

УДК 661.98

ЕНЕРГОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА КОТЕЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ, МОДЕРНІЗОВАНОГО НА БАЗІ СТРУМЕНЕВО- НІШЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

М. З. Абдулін, д-р техн. наук

mzabdulin@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9900-7314

О. А. Сірий, канд. техн. наук

oasiryi@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5811-9037

О. О. Кобилянська

123olykob@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4195-0841

Національний технічний
університет України
«Київський політехнічний
інститут
імені Ігоря Сікорського»,
03056, Україна, м. Київ,
пр. Перемоги, 37

У статті наведено результати енергоекологічної оцінки котельного устаткування промислового призначення, обладнаного струменево-нішевою технологією спалювання. Наголошено, що до основних принципів, покладених в основу даної технології, відносять такі, як: раціональний розподіл палива в потоці окисника; стійка регульована структура течії палива, окисника і продуктів згоряння; саморегульованість складу паливної суміші в зоні стабілізації факелу при зміні навантаження агрегату. Підкреслено, що станом на сьогодні за допомогою струменево-нішевої технології модернізовано велику кількість промислового газоспалюючого устаткування, як-от: котли, печі, сушарки, об'єкти металургії та ін. Констатовано, що результати промислового впровадження технології дозволили накопичити значний обсяг технічної інформації й дали можливість зробити попередню екологічну оцінку при проведенні модернізації газоспалюючого устаткування. Як показує практика, на сучасному етапі основним напрямом вдосконалення технології є поліпшення її екологічних показників. У роботі встановлено вплив основних режимних і технічних параметрів вогнетехнічного обладнання на його емісійні показники. Доведено, що існує можливість зниження оксидів азоту первинними технологічними методами, найпростішим й найефективнішим з яких вважається введення газів рециркуляції у топковий простір. За результатами аналізу емісійних показників модернізованого вогнетехнічного обладнання потужністю 0,5–60 МВт отримано дані для оцінки емісійних показників котлів малої та середньої потужності залежно від основних впливових факторів, а саме: від типорозміру агрегату, коефіцієнта надлишку повітря й навантаження котла, а також враховано вплив введення газів рециркуляції у топковий простір на рівень концентрації оксидів азоту. Підтверджено ефективність застосування схеми введення газів рециркуляції в потік первинного повітря і переваги в порівнянні з технологіями спалювання на базі вихрових пальників. За результатами промислового експерименту встановлено енергетичну ефективність запропонованих заходів на прикладі залежностей ККД від навантаження котлів ПТВМ-50 і КВГМ-20.

Ключові слова: струменево-нішева технологія, оксиди азоту, режимні параметри, рециркуляція газів.

Вступ

Нині найвищий інтегральний показник негативних техногенних навантажень на навколишнє природне середовище практично на всій території серед європейських держав має Україна. Відомо, що одним з основних джерел забруднення оточуючого середовища виступає енергетика, тому розуміння закономірностей утворення шкідливих речовин і можливість прогнозування їх емісії на сьогодні – одне з головних питань забезпечення норм охорони навколишнього середовища [1].

До основних шкідливих елементів, що утворюються при спалюванні природного газу, належать оксиди азоту й вуглецю. Як відомо, оксиди азоту – це компонент атмосфери, але парникова активність закису азоту у 298 разів вище, ніж у вуглекислого газу. Гранично допустима концентрація діоксиду азоту ПДК_{NO_x} у приземному шарі повітря становить 0,085 мг/м³, у той час, як для NO ПДК_{NO}=0,6 мг/м³ [2].

Відомо, що NO_x, утворені у процесі згоряння, зазвичай виникають або через термічну фіксацію атмосферного азоту в повітрі для спалювання, що призводить до утворення «термічних NO_x», як це спочатку постулював Зельдович (1946), або через поєднання фрагментів вуглеводнів й атмосферного азоту в зоні горіння, унаслідок чого утворюються «швидкі NO_x», що вперше встановив Фенімор (1971), або до перетворення хімічно зв'язаного азоту у паливі, що призводить до «паливних NO_x». Вважається, що на утворення термічних NO_x впливають такі фактори, як наявність вільного кисню в

зоні згоряння (O_2), температура, тиск і час перебування у високотемпературній зоні. Що стосується паливних NO_x , то їх утворення залежить від таких факторів, як вміст азоту у паливі, загальна кількість надлишкового повітря й відносний розподіл первинного і вторинного повітря для згоряння [3].

Відомо, що існують два принципово різних напрями зниження викидів токсичних газоподібних речовин [4]:

- пасивний – очищення димових газів за допомогою спеціальних установок, що монтуються за котлом на ділянці між останньою теплосприймаючою поверхнею і димарем;
- активний – пригнічення процесу емісії NO_x на початковій стадії їх формування.

Одним з найпоширеніших «активних» методів пригнічення емісії окислів азоту вважається введення частини відхідних газів у високотемпературну зону топкової камери шляхом рециркуляції продуктів згоряння. Із точки зору забезпечення екологічних показників схема рециркуляції довела свою ефективність для широкого кола вогнетехнічного устаткування. Вона широко застосовується як для камер згоряння газотурбінних установок [5], так і для котлів на твердому паливі [6], де за рахунок насичення продуктами спалювання пелетного палива перед подачею в топку вдалося покращити показники вигорання і сталість процесу горіння. Рециркуляція газів вважається ефективним механізмом регулювання максимальних температур горіння, а при забезпеченні стадійного горіння з використанням нестехіометричних пальників вдається забезпечити надійний процес експлуатації паливоспоживаючого устаткування з подальшим дотриманням екологічних показників [7, 8]. При використанні синтезованого газового палива, отриманого з вугілля, як окисника більш екологічною є суміш CO_2/O_2 у порівнянні з N_2/O_2 , що може бути реалізовано шляхом використання рециркуляції продуктів спалювання [9].

Виходячи з цього, нині одним із найпоширеніших режимних заходів і таких, що легко реалізуються і сприяють зменшенню викидів окислів азоту, є зниження надлишку повітря (Low Excess Air – LEA) у топці. Як відомо, у результаті зменшення вмісту кисню в факелі відбувається придушення утворення як термічних, так і паливних NO_x , саме тому даний захід може бути застосовано при спалюванні різних видів органічного палива [10].

До пасивних методів зниження окислів азоту відносять технології селективного каталітичного й некаталітичного відновлення азоту. За такого очищення від окислів азоту вміст NO_x у продуктах згоряння зменшується в середньому у п'ять разів. Однак існують суттєві недоліки методу, такі як висока вартість каталізаторів й обладнання, корозія матеріалів, висока робоча температура й обмежений строк служби каталізатора [11]. Тим не менш, висока ефективність, відносно проста установка й розумні експлуатаційні витрати роблять його ідеальним засобом видалення NO_x із димових газів.

Отже, усі методи видалення NO_x мають свої переваги й недоліки. Однак у загальній картині кожен метод окремо або у комбінації значно покращує екологічні показники обладнання. Подальші дослідження заходів контролю викидів NO_x , очевидно, стосуватимуться питань створення простіших технічних рішень, зниження вартості цих заходів і підвищення ефективності перетворення NO_x при більш низьких температурах.

Подальший матеріал буде присвячено перспективам застосування первинних заходів придушення емісії окислів азоту вогнетехнічним устаткуванням при впровадженні вітчизняних ефективних пальникових систем на базі струменево-нішевої технології (СНТ).

Основна частина

Останнім часом проведено модернізацію існуючого обладнання задля зниження окислів азоту. За результатами дослідження доведено, що на ефективність зниження емісії окислів азоту найбільше впливає технологія спалювання палива. Із точки зору канонічних принципів мінімізації концентрацій NO_x , таких як попереднє сумішеутворення, стадійне горіння і прямоочна аеродинамічна схема течії окиснювача, перспективними визнаються пальникові пристрої, розроблені у КПІ ім. Ігоря Сікорського, в яких, зокрема, використовується СНТ (рис. 1) [12].

Основні принципи, покладені в основу технології, наступні: раціональний розподіл палива в потоці окисника; стійка регульована структура течії палива, окисника і продуктів згоряння; саморегульованість складу паливної суміші в зоні стабілізації факелу у широкому діапазоні зміни швидкостей потоку палива і окисника, висока інтенсивність горіння, сталість й ефективність процесу у робочому діапазоні зміни теплової потужності. Станом на 2021 рік на базі СНТ напрацьовано значний досвід енергоекологічної модернізації котельного обладнання потужністю 0,5–125 МВт.

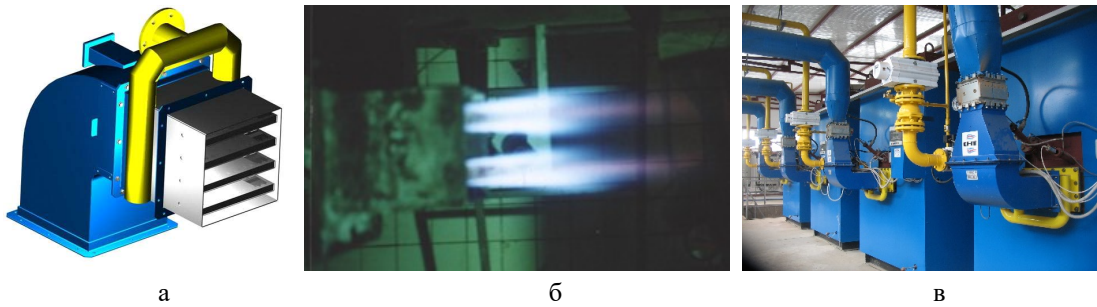


Рис. 1. Струменево-нішева технологія спалювання палива:

а – пальник, б – відкритий газовий факел, в – компоновка пальників на газоспоживаючому устаткуванні

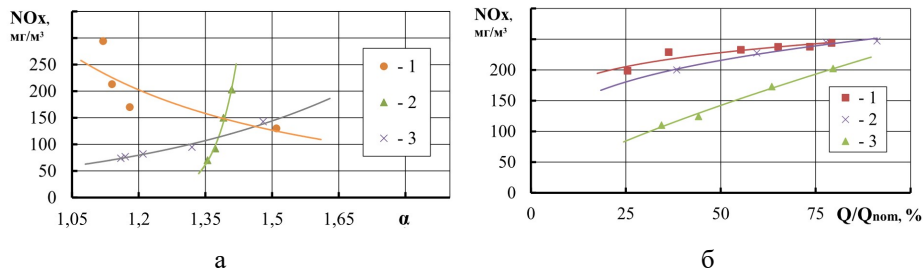


Рис. 2. Залежність концентрації оксидів азоту від основних технологічних параметрів на котельному обладнанні з СНТ залежно від:

а – коефіцієнта надлишку повітря (1 – ПТВМ-30, 2 – ДКВР-10, 3 – КВГМ-20);
 б – від навантаження котла (1 – КВГМ-20, 2 – ТВГ-8, 3 – КВГ-7,56)

Слід зазначити, що в Україні діє «Національний план скорочення викидів від великих паливо-спалювальних установок» [13], який безпосередньо стосується вогнетехнічного обладнання тепловою потужністю 50 МВт і вище і розрахований на поступову реалізацію до 2032 року включно. Таким чином, першим етапом його виконання розглядається вжиття первинних технологічних заходів, а другим – запровадження вторинних технологій на основі процесу відновлення оксидів азоту. Серед первинних заходів зниження оксидів азоту одним із найефективніших може розглядатися застосування рециркуляції продуктів спалювання у топковий простір вогнетехнічного об’єкта на базі високоефективної енергоекологічної технології спалювання СНТ.

Результати раніше проведених досліджень вказують на те, що на виникнення оксидів азоту (NO_x) значно впливають: коефіцієнт надлишку повітря в топці (α_T), продуктивність (D_0) і навантаження ($N=(D/D_0)\times 100\%$) котла [14], а також погана організація спалювання палива, тобто наявні недопали.

На рис. 2 наведено залежність концентрації оксидів азоту від основних технологічних параметрів на котельному обладнанні, модернізованому за допомогою СНТ. Із точки зору прогнозування емісійних характеристик практичне значення мають нормовані показники оксидів азоту $NO_x^{норм}$, які визначаються за відсутності всіх експлуатаційних впливів, при $\alpha=1,0$. Значення критичного надлишку повітря $\alpha_{кр1}>1,0$ (далі просто $\alpha_{кр}$) є визначальним параметром під час промислового налагодження котельного обладнання [15].

Завдяки використанню даних роботи [16] і результатів промислового впровадження пальникових пристроїв СНТ у табл. 1 представлено емісійні параметри модернізованого обладнання.

Таблиця 1. Емісійні показники котельного обладнання малої та середньої продуктивності [17]

Тип котла	Теплова потужність, МВт	$\alpha_{кр}$	NO_x^{max}			$NO_x^{норм}$		$NO_x^{норм}/NO_x^{max}$
			Виміри	Дослід прив. до $\alpha=1$	Розрахунок	Дослід	Розрахунок	
НИИСТУ-5	0,5	1,45	130	69,89	73,50	66	61	0,95
КВН-2,9	2,9	1,20	80	66,67	133,31	88	101	1,32
ДКВР-10	9,2	1,17	280	200,00	186,21	161	142	0,81
КВГМ-20	23,2	1,14	295	268,18	234,19	194	171	0,72
ПТВМ-50	58,2	1,17	350	304,35	296,74	209	219	0,69

Як видно з рис. 2, існує кореляція емісійних характеристик від режимних параметрів обладнання та його теплового навантаження. Із табл. 1 випливає, що також існує взаємозв'язок між нормалізованою й максимальними концентраціями оксидів азоту ($\overline{\text{NO}}_x = \text{NO}_x^{\text{норм}} / \text{NO}_x^{\text{max}}$). Так, для котельного обладнання теплопродуктивністю від 6,5 до 50 ГКал відношення $\overline{\text{NO}}_x$ має значення у діапазоні 0,69–0,81, виняток становить специфічне обладнання, представлене малогабаритними водонагрівачами контактного типу КВН і переобладнаними твердопаливними котлами НІИСТУ [13]. Для порівняння, технології із закруткою потоку за дослідними даними роботи [17] мають значення у середньому 0,78 із відхиленням від середнього значення для різних типів котельного устаткування не більше 7%. Слід зазначити, що середнє значення параметру $\overline{\text{NO}}_x$ для СНТ нижче на 8% у порівнянні з вихровими пальниками на відповідному устаткуванні, завдяки більш досконалому процесу сумішоутворення і горіння, що підтверджується результатами газового аналізу продуктів спалювання. Таким чином, на режимах, що відповідають $\text{NO}_x^{\text{норм}}$, з одного боку, фактично відсутній хімічний недопал за рахунок максимальних температур, що, з іншого боку, підвищує емісію оксидів азоту [14]. Із наведених даних також видно, що має місце суттєве збільшення концентрацій азоту як максимальних (NO_x^{max}), так і нормалізованих ($\text{NO}_x^{\text{норм}}$) зі збільшенням теплопродуктивності котлів (D_0).

Вплив продуктивності D_0 на емісію оксидів азоту (при $N=100\%$ і однакових значеннях ступеня екранування топок, типів пальників й об'ємного теплового навантаження топкового простору) можна пояснити дією масштабного ефекту. Якщо розглядати досягнутий рівень емісії оксидів азоту як результат дії теплообміну випромінюванням від факела до екранних поверхонь котла ($Q_{\text{рад}}=q_{\text{рад}} \cdot F_{\text{екр}}$, де $q_{\text{рад}}$ – радіаційний тепловий потік, $F_{\text{екр}}$ – екранована поверхня топки котла), тоді доля цього тепловідведення по відношенню до тепловиділення факелу ($Q_{\text{тепл}}=q_v \cdot V_t$, q_v – об'ємна теплова напруга топки, V_t – об'єм топки) визначатиметься габаритами котла. Оскільки масштаб лінійного розміру топки можна прийняти рівним $L=V_t^{1/3}$, то відношення теплових потоків спроститься наступним чином: $Q_{\text{рад}}/Q_{\text{тепл}}=F_{\text{екр}}/V_t \approx 1/L$. Можна прийняти, що продуктивність котла (за номінального навантаження та $q_v=\text{const}$) пропорційна об'єму топки ($D_0 \sim L^3$), тоді $Q_{\text{рад}}/Q_{\text{тепл}} \sim D_0^{-1/3}$. Останнє співвідношення вказує на зменшення долі тепловідведення від факелу зі збільшенням габаритів котла, у результаті чого підвищуються ефективна температура факелу й рівень емісії токсичних оксидів азоту.

Вплив габаритів котла на рівень емісії оксидів азоту підтверджується даними узагальнень у роботі [18], де показано, що $\text{NO}_x \sim d_{\text{екв}}^{0,8}$, де $d_{\text{екв}}$ – еквівалентний діаметр топкової камери. Наведене підтверджує значний вплив на концентрації NO_x у продуктах спалювання не тільки максимальних температур, а й швидкості його охолодження dT/dt , яка суттєво залежить від габаритів топки

$$\frac{dT}{dt} = f\left(\frac{H}{V}\right) = f(d_{\text{екв}}) \text{ і зменшується при збільшенні її розмірів.}$$

Прогнозування емісійних показників котлів невеликої потужності ($D_0 < 10$ ГКал) на природному газі зручно виконувати за наступною залежністю:

$$\text{NO}_x^{\text{max}} = a \cdot D_0^n, \quad (1)$$

де коефіцієнти a й n обираються індивідуально для певного типу обладнання.

У разі визначення емісії котельним обладнанням середньої продуктивності ($11 < D_0 < 120$ ГКал) краще застосовувати залежність

$$\text{NO}_x^{\text{max}} = a \cdot D_0^n / (b + c \cdot D_0), \quad (2)$$

де a , b , c – емпіричні коефіцієнти.

Таким чином, розрахункові значення максимальних NO_x^{max} у табл. 1 отримані за формулою (1) при $a=100$, $n=0,27$ (для котлів КВГ-7,56/6,5 та ДКВР-10); для котла НІИСТУ-5 коефіцієнти мають значення $a=92$, $n=0,266$; для контактного водонагрівача КВН-2,9 – $a=50$, $n=0,27$. Для досліджуваних котлів більшої потужності (КВГМ-20 і ПТВМ-50) емпіричні коефіцієнти становлять: $a=1000$, $b=30$, $c=2,77$.

Для визначення нормованого значення концентрацій $\text{NO}_x^{\text{норм}}$ доцільно застосувати залежність (1), значення коефіцієнтів наступні: $a=76$, $n=0,27$.

Результати порівняння дослідних і розрахункових значень характерних концентрацій оксидів азоту (рис. 2 і табл. 1) підтверджують достатній рівень їх співпадіння. Відхилення, що мають місце в

отриманих даних, можна пояснити не тільки похибками вимірювання, а й рядом неврахованих факторів, таких як: фактичний строк експлуатації об'єкта, особливості конструкції топкової камери. Таким чином, на практиці для визначення максимального значення концентрацій NO_x доречно використовувати залежність наступного вигляду [14]:

$$\text{NO}_x^{\max} = K_d \cdot K_D, \quad (3)$$

де K_d – параметр дискретних впливів, $K_D = a \cdot D_0^n$ – параметр продуктивності.

Слід додати, що подібним чином можна отримати характеристики $\text{NO}_x^{\max} = f(D_0)$ при спалюванні й інших видів палива.

У випадку, якщо продуктивність котла D_0 при встановленні впливу на емісійні показники NO_x визначається масштабним ефектом, тоді вплив навантаження ($N=(D/D_0) \times 100\%$) можна розглядати як залежність $\text{NO}_x \sim q_v^{0,5}$. У разі наявності кореляції між форсуванням топки q_v і навантаженням котла відповідну емісійну характеристику представляють у вигляді степеневі залежності:

$$\text{NO}_x = a(N/100)^n = a \cdot (D/D_0)^n. \quad (4)$$

Згідно з результатами, наведеними вище, й беручи до уваги особливості застосування формули (4), можна констатувати, що коефіцієнт a відображає рівень концентрації оксидів азоту при номінальному навантаженні котла з врахуванням взаємодії коефіцієнта надлишку повітря та інших факторів, вплив яких має суто дискретний характер (тип пальника, вид палива, компоновка та кількість ввімкнених пальників, особливості конструкції топкової камери тощо).

На рис. 3 наведено результати адаптації технології до спалювання природного газу при збідненні дуттьового повітря продуктами спалювання на котлах потужністю 7,56 і 9,3 МВт. Технологічно схема являє собою спосіб саморециркуляції і може бути ефективно реалізована на основі СНТ без технологічних обмежень. Регулювання об'єму газів, що додатково подаються до топкової камери, здійснюється шибберною заслінкою без застосування насоса рециркуляції. Введення суміші реалізовано через пальники, прямоточна схема яких, без закручування потоків палива і окисника, забезпечує достатньо рівномірну концентрацію збідненої паливної суміші [19].

Кількість газів рециркуляції визначається за співвідношенням:

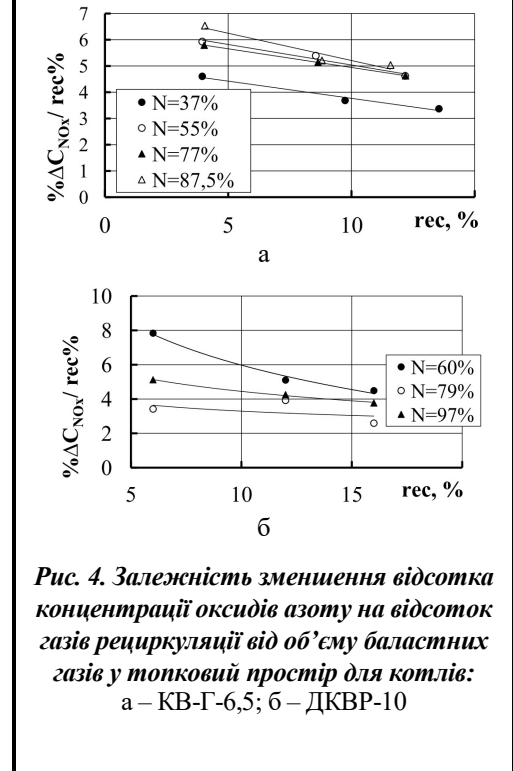
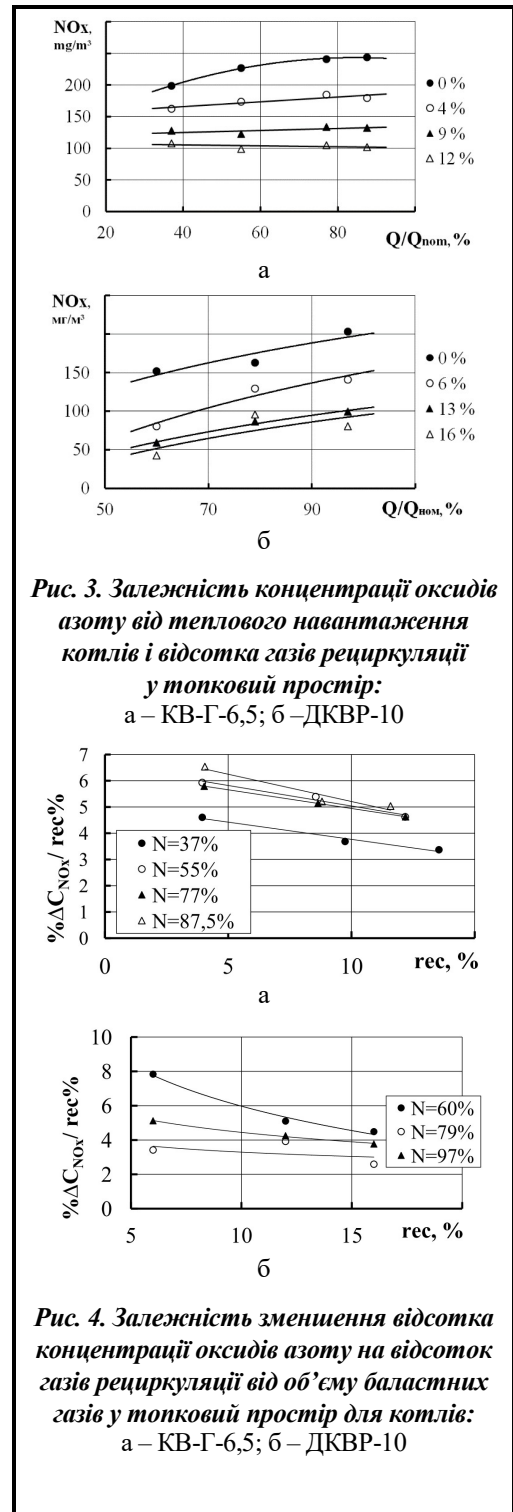
$$r = V_p / V_{\text{п}}, \quad (5)$$

де V_p – об'єм газів рециркуляції, $\text{м}^3/\text{с}$; $V_{\text{п}}$ – об'єм дуттьового повітря, $\text{м}^3/\text{с}$.

Концентрація кисню в повітрі при додаванні газів рециркуляції може бути оцінена за допомогою наступної залежності:

$$C_{\text{O}_2} = \frac{0,209 \cdot [(1 + \alpha_{\text{т}} \cdot L_0) + (\alpha_{\text{т}} - 1) \cdot L_0 \cdot 0,01 \cdot r]}{(1 + \alpha_{\text{т}} \cdot L_0) \cdot (1 + 0,01 \cdot r)} \times 100, \quad (6)$$

де $\alpha_{\text{т}}$ – коефіцієнт надлишку повітря в топці котла; L_0 – стехіометричний коефіцієнт [18]. При застосуванні запропонованого виразу для досліджуваного об'єкта концентрація кисню в розбавленому повітрі може бути оцінена з відносною похибкою не більше 2,0%.



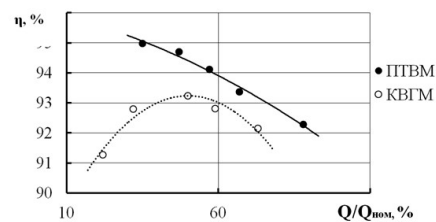
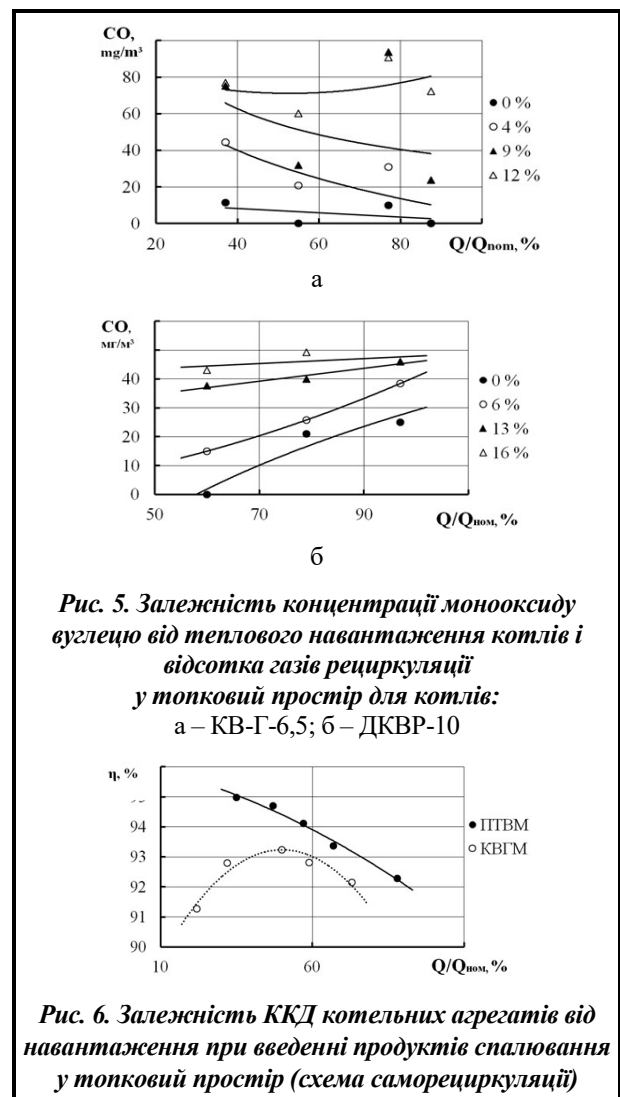
При аналізі результатів екологічних випробувань котлів (рис. 3) звертає на себе увагу зниження впливу навантаження агрегату на C_{NO_x} у відхідних газах при підвищенні відсотка розбавлення повітря на пальниках. Особливо це проявляється для водогрійних котлів типу КВ-Г-6,5 (рис. 3, а).

У той час для котлів типу ДКВР-10 (рис. 3, б) вказана особливість не характерна. Очевидно, проявляються індивідуальні дискретні впливи, такі як питоме теплонпруження топкового простору, конструктивні особливості газового тракту агрегатів та ін. Виходячи з наведених результатів, можна констатувати, що введення 12–14 % продуктів спалювання в топковий простір котла майже у 2,5 рази знижує вміст окислу азоту у продуктах згоряння. На досліджуваних об'єктах досягнуто зниження емісії у межах 2,8–7,8 % на 1 % газів рециркуляції, ефект придушення концентрації NO_x зменшується зі збільшенням відсотка розбавлення повітря газами (рис. 4).

Вважаємо за необхідне додати, що введення продуктів спалювання у об'ємі понад 12% суттєво знижує придушення емісії NO_x (вміст кисню у дуттьовому повітрі $C_{O_2} < 19\%$, (рис. 3, б)). Крім того, збільшення відсотка рециркуляції підвищує емісію монооксиду вуглецю CO (рис. 5). У результаті отримано зниження сумарної концентрації оксидів азоту до 50–100 mg/m^3 (на окремих агрегатах ДКВР-10 досягнуто зниження концентрацій нижче 50 mg/m^3). Слід зазначити, що навіть при максимальній рециркуляції значення концентрацій CO не перевищують гранично допустимих норм ($C_{CO} < 90 mg/m^3$), а якісний монтаж пальників і відповідне теплотехнічне налагодження агрегатів за результатами модернізації при роботі без рециркуляції максимально мінімізує концентрації монооксиду вуглецю у відхідних газах. Фактично, на пальниках СНТ досягнуто вищу на 30% ефективність застосування рециркуляції порівняно з вихровими пальниками.

Очевидно, визначальним фактором у забезпеченні ефективності технологічної денітрифікації є ступінь гомогенізації пальної суміші. Так, на першій стадії процесу відбувається баластування дуттьового повітря відхідними газами, а на другому – змішування пального газу із забаластованим повітрям. Стадійність підготовки до спалювання й висока ефективність сумішоутворення створює необхідні умови для організації ефективного мікродифузійного горіння пальної суміші, а збіднення повітря киснем ефективно регулюється й обмежує зворотній процес утворення хімічного недопалу. Таким чином, обмеження кількості газів рециркуляції може зумовлюватися індивідуальними особливостями обладнання з точки зору зниження ефективності методу (рис. 3) або понаднормовим підвищенням C_{CO} (рис. 5).

У роботі проведено оцінку ККД котельних агрегатів (рис. 6). Ефективність має безпосередню залежність від навантаження, а найбільш економічні режими роботи для обох агрегатів знаходяться на часткових навантаженнях. Для КВГМ-20 характеристика має екстремум приблизно на 50% від номінального навантаження, тоді як для ПТВМ -50 монотонно зменшується по мірі збільшення потужності. Слід зазначити, що обладнання більш ніж половину опалювального періоду працює на часткових навантаженнях, тому максимальна ефективність і економія енергоресурсів буде отримана саме на цих режимах. Хоча, розглядаючи характеристики у цілому, можна констатувати достатньо високу енергетичну ефективність модернізованого вогнетехнічного об'єкта.



За результатами статистичної обробки емісійних характеристик котельного обладнання, модернізованого пальниками СНТ зі схемою саморециркуляції, зменшення відсотка оксидів азоту досить точно можна оцінити залежністю вигляду:

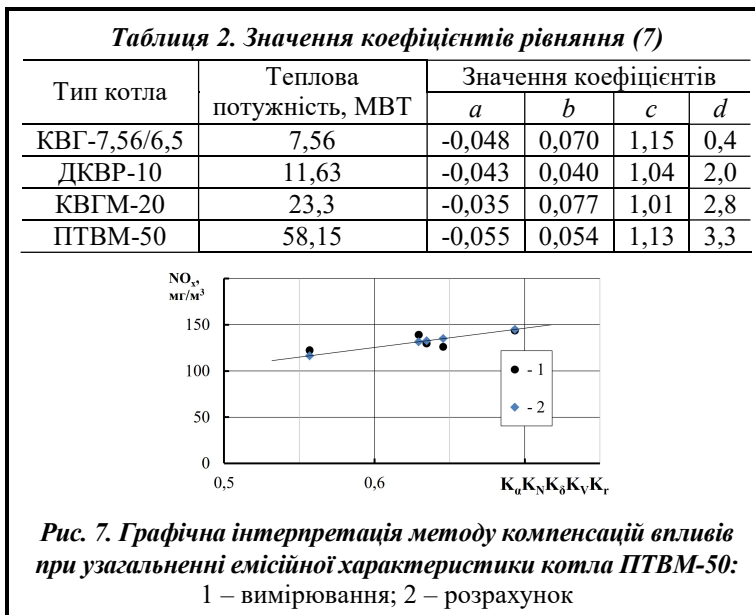
$$\Delta C_{NO_x} = (a \cdot \ln(N\%) + b) \cdot (r_{\text{рец}}, \%)^2 + c \cdot (N\%)^{0,4} (r_{\text{рец}}, \%) + d, \quad (7)$$

де значення коефіцієнтів рівняння визначаються з урахуванням теплотехнічного налагодження котлів (табл. 2).

Слід зазначити, що для котлів середньої та високої продуктивності через наявність різних дискретних впливів зручним методом прогнозування викидів вважається співвідношення вигляду:

$$NO_x = NO_x^{\text{max}} K_N K_\alpha = K_d K_D K_N K_\alpha. \quad (8)$$

Для котлів великої продуктивності неможливо отримати емісійні характеристики у «чистому» вигляді $NO_x=f(\alpha)$ та $NO_x=f(N)$ і вигляду $NO_x=f(D_0)$ у зв'язку з існуванням різних впливів (наявність рециркуляції, стадійне горіння, різне компонування й кількість ввімкнених пальників). Для прогнозування емісійних характеристик потужного котельного обладнання зручно застосувати метод компенсації впливів у вигляді:



$$NO_x = NO_x^{\text{норм}} \prod_{i=1}^n K_i, \quad (9)$$

де K_i – відповідний параметр впливу на емісію оксидів азоту.

Так, для котла ПТВМ-50 впливовими факторами на емісійні показники виступають наступні: $K_\alpha = \alpha^{3,8}$; $K_N = (D/D_0)^{0,79}$; $K_\delta = \exp[-0,257 \Delta \bar{h}_\delta]$, де $\Delta \bar{h}_\delta$ – відносна подача повітря, минаючи пальники (для СНТ не застосовується); $K_{\Delta V} = \exp[-0,2 \Delta \bar{V}]$, де $\Delta \bar{V}$ – питомий розподіл газу по ярусах (для СНТ вважається рівномірним); $K_r = \exp[-0,05r]$, де r – ступінь рециркуляції у %. Результати представлення запропонованих коефіцієнтів з врахуванням нормованої величини $NO_x^{\text{норм}}$ наведені на рис. 7.

Представлені на рис. 7 дані дають можливість констатувати, що обрано зручний метод проведення об'єктивної оцінки ефективності первинних або вторинних заходів зі зменшення емісії токсичних оксидів азоту.

Висновки

На базі розробок КПІ ім. Ігоря Сікорського створена універсальна технологія спалювання палива, яка відрізняється високою ефективністю організації процесу технічного горіння. Станом на сьогоднішній день проведено модернізацію широкого кола газоспоживаючого обладнання, як-от котли, печі, сушарки, об'єкти металургії та ін. Поряд з енергетичною ефективністю на перший план виходять вимоги щодо забезпечення екологічних показників модернізованого вогнетехнічного обладнання. У результаті широкого впровадження досліджуваної технології у промисловість виявлено, що існує можливість забезпечення зниження оксидів азоту первинними технологічними методами, констатовано, що найбільш простим і ефективним із них слід визнати введення газів рециркуляції у топковий простір.

Встановлено, що ефективність введення газів рециркуляції залежить від потужності агрегату і від їх загального об'єму при баластуванні окисника. Відсоток зниження оксидів азоту на один відсоток газів рециркуляції становить $C_{NO_x} = 2-8\%$ залежно від типу котельного агрегату й зазначених вище умов. Причому найбільша ефективність процесу досягається на часткових навантаженнях при баластуванні повітря газами не більше ніж на 5-7% по об'єму. З'ясовано, що для котлів тепловою потужністю до

10 МВт введення баластних газів більше 12–14% суттєво знижує ефективність процесу денітрифікації. Розроблена схема рециркуляції впроваджена на водогрійних котлах потужністю 0,5–56 МВт і парових котлах ДКВР-10 (паропроодуктивність 10 т/год) на базі СНТ. Як показує практика, її використання дозволяє на 1/3 підвищити ефективність порівняно з вихровими технологіями спалювання за рахунок раціонального розподілу пального в об'ємі окисника. Фактична концентрація оксидів азоту не перевищує 100 мг/м³ для всіх наведених моделей котлів, крім ПТВМ -100, де рівні дещо вищі – 145 мг/м³.

Аналіз отриманих результатів промислового впровадження пальників показує, що локальні емісійні характеристики у вигляді залежностей NO_x від експлуатаційних факторів мають суто індивідуальний характер, тобто відображають різний ступінь впливу на рівень емісії оксидів азоту, визначаються відповідним показником $K_f = \varphi(f_i)$ і мають неперервний характер.

Крім впливів на емісію оксидів азоту, які носять неперервний характер, існують також дискретні впливи, такі як: тип котла й конструкція топки, вид палива, спосіб розпилення рідкого палива, компоновка пальників у топці тощо, сукупний параметр впливу яких може бути як більше, так і менше 1,0.

У зв'язку з тим, що очікуване значення надлишку окисника у топках енергетичних котлів близько до $\alpha_{\text{кр}} = 1,15\text{--}1,17$ (чому відповідає концентрація кисню у відхідних газах $\text{O}_2 = 3\%$), доцільно виконувати приведення вимірних концентрацій оксидів азоту у відхідних газах енергетичних котлів до зазначених умов.

При пуску енергетичних котлів після монтажу або ремонту доречно провести процедуру побудови узагальненої екологічної характеристики вигляду залежності (8), на базі якої можлива оцінка нормованої концентрації оксидів азоту $\text{NO}_x^{\text{норм}}$, яка є об'єктивним критерієм рівня екологічної безпеки вогнетехнічного об'єкта.

Література

1. Clean air technology center. Nitrogen oxides (NO_x), why and how they are controlled. EPA-456/F-99-006R. November 1999. World Wide Web Home Page: An official website of the United States government, U.S. Environmental Protection Agency, 1999. <https://www3.epa.gov/tncatc1/dir1/fnoxdoc.pdf>.
2. Наказ про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць. Наказ Міністерства охорони здоров'я України. 2021. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0156-20#Text>.
3. Parra D., Valverde L., Pino F. J., Patel M. K. A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 101. P. 279–294. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.010>.
4. Wang H., Yuan B., Hao R., Zhao Y., Wang X. A critical review on the method of simultaneous removal of multi-air-pollutant in flue gas. *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 378. P. 122–155. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122155>.
5. Tahmasebzadehbaie M., Sayyaadi H. Efficiency enhancement and NO_x emission reduction of a turbo-compressor gas engine by mass and heat recirculations of flue gases. *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 99. P. 661–671. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.095>.
6. Boyarkin M. S., Kovalnogov V. N., Karpukhina T. V., Fedorov R. V. Development and research of the technology of enriching low-grade solid fuels with recirculating flue gases for boiler plants. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2016. Vol. 17. Iss. 2–4. P. 145–163. <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2016019374>.
7. Becher V., Bohn J.-P., Goanta A., Spliethoff H. A combustion concept for oxyfuel processes with low recirculation rate – experimental validation. *Combustion and Flame*. 2011. Vol. 158. Iss. 8. P. 1542–1552. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.12.029>.
8. Кобзарь С. Г., Халатов А. А. Снижение выбросов оксидов азота в газовых котлах методом рециркуляции дымовых газов. *Промышленная теплотехника*. 2009. Т. 31. № 4. С. 5–11.
9. Ahn S. Y., Go S. M., Lee K. Y., Kim T. H., Seo S. I., Kim D. J. The characteristics of NO production mechanism on flue gas recirculation in oxy-firing condition. *Applied Thermal Engineering*. 2011. Vol. 31. Iss. 6–7. P. 1163–1171. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.12.013>.
10. Strobel R., Waldner M. H., Gablinger H. Highly efficient combustion with low excess air in a modern energy-from-waste (EfW) plant. *Waste Management*. 2017. Vol. 79. P. 301–306. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.049>.
11. Gholami F., Tomas M., Gholami Z., Vakili M. Technologies for the nitrogen oxides reduction from flue gas: A review. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 714. Paper ID 136712. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136712>.
12. Абдулин М. З. Применение струйно-нишевой технологии сжигания топлива в энергетических установках. Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. 2005. № 6. С. 130–144.

13. Про Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок: розпорядження Кабінету міністрів України від 08.11.2017 № 796-р. Київ, 2017. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/796-2017-%D1%80>.
14. Любчик Г. Н., Гордяк Р. М., Микулин Г. А., Шелковский Б. И., Зарицкий А. А. Экологический аудит газогорелочных устройств на основе применения метода базовых характеристик эмиссии NOx и CO. *Эко-технологии и ресурсосбережение*. 2007. № 4. С. 64–70.
15. Любчик Г. Н., Варламов Г. Б., Сердюк С. Д., Микулин Г. А., Трубецкой Е. А. Воздействие коэффициента избытка воздуха, производительности и нагрузки котла на показатели эмиссии оксидов азота. *Энергетика: экономика, технологии, экология*. 2001. № 1. С. 48–54.
16. Абдулін М. З., Сірий О. А. Вітчизняні енергоефективні технології – запорука енергетичної безпеки держави. Київ: КПІ, 2013. С. 224–233.
17. Abdulin M. Z., Siryi O. A., Tkachenko O. M., Kunyk A. A. Boilers modernization due to energy-ecological improvement technology of burning. *Bulgarian Chemical Communications*. 2020. Vol. 52. Special iss. F. P. 14–19.
18. Сигал И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. Л.: Недра, 1988. 311 с.
19. Сірий О. А. Вплив параметрів струменево-нішевої системи на робочий процес пальникових пристроїв: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2016. 199 с.

Надійшла до редакції 30.09.2021