

Усов І.Л.

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

Шелешей Т.В.

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

ПРОЦЕСИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО СТУПЕНЕВОГО ЗГОРЯННЯ У КОНТЕКСТІ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТУ НА ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ

В межах цієї роботи увага зосереджувалася на різних імплементаціях концепції низькотемпературного ступеневого згоряння задля зменшення виділення оксидів азоту (NO_x) на теплоелектростанціях. У дослідженні зроблено узагальнений аналіз механізмів утворення NO_x у системах згоряння та обґрунтовано ефективність низькотемпературного згоряння як засобу зменшення їх емісії. Проаналізовано ключові шляхи утворення NO_x : термічний, паливний і проміжний, із зазначенням умов їх домінування. Описано вплив пікової температури полум'я, локального стехіометричного співвідношення та характеру зонування полум'я на інтенсивність утворення NO_x . Обґрунтовано термодинамічні й кінетичні передумови для застосування стратегій зниження емісій, зокрема ступеневого згоряння, рециркуляції димових газів (EGR), водяного впорскування та зменшення попереднього нагріву повітря. Визначено, що найефективнішим є підхід LTC, який передбачає контроль пікової температури згоряння. Розглянуто варіанти реалізації LTC: HCCI, PCCI та RCCI, із вказівкою на їхній вплив на структуру полум'я та концентрацію шкідливих речовин. Доведено, що в умовах кінетичних обмежень термічне утворення NO_x не досягає рівноважних значень, і тому для точного прогнозування емісії необхідне врахування динаміки реакцій. Проаналізовано застосування селективного каталітичного відновлення (SCR) як посткомбустійної технології контролю NO_x , з урахуванням особливостей температурного діапазону, типів каталізаторів та їхньої деградації. Досліджено можливість використання CFD-моделювання (зокрема моделей RANS та k-ε) для відтворення температурних полів, зон згоряння та розподілу концентрацій реагентів, що дозволяє кількісно оцінити утворення NO_x на основі локальних умов. Показано, що взаємодія турбулентності з хімічною кінетикою вимагає застосування спрощених механізмів реакцій або моделей з редукованою кількістю ступенів свободи для забезпечення обчислювальної ефективності. Зроблено висновок про доцільність комплексного підходу, що поєднує конструктивні, термодинамічні та каталізаторні рішення, з динамічним перемиканням режимів згоряння для адаптації до змінних умов експлуатації.

Ключові слова: CFD моделювання, отруєння каталізатору, адіабатична температура полум'я, топкова камера, фрізаут, рециркуляція димових газів.

Постановка проблеми. Проблематика впливу технологій енергетичного виробництва на довкілля в умовах зростаючої потреби у тепловій енергії набуває особливої актуальності. Сучасна енергетика стикається з комплексом викликів, які охоплюють не лише необхідність підвищення ефективності перетворення хімічної енергії палива на корисну теплову енергію, а й обов'язкову вимогу дотримання жорстких екологічних стандартів щодо викидів забруднювальних речовин.

Зокрема, особливу увагу дослідників і розробників привертає проблема зменшення обсягів оксидів азоту (NO_x), що утворюються під час високотемпературного горіння палива в енергетичних установках, оскільки ці сполуки є одними з основних джерел утворення смогу, кислотних дощів і вторинних аерозолів.

Традиційні методи скорочення викидів NO_x , наприклад застосування селективного каталітичного відновлення (SCR) або селективного нека-

талітичного відновлення (SNCR), передбачають використання додаткових реагентів, складного обладнання й суттєвих капіталовкладень. Тому пошук внутрішньотопкових рішень, спрямованих на запобігання утворенню оксидів азоту ще на стадії згоряння палива, стає пріоритетним напрямом розвитку сучасних теплогенераційних технологій. Одним із перспективних підходів є реалізація режимів низькотемпературного ступеневого згоряння, що базуються на багатоетапному підведенні палива й окиснювача з контрольованим розподілом температурного поля та кисню у топковому об'ємі.

Однак ефективна реалізація таких режимів потребує глибокого науково-технічного обґрунтування щодо впливу різних параметрів горіння (температури, швидкості потоків, концентрації реагентів, конфігурації пальників тощо) на кінетику утворення NO_x . У цьому контексті важливим завданням є пошук технічно та економічно доцільних рішень, здатних забезпечити сталий баланс між продуктивністю теплогенераційних систем і дотриманням екологічних нормативів, зокрема у сфері теплових електростанцій, які залишаються основою енергозабезпечення в багатьох країнах. Таким чином, дослідження процесів низькотемпературного ступеневого згоряння розглядається як ключовий напрям оптимізації теплотехнічних установок у контексті забезпечення екологічної безпеки та енергетичної ефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методологічне підґрунтя сучасних підходів до мінімізації емісій оксидів азоту (NO_x) у процесах низькотемпературного ступеневого згоряння сформовано у низці останніх теоретичних і прикладних досліджень.

У праці С. Янта-Ліпінської запропоновано комплексну теоретико-експериментальну концепцію дозованого спрямованого впорскування вологи – *directed metered flame ballasting* – у критичні зони полум'я (SDW-I та SDW-II) [1]. Послідовне зволоження локальних осередків горіння, реалізоване за рахунок зонального поділу факела, пригнічує як термічний, так і проміжний механізми утворення NO_x . Експерименти, виконані на чотирьох парових котлах потужністю від 8,37 до 53,78 МВт у реальних виробничих умовах, засвідчили зниження масової емісії NO_x у середньому на 30–40% без погіршення ефективності спалювання; питомі витрати пари на впорскування не перевищували 1% від паропроductивності, а приріст теплової ефективності котлів повністю компенсував додаткові витрати пари.

Дисертаційне дослідження Р. Бірлі спрямоване на зменшення NO_x -емісії на теплових електростанціях, що працюють на пиловугільному паливі, шляхом сумісного спалювання вугілля з продуктами згоряння біомаси – золовиною електрофільтрів (PFA) та шлаком з дна топки (FBA) [2]. Гіпотеза про каталізаторну роль елементів K, Ca, Na та Mg у таких сумішах була перевірена на трьох типових бітумінозних вугіллях, одному низькорективному вугіллі та біомасі з високою реактивністю. Додавання PFA або FBA спричинило зростання частки леткого азоту та зменшення частки азоту, зв'язаного у чарі, що, у свою чергу, сприяло підвищенню ступеня перетворення вуглецю незалежно від швидкості нагріву. Для верифікації результатів у промисловому масштабі застосовано тривимірну *slice-model*, яка поділяє топку на об'ємні зрізи; похибка прогнозу викидів NO_x не перевищила $\pm 10\%$ від експериментально вимірених значень.

Дж. Сільвагні зі співавторами розробили конфігурацію *reactivity-controlled compression ignition (RCCI)* дизель – природний газ у контексті низькотемпературного згоряння (LTC) та її впливу на викиди NO_x і незгорілих вуглеводнів (HC) [3]. У однокамерному дизельному двигуні великої потужності природний газ (низькорективне паливо, LRF) подавали разом із повітрям, а дизельне паливо (високореактивне паливо, HRF) впорскували під високим тиском. Використання високочастотних вимірювальних систем *Fast-FID* і *Fast-NO_x* (500 Гц) дозволило встановити статистично значущі кореляції між циклічною варіацією середнього індикаторного тиску (IMEP) і миттєвими викидами HC ($R^2 = 0,86$), а також між піковою швидкістю виділення теплоти (RoHR) та миттєвими викидами NO_x ($R^2 = 0,82$). Ранні кути початку впорскування ($\text{SOI} = -60^\circ$ до BMT) забезпечують гаус-подібний профіль згоряння з поліпшеним змішуванням і нижчими NO_x -викидами, проте характеризуються значними циклічними варіаціями та підвищеними HC; натомість пізні SOI (-10° до BMT) формують двоступеневий режим горіння з локальними зонами високої температури, що інтенсифікує утворення NO_x .

Теоретичне дослідження С. Губбі з колегами присвячене визначенню досяжного мінімуму NO_x при спалюванні аміаку в багатоступеневих камерах згоряння [4]. Використовуючи мережу реакторів (*chemical reaction network, CRN*) для моделювання конфігурації *rich-quench-lean (RQL)*, автори ідентифікували комбінації тиску, температури, еквівалентного коефіцієнта (Φ) та часу перебу-

вання, що забезпечують мінімальні концентрації NO_x . За тиску 1 бар мінімальний рівень становить 195–400 ppm, тоді як за 20 бар він може знижуватися до ≈ 25 ppm (≈ 23 ng / J). Ключовим чинником залишаються нерівноважні процеси утворення NO у багатому полум'ї першої стадії, які не встигають досягти рівноваги через обмежений час перебування; оптимізація передбачає одночасне зменшення вихідної концентрації NO та обмеження вмісту H_2 (не більше 125% від рівноважного значення).

Отже, не дивлячись на суттєвий прогрес, продемонстрований у зазначених роботах, питання комплексного використання процесів низькотемпературного ступеневого згоряння для систематичного зниження NO_x -емісії на теплових електростанціях залишаються недостатньо розробленими та потребують подальших високоточних експериментальних і числових досліджень.

Постановка завдання. Метою статті є огляд моделі низькотемпературного ступеневого згоряння у контексті зменшення викидів оксидів азоту на теплових електростанціях на базі РССІ у поєднанні із посткомбустійним методом у вигляді селективного каталітичного відновлення.

Виклад основного матеріалу. Формування оксидів азоту (NO_x) у системах згоряння обумовлюється, як правило, двома механізмами:

- термічні NO_x формуються при реагуванні азоту з повітрям для горіння при температурах вище 1300 °С. Цей процес, описаний в межах механізму Зельдовича, будучи сильно залежним від пікової температури полум'я, є вираженням під час згоряння природного газу та стрімко зростає зі збільшенням температури, набуваючи домінуючого характеру за умов мінімального вмісту паливного азоту;

- паливні NO_x є продуктами хімічного сполучення азоту з паливом (тобто вугіллям, нафтою, біопаливом тощо). При згорянні виникають азотовмісні сполуки, тобто, наприклад, синильна кислота та аміак, які окиснюються до різних оксидів азоту в залежності від концентрації кисню. У процесі згоряння твердого палива ці оксиди становлять основну частку загальних викидів NO_x (до приблизно 75%) і є більш чутливими до локального стехіометричного співвідношення, ніж до температури. Проміжні NO_x мають подібний механізм утворення, швидко синтезуючись у зонах з великим вмістом палива, становлячи до 5% загальних викидів.

Низькотемпературне згоряння (low-temperature combustion – LTC) спрямоване на зниження піко-

вої температури полум'я головним чином для пригнічення утворення термальних NO_x , утворення яких експоненційно зростає з підвищенням температури [5]:

$$SNO_{\text{термальний}} \propto [N_2][O_2]^{1/2} \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

де E – енергія активації, R – газова стала.

Для реалізації такого горіння застосовується низка стратегій. Ступеневе згоряння полягає у постадійній подачі повітря, що обумовлює початок горіння за умов достатньої кількості палива та дефіциту повітря. Такий підхід розподіляє виділення тепла та запобігає локальним стрибкам температури. Інша методика полягає у рециркуляції димових газів (exhaust gas recirculation – EGR), в ході чого відбувається повторна подача вихлопних газів у зону згоряння, що таким чином сприяє поглинанню тепла та зниженню концентрації кисню. З метою організації рециркуляції, димові гази, як правило, після економайзера відбираються за температури 300–400 °С рециркуляційними димососами та подаються у топку. Характер рециркуляції сильно залежить від способу введення газів в топку, до яких входить введення через шліци під горілками, через кільцевий канал навколо горілок, або змішування цих газів із повітрям перед горілками, що вдувається. Найефективнішим виявляється змішування газів, оскільки температура у ядрі факела знижується найбільше [6]. Так, цей засіб здатний сприяти зниженню азоту на 40–30%, якщо частка впроваджених димових газів складає 20–25%.

Впорскування води також виявляється ефективним, оскільки рідини здатні поглинати тепло при випаровуванні. Зменшення попереднього нагріву, попри меншої ефективності, також робить свій внесок, адже зниження температури повітря для горіння, що надходить, хоча і незначно, але знижує початкову температуру полум'я.

У будь-якому випадку, мета полягає у створенні широкої зони менш гарячого полум'я задля запобігання локальних високотемпературних зон, в яких можуть формуватися термальні оксиди азоту. Ступеневе згоряння, будучи найбільш релевантним для теми поточного дослідження, має 2 фундаментальних різновиди [7]. Повітряне, або двоступеневе згоряння полягає у подачі лише частини необхідного повітря для горіння (близько 70–90%) разом з паливом до пальників (первинний ступінь). У цій первинній зоні згоряння утворюється обмежена кількість NO_x , які в ній також можуть поглинатися. Залишкове повітря потім

подається над первинним полум'ям через повітря отвори для перепалу задля завершення процесу згоряння у зоні з меншою температурою (вторинний ступінь).

В ході паливного ступеневого згоряння більшість повітря подається до головної топки, а додаткове паливо впорскується потім. Фактично, після первинного ступеня, вторинний передбачає створення умов більшої кількості палива, що сприяє поглинанню оксидів азоту шляхом їхнього відновлення у процесі реакції з вуглеводневими радикалами [8]. В межах третього ступеня повітря подається для остаточного згоряння залишкового палива. Критичний аспект цього виду ступеневого згоряння полягає у необхідності контролю того, щоб не утворювалися кисневі кишені та не перешкождали процесу відновлення оксидів азоту.

З точки зору термодинаміки, адіабатична температура згоряння залежить від значення нагрівання полум'я та початкових умов суміші (включно із коефіцієнтом надлишку повітря). В умовах ідеального стехіометричного згоряння типового вуглеводню за відсутності втрат тепла, адіабатична температура згоряння може перевищувати 2000 °C. Однак введення надлишкового повітря знижує цю температуру шляхом поглинання енергії нагріванням надлишкової маси газу. Наприклад, враховуючи 10% надлишкового повітря, температура полум'я може впасти на декілька сотень градусів. Таким чином, сама по собі наявність збідненої суміші призводить до нижчої рівноважної температури полум'я, що є термодинамічним обґрунтуванням низькотемпературного горіння. Проте, термодинаміка рівноваги сама по собі не є достатньо ефективною у задачах визначення викидів оксидів азоту, оскільки їхній синтез є майже завжди кінетично обмеженим, а не знаходиться в стані рівноваги. За типових температур полум'я рівноважна концентрація NO_x може бути порядку декількох тисяч ppm (мільйонних часток). Це є явищем «фрізауту» (freeze-out) оксиду азоту, тобто коли гази покидають зону полум'я та подальшим зниженням температури, реакції, які б перетворили NO_x до N_2 та навпаки, уповільнюються, фактично залишаючи оксиди азоту в незмінній формі. З огляду на це, модель, заснована суто на концепції рівноваги, має тенденцію завищувати прогноз NO_x , припускаючи кількості, близькі до рівноважних, при високих температурах, тоді як фактичний NO_x визначається взаємодією температури та скінченного часу реакції [9].

В той час як LTC за своєю суттю являє собою групу методик пригнічення синтезу NO_x , підходи

регуляції їхньої кількості також може зосереджуватися на зниженні NO_x , вже після згоряння. Ці підходи охоплюють принцип селективного каталітичного відновлення (Selective Catalytic Reduction – SCR) в ході якого застосовуються каталізатори на основі оксидів металів задля його проведення за відносно низьких температур з підвищеною ефективністю. SCR передбачає введення азотовмісного відновника, зазвичай NH_3 у димовий газ на виході топки та економайзера. В присутності каталізатора та кисню, NH_3 селективно вступає в реакцію з NO та NO_2 з продуктами у вигляді молекулярного азоту та водяної пари [10].

У зв'язку із переважанням NO у димових газових викидах, його каталітичне відновлення є домінуючим у більшості індустріальних застосувань цього процесу. Сам процес є кінетично сприятливим у температурному діапазоні реакції 250–430 °C, дозволяючи ефективно позбавлення оксидів азоту без негативних ефектів, які виникають в умовах високої температури.

В якості каталізаторів найчастіше застосовуються оксиди ванадію, титану, вольфраму ($\text{V}_2\text{O}_5\text{--TiO}_2\text{--WO}_3$) та цеоліти, які виготовляються у вигляді стільникових або гофрованих структур задля максимізації співвідношення площі поверхні до об'єму. З точки зору способів каталітичного відновлення, типово застосовуються три конфігурації:

- High-dust (високопиловий): встановлюється перед пиловловлювачами; піддається дії високого вмісту золи, тому оснащується обдувачами сажі;
- Low-dust (низькопиловий): розміщується після електрофільтрів, що забезпечує триваліший термін служби каталізатора та нижчу інтенсивність забруднення;
- Tail-end (кінцева стадія): встановлюється після всіх етапів очищення димових газів; потребує повторного нагрівання газу, але має перевагу у вигляді мінімальної деградації каталізатора.

З точки зору термодинаміки, SCR підхід вирішує проблему фрізауту, оскільки ефективність видалення NO_x менш залежна від швидкого зниження температури. Крім того, повторне нагрівання димових газів за допомогою обводу економайзера або пальників у газоході забезпечує підтримання робочих умов реактора навіть за часткового навантаження котла.

З іншого боку, економічно застосування SCR систем пов'язане з вищими капітальними та експлуатаційними витратами, а-ніж звичайні методи контролю кількості, особливо з причини необ-

хідності великих об'ємів каталізаторів та витрат інших реагентів. До того ж, каталізатори за своєю суттю є речовинами, чутливими до спікання, отруєння та забруднення золою. Таким чином, найбільш належна стратегія має передбачати як каталізаторні, так і традиційні підходи.

Обчислювальна гідродинаміка (Computational Fluid Dynamics – CFD) є інструментом, призначеним для детального моделювання процесів ступеневого згоряння із урахуванням геометрії реальних топків [11]. Симуляції RANS стаціонарного стану (Reynolds-averaged Navier-Stokes – рівняння Нав'є Стокса (рівняння руху в'язкої рідини), усереднені за Рейнольдсом) із моделями турбулентності (як наприклад k-ε) та згоряння (хімія зі скінченною швидкістю, вихрова дисипація (eddy dissipation concept) або гібридні моделі) можуть застосовуватися для моделювання тенденцій NO_x спочатку за допомогою обчислення полів потоку, температури та концентрації основних речовин, таких як O₂, CO₂, CO. Потім для NO_x застосовується постпроцесор та розв'язується транспортне рівняння, де джерелові терміни залежать від місцевих умов: температури та рівня O₂:

$$\nabla \cdot (\Gamma_i \nabla Y_i) + \omega_i \quad (2)$$

ω_i – масова частка, Γ_i – ефективний коефіцієнт дифузії, який включає молекулярну та турбулентну дифузію.

Враховуючи, що формування оксидів азоту в системах згоряння тісно пов'язане із температурою полум'я, розподілом повітря з паливом та зонуванням топків, існує практична потреба у вдосконалених технологіях контролю. Фундаментальний принцип концепції низькотемпературного згоряння, описаного у поточному дослідженні, полягає у подовженні часу змішування палива з повітрям та підтриманні температури згоряння нижче необхідної для формування NO_x, що досягається за допомогою EGR та ступеневого згоряння.

Запалення однорідної горючої суміші від стискання (homogeneous charge compression ignition – HCCI), що є головним різновидом LTC, полягає у однорідному змішуванні палива з повітрям до запалювання, що передбачає раннє введення палива у топку, забезпечуючи достатній час для утворення однорідної суміші. У кінцевому випадку, процес згоряння обумовлюється хімічною кінетикою, оскільки відбувається одночасне запалювання на кількох ділянках топки. В контексті теплових електростанцій, такий тип згоряння може бути досягнутий за допомогою пальників

з низькими викидами NO_x (Low-NO_x Burners). Проте за використання HCCI, можуть виникати високі показники тепловиділення.

У цьому відношенні, запалення попередньо перемішаної суміші від стискання (premixed charge compression ignition – PCCI) є більш адаптивним у зв'язку зі своєю сумісністю з системи прямої ін'єкції. Такий тип запалення може бути реалізований шляхом введення палива на декількох стадіях з метою створення збідненої попередньої змішаної суміші, запобігаючи виникненню зон із найвищою концентрацією палива. Транспортне рівняння для NO_x у PCCI відрізняється тим, що вихідний терм ω_{NO} залежить вже від кількох подій введення палива:

$$\omega_{NO} = k_{NO} [N_2] [O_2]^{0.5} \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

де k_{NO} є константою ефективної швидкості, яка враховує вплив турбулентних потоків на хімічні реакції, яка зазвичай моделюється за EDC:

$$\omega_{NO} = \min(\omega_{kin}, \omega_{турб}), \omega_{турб} = C_{EDC} \cdot \rho \cdot \frac{k}{\min(Y_{паливо}^s, Y_{O_2}^{1+s})} \quad (4)$$

де ε є швидкістю турбулентної дисипації, k – турбулентною кінетичною енергією, $Y_{паливо}$ та Y_{O_2} є масовими частками палива та кисню.

Стратегія запалення шляхом контролю реактивності (reactivity controlled compression ignition – RCCI) передбачає застосування низькореактивного палива, яке вводиться першим з метою утворення однорідної суміші, та супроводжується введенням високореактивного палива безпосередньо для контролю запалення. Градієнт реактивності, який визначається за допомогою просторового розподілу реактивності палива ($\lambda = \frac{\text{цетанове число}_{\text{низька реактивність}}}{\text{цетанове число}_{\text{висока реактивність}}}$), визначає фазу та тривалість горіння.

На рис. 1 зображено взаємозв'язок між еквівалентним співвідношенням паливо-повітря (Φ) та температурою згоряння (T) для різних режимів згоряння з точки зору викидів шкідливих речовин. Режими HCCI, PCCI та RCCI займають значно вигідніші ділянки діаграми на відміну від згоряння звичайного палива [12].

Незважаючи на ефективність таких методів, існує потреба у стратегії перемикавання режиму. Така стратегія передбачає підлаштування робочих параметрів: часові налаштування введення палива θ_{SOI} , кількість палива $m_{паливо}$, швидкість потоку повітря $\dot{m}_{паливо}$, та швидкість EGR. Динаміка переходу моделюється за допомогою контрольного рівняння для умов в топці:

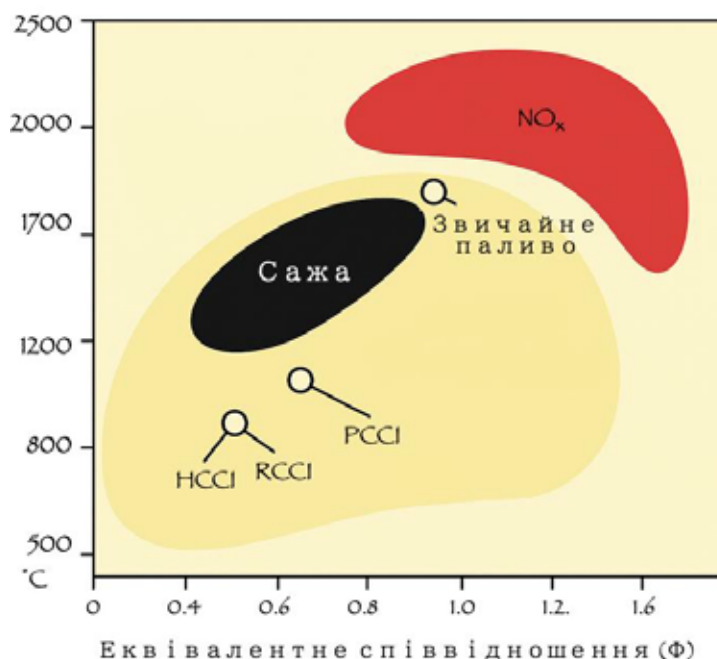


Рис. 1. Ф-Т діаграма різних моделей згоряння з урахуванням рівнів виділення сажі та оксидів азоту

$$\frac{dP}{dt} = (\gamma - 1) \frac{1}{V} (HRR - \dot{Q}_{\text{втрата}}) + \gamma \frac{P}{V} \frac{dV}{dt} \quad (5)$$

де HRR – швидкість виділення тепла (heat release rate), γ – показник адиабати, V – об'єм топки, $\dot{Q}_{\text{втрата}}$ – швидкість тепловтрат.

Оскільки за умов застосування РССІ паливо вводиться протягом декількох стадій до запалення, що забезпечує його рівномірний перебіг під час стискання, формування термальних NO_x є низьким, проте ще достатньо високим, щоби мати сенс у застосуванні SCR для їх доведення до нормативних меж. До того ж, температура вихлопу в РССІ зазвичай достатня для ефективної роботи SCR.

Висновки. Визначено, що підхід LTC є найбільш перспективним з огляду на здатність керу-

вати температурним режимом з високою точністю. Розглянуті варіанти реалізації LTC (HCCI, PCCI, RCCI) демонструють потенціал до істотного скорочення утворення шкідливих сполук за рахунок зміни структури полум'я та умов перебігу реакцій. Також підтверджено доцільність використання CFD-моделювання як інструменту кількісної оцінки утворення NO_x у реальних умовах, що дозволяє враховувати локальні термодинамічні й кінетичні особливості. Паралельно розглянуто посткомбустійні технології, зокрема селективне каталітичне відновлення (SCR), що дозволяє ефективно видаляти залишкові оксиди азоту у вихлопних газах. Обґрунтовано доцільність поєднання методів первинного та вторинного контролю з урахуванням теплових режимів, деградації каталізаторів і динаміки зміни навантаження котлів.

Список літератури:

1. Janta-Lipińska S. The method of nitrogen oxide emission reduction during the combustion of gaseous fuel in municipal thermal power boilers. *Journal of New Technologies in Environmental Science*. 2020. Vol. 3. No. 2. DOI:10.53412/jntes-2020-3.2
2. Birley R. I. Additives for the reduction of NO_x emissions in large scale solid fuel combustion : doctoral thesis / University of Leeds, Centre for Doctoral Training in Bioenergy, School of Chemical and Process Engineering. Leeds, June 2020. 292 p. URL: <https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/27395/1/Thesis%20RI%20Birley%20UoL%2030%20June%202020.pdf> (last accessed: 17.06.2025).
3. Experimental characterization of hydrocarbons and nitrogen oxides production in a heavy-duty diesel–natural gas reactivity-controlled compression ignition engine / Silvasni G., Narayanan A., Ravaglioli V., Srinivasan K. K., Krishnan S. R., Collins N., Puzinauskas P., Ponti F. *Energies*. 2023. Vol. 16. 5164. DOI:10.3390/en16135164
4. Evaluation of minimum NO_x emission from ammonia combustion / Gubbi S., Cole R., Emerson B., Noble D., Steele R., Sun W., Lieuwen T. *Proceedings of the 1st IGTC – Dispatchable Technology & Innovations for a Carbon-Neutral Society (10–11 October 2023, Brussels, Belgium)*, 2023. Paper I. D.: 2-IGTC23.

5. Singh A., Agarwal A. Low temperature combustion engines and mode switching strategies – A review. *Journal of Energy and Environmental Sustainability*. 2018. Vol. 6. P. 42–47. DOI:10.47469/JEES.2018.v06.100066
6. An experimental analysis of high-pressure exhaust gas recirculation system in SI engine / Anil, Ankur, Kumar A., Singh G., Singh A., Kaushik N. *Industrial Engineering Journal*. 2025. Vol. 54. Iss. 4. No. 2. P. 47–52.
7. Reducing NO_x emissions from ammonia combustion through staged combustion / Nasim M., Landis J., Das S., Nawaz B., Mack J. *Proceedings of the ASME Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, 2024. DOI:10.1115/ICEF2024-140772
8. Smith D. J. Coal reburning reduces NO_x emissions. *Power Engineering* : website. 2000. URL: <https://surli.cc/eoedij> (last accessed: 17.06.2025).
9. Stark M. S., Harrison J. T. H., Anastasi C. Formation of nitrogen oxides by electrical discharges and implications for atmospheric lightning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1996. Vol. 101. No. D3. P. 6963–6969. DOI:10.1029/95JD03008
10. Chen Y.-J., Tan P., Yao C., Lou D. Effect of catalyst coating strategy on NO_x reduction and passive soot oxidation for selective catalytic oxidation-selective catalytic reduction catalyst on diesel particulate filter. *WCX SAE World Congress Experience*. April 2025. DOI: 10.4271/2025-01-8490
11. Le D. K., Lee M., Kwon H. Optimization of a hydrogen burner to minimize NO_x emissions using computational fluid dynamics and response surface methodology. *Fuel*. 2025. Vol. 401. 135818. DOI:10.1016/j.fuel.2025.135818
12. Gadalla M. Computational fluid dynamics studies on spray assisted combustion of alternative energy carriers : thesis for the PhD degree / advisor Vuorinen V. April 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.16927.74406

Usov I.L., Sheleshei T.V. LOW-TEMPERATURE STAGED COMBUSTION PROCESSES IN THE CONTEXT OF REDUCING NO_x EMISSIONS AT THERMAL POWER PLANTS

*Within the framework of this work, attention was focused on various implementations of the concept of low-temperature staged combustion in order to reduce nitrogen oxides (NO_x) emissions at thermal power plants. The study provides a generalized analysis of the mechanisms of NO_x formation in combustion systems and substantiates the effectiveness of low-temperature combustion as a means of reducing their emissions. The key pathways of NO_x formation are analyzed: thermal, fuel, and intermediate, with indication of the conditions under which they dominate. The influence of peak flame temperature, local stoichiometric ratio, and the character of flame zoning on the intensity of NO_x formation is described. The thermodynamic and kinetic prerequisites for the application of emission reduction strategies are substantiated, in particular staged combustion, exhaust gas recirculation (EGR), water injection, and reduction of intake air preheating. It is determined that the most effective approach is LTC, which involves control of the peak combustion temperature. Variants of LTC implementation are considered: HCCI, PCCI, and RCCI, with indication of their influence on flame structure and concentration of harmful substances. It is proven that under kinetic limitations, thermal formation of NO_x does not reach equilibrium values, and therefore accounting for the dynamics of reactions is necessary for accurate emission prediction. The application of selective catalytic reduction (SCR) as a post-combustion technology for NO_x control is analyzed, taking into account the specifics of the temperature range, types of catalysts, and their degradation. The possibility of using CFD modeling (in particular RANS and *k-ε* models) to reproduce temperature fields, combustion zones, and distribution of reagent concentrations is studied, which makes it possible to quantitatively evaluate NO_x formation based on local conditions. It is shown that the interaction of turbulence with chemical kinetics requires the use of simplified reaction mechanisms or models with a reduced number of degrees of freedom to ensure computational efficiency. A conclusion is made about the expediency of a comprehensive approach that combines constructive, thermodynamic, and catalytic solutions, with dynamic switching of combustion modes to adapt to changing operating conditions.*

Key words: CFD modeling, catalyst poisoning, adiabatic flame temperature, furnace chamber, freeze-out, exhaust gas recirculation.

Дата надходження статті: 17.06.2025

Дата прийняття статті: 27.06.2025

Опубліковано: 27.10.2025