київ, 99 с.
7. Renu Singh, Ashish Shukla. A review on methods of flue gas cleaning from combustion of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 29. P. 855-863. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.005.
8. Ji Yanyan, Zhang Songsong, Wang Kejian, Qi Guoli. Study on combustion and nitrogen oxide emissions of gas boiler. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 721. 012054. DOI: 10.1088/1757-899X/721/1/012054.
9. Sigal I. Ya., Smikhula A. V., Marasin O. V., Gurevich M. O., Lavrentsov E. M. Methods to reduce NOx formation during gas combustion in boilers. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2022. № 4. P. 62-69. DOI: 10.33070/etars.4.2022.06
10. Gibson P.W. Different electrostatic methods for making electret filters. *Journal of Electrostatics*. 2002. March. DOI: 10.1016/S0304-3886(01)00160-7
11. Риндюк, Д. В., Шелешей, Т. В., Беднарська, І. С. (2022). Інженерна екологія енергетики. Практичні заняття.

Sheleshei T.V., Bednarska I.S., Panchenko K.A., Fedoruk R.O. ANALYSIS OF MODERN METHODS OF COMBATING NITROGEN OXIDES IN GAS BOILERS

The article explores various methods of reducing emissions of nitrogen oxides into the environment when burning natural gas in power plants of various capacities. The urgency of developing and implementing effective methods of combating NOx emissions in gas boilers is indicated. Active and passive methods of reducing nitrogen oxide emissions are considered. Special attention is paid to selective catalytic reduction and selective non-catalytic reduction, which are the most promising. Their efficiency is characterized: the method of selective non-catalytic reduction is less efficient than the method of catalytic reduction (efficiency up to 90%), but this method is cheaper and easier to use. The method of selective catalytic reduction is a very effective method (efficiency up to 95%) and is used in various industrial enterprises. The advantages and disadvantages of flue gas recirculation technology in the context of reducing nitrogen oxide emissions are also described. The effect of the excess air ratio on boiler temperature and NOx emissions is alarmingly significant. It is indicated that the flue gas recirculation method offers a balance between efficiency, cost and complexity of implementation. However, it is very important to maintain an optimal level of recirculation to avoid degradation of combustion stability and boiler efficiency. The given method of reducing the thermal power of the boiler by reducing the combustion rate (burner intensity), which can significantly reduce the formation of NOx. It is said that the formation of nitrogen oxides can be reduced by burning a mixture of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂). Other methods of reducing nitrogen oxide emissions are also given: the use of burners with a low content of nitrogen oxide, the use of selective catalytic reduction, the use of selective non-catalytic reduction, the use of oxidation catalysts.

Key words: nitrogen oxides, energy, active methods, passive methods, emission reduction, flue gas recirculation, catalytic selective reduction, excess air, catalyst.