

ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЧИСТОТИ ПРОМИСЛОВИХ КОТЛОАГРЕГАТИВ

У статті розглядаються основні напрямки зменшення емісії забруднюючих речовин з продуктами згоряння котельних установок. Проведено аналіз маловитратних заходів, що дозволяють скоротити викиди токсичних речовин в атмосферу без зниження надійності і погіршення техніко-економічних показників котельних установок.

Для захисту атмосфери від пірогенних забруднювачів у наш час використовують головним чином технологічні методи запобігання викидам, які пов'язані з удосконаленням процесу горіння як за рахунок освоєння режимних заходів, так і за рахунок впровадження нових конструкторських рішень.

На основі результатів власного дослідження, а також даних експериментальних та теоретичних досліджень, наведених у роботах [1–3], можна виділити такі основні напрямки зменшення емісії забруднюючих речовин із продуктами згоряння котельних установок, які можна рекомендувати до впровадження на промислових підприємствах м. Миколаєва: метод нестехіометричного спалювання та рециркуляції продуктів згоряння, двоступеневе спалювання палива, спалювання палива з малими надлишками повітря, вприскування води або водяної пари в зону горіння палива.

Одним із найбільш ефективних заходів, що не потребує реконструкції діючих котлів, є використання так званого нестехіометричного спалювання. Під цим терміном в енергетиці розуміють такий спосіб спалювання, коли спеціально здійснюється перерозподіл палива чи повітря між ярусами пальників або між окремими пальниками. У результаті частина пальників (або цілі яруси) працюють із нестачею повітря, у той час як інші пальники (яруси) мають деякий надлишок повітря. Ефективність цього методу з точки зору запобігання NO_x була перевірена на котлі КЕ-35-14ГМ на одному з машинобудівних підприємств [1].

Цей серійний газомазутний котел із природною рециркуляцією має номінальну паровидатність 35 т/год при тиску пари до 1,4 МПа. Топкову камеру котла обладнано двома вихровими пальниками, розташованими один над одним.

На першому етапі випробувань провели досліді з рівномірною подачею палива й повітря на обидва пальники. Виміри складу газів за котлом здійснювалися за допомогою газоаналізатора типу TESTO-33. Дослідження проводилися в діапазоні навантажень від 21 до 32 т/год по парі, при цьому витрата пари на котел змінювалась від 1640 до 2430 м³/год, розрідження в топці підтримувалося практично постійне (3,5–4,0 кгс/м²). У результаті вдалося встановити залежність концентрацій оксидів азоту й оксиду вуглецю від надлишку повітря.

При номінальному навантаженні котла максимальна концентрація NO_x дорівнює 337 мг/м³ (в перерахунку на NO_2 в сухій пробі димових газів при $\alpha = 1,4$). Ця концентрація може бути знижена при збільшенні або зменшенні надлишку повітря порівняно з тим режимом, котрий зазвичай застосовується експлуатаційним персоналом. Зниження надлишку повітря до $\text{O}_2 = 1,5\%$ ($\alpha = 1,08$) не призводить до підвищення вмісту СО й одночасно зменшує концентрацію оксидів азоту до 290 мг/м³, тобто на 14 % порівняно з вихідним рівнем.

Вміст СО в димових газах при $\text{O}_2 > 1,5\%$ залишається достатньо низьким (0,006 % об.) і не залежить від навантаження котла.

Частина дослідів [1] була проведена при нестехіометричному спалюванні, тобто при різних α у верхньому та нижньому пальниках. У процесі дослідження змінювався лише розподіл газу між верхнім та нижнім пальниками. Перехід від режиму з рівномірною подачею газу (50/50 %) до нестехіометричного спалювання (44/56 %) знижує концентрацію оксидів азоту з 328–337 мг/м³ до 200–202 мг/м³ (тобто на 40 %). При цьому вміст СО залишається на попередньому рівні. Розрахунок річних NO_x з урахуванням кількості спаленого природного газу показав,

що описаний вище метод спалювання на котлі KE-35-14ГМ дозволив без витрат на реконструкцію понизити викиди NO_x в атмосферу приблизно на 24 т/рік, або на 40 % порівняно з вихідним рівнем.

Однак досягнуті результати не можна вважати переконливими, оскільки концентрація NO_x , що дорівнює 200 мг/м^3 , далека від кращих результатів, відомих у світовій практиці. У зв'язку з цим на тому самому котлі була впроваджена спрощена схема рециркуляції димових газів. Її особливість полягає у відборі частини димових газів із газоходу за котлом (до економайзера) і подачі на вхід дугтєвого вентилятора без використання димососа рециркуляції, за рахунок перепаду тисків. Для реалізації такої схеми на лінії рециркуляції встановили регулюючий шибер. Як показали дослідження, схема дозволяла при навантаженнях, близьких до номінальних, подавати до кореня факела 13–14 % димових газів, що істотно знижувало максимальну температуру в ядрі горіння і концентрацію кисню у факелі. У результаті, як наслідок, зменшилося утворення оксидів азоту.

Для теоретичної перевірки отриманих в [1] даних, а також вироблення рекомендацій впровадження екологічно чистих технологій спалювання проведено розрахунки процесів утворення й розкладання пірогенних забруднювачів у котлоагрегатах згідно з реакторною моделлю [5].

Як кінетична схема для розрахунку процесів у різних реакторах був використаний механізм високотемпературного окиснення вуглеводнів [5], що включає 258 хімічних реакцій із 58 компонентами. Його особливостями є можливість моделювання процесів хімічного реагування в широкому діапазоні зміни тиску й простота адаптації до розрахунків схем окиснення вищих вуглеводнів. Розрахунок екологічних властивостей котлоагрегатів був зроблений за методикою [5, 6].

На рис. 1 представлено залежність масових концентрацій оксидів азоту Y_{NO_x} від ступеня рециркуляції r в котлі KE-35-14 при $\alpha = 1,15$, отриману згідно з розрахунковою реакторною моделлю (суцільна лінія), що запропонована в [5], та експериментально в роботі [1]. При зростанні ступеня рециркуляції до $r = 0,07$ масова концентрація оксидів азоту зменшилася в 1,7 раза, а при зміні r до 0,14 – у 3,3 раза. Бачимо гарну кореляцію розрахункових та дослідних даних, що вказує на достовірність розробленої математичної моделі та можливість її використання для кількісного прогнозування емісії забруднювачів у котлоагрегатах, обладнаних перспективними системами екологічно чистого згоряння палив.

На прикладі енергетичного виробництва Миколаївського суднобудівного заводу Дамен Шип'ярдс «Океан» розглянемо деякі можливості впровадження перспективних схем зменшення викидів оксидів азоту (за рахунок рециркуляції

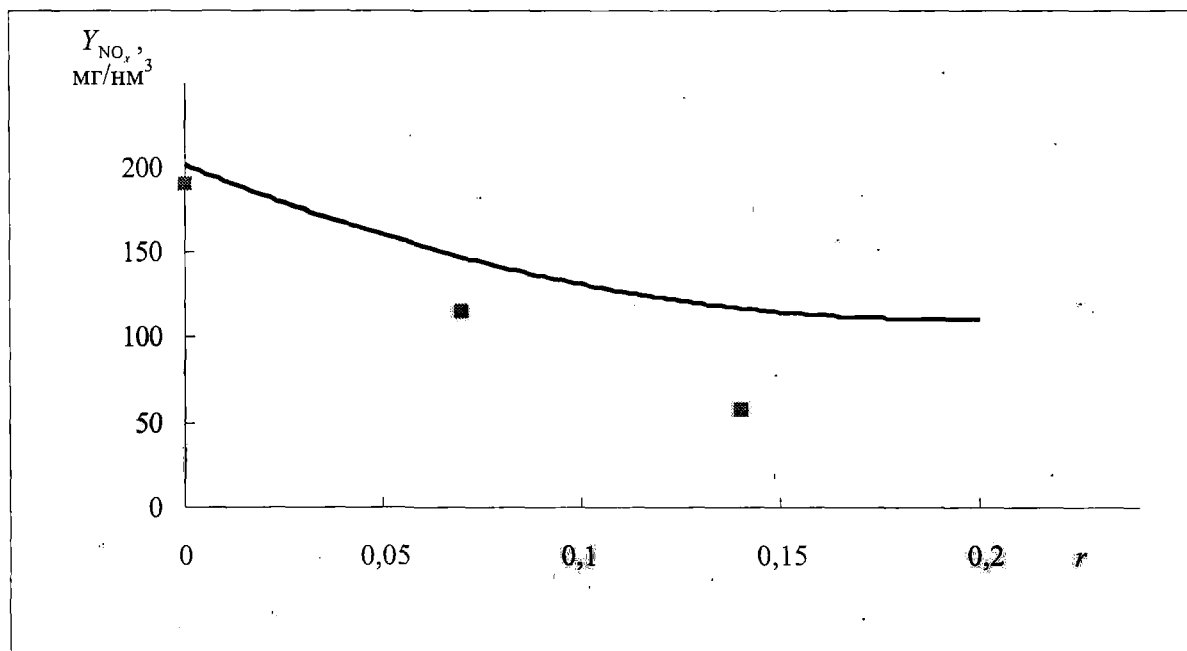


Рис. 1. Залежність масових концентрацій оксидів азоту Y_{NO_x} від ступеня рециркуляції r в котлі KE-35-14 при $\alpha = 1,15$: ■ – експеримент; — – дані розрахунків

продуктів згоряння). Для теплопостачання потреб цього підприємства використовуються 3 котли ПТВМ-50 та 3 котли ДЕ 25-14.

Характеристики основного джерела викидів – димової труби: число годин роботи на рік – 4320; висота джерела викиду – 90,0 м; діаметр гирла труби – 3,4 м; параметри газоповітряної суміші на виході з джерела викиду:

швидкість, м/с – 7,6;

об'єм, м³/с – 69,0;

температура, °С – 180.

Основні викиди забруднюючих речовин, характерних для цього підприємства, що взяті з Проекту нормативів гранично допустимих речовин на суднобудівному заводі «Океан» (нині Дамен Шип'ярдс «Океан»), такі: двооксид азоту – 118,355 т/рік, оксид азоту – 7,5248 т/рік, оксид вуглецю – 176,671 т/рік [4].

За розрахунковими даними, використання рециркуляції відпрацьованих газів котлоагрегату, яке може бути достатньо просто й без великих фінансових зусиль впроваджене при модернізації топкових пристроїв при планових ремонтах (рис. 1), приведе до зменшення викидів двооксидів азоту при ступені рециркуляції $\gamma = 0,14$ на 50 т/рік (сьогочасний викид 118,355 т/рік). Це може значно поліпшити екологічну ситуацію як на самому підприємстві, так і в цілому в м. Миколаєві.

Специфіка двоступеневого спалювання полягає в тому, що в першу зону горіння повітря подається в меншій за теоретично необхідну кількості ($\alpha_r = 0,70-0,95$), а в другу зону – залишкова кількість повітря, необхідна для повного згоряння палива. У результаті має місце зниження максимальної температури в зоні горіння та зниження концентрації молекулярного і атомарного кисню в ядрі факела. Ефективність двоступеневого спалювання палива залежить від прийнятого загального коефіцієнта надлишку повітря і від значень коефіцієнтів надлишку повітря в першому і в другому ступенях горіння палива.

Ефективність засобу залежить також від конструктивних особливостей пальникових та топкових пристроїв, площі й відносного розташування екранних поверхней нагріву. Унаслідок цього механічний перенос досвіду двоступеневого спалювання палива з одного котла на другий може не дати очікуваного результату. Отже, необхідно для кожного типу котла попередньо визначити найбільш раціональний варіант двоступеневого спалювання дослідним шляхом.

Застосування на практиці отримали такі варіанти двоступеневого спалювання палива:

– частина повітря подається в пальники разом із паливом, а інша частина надходить в зону допалювання (зустрічне дуття);

– пальники в нижній частині топки працюють із нестачею повітря, а пальники у верхній (або середній) частині топки працюють із надлишком повітря;

– частина пальників працює з $\alpha < 1,0$, а інша частина пальників відключена і слугує тільки для подачі повітря для допалювання горючих компонентів.

За даними [1], двоступеневе спалювання знижує утворення як «термічних», так і «паливних» оксидів азоту, що дуже важливо при спалюванні палива, яке містить азот. До таких палив належать і мазути, які отримують із нафти вітчизняних родовищ.

При багаторусному компонуванні пальників у топці двоступеневе спалювання нерідко відбувається шляхом перерозподілу потоків дуттєвого потоку на пальники між ярусами. Частина пальників при цьому працює з $\alpha_r < 1,0$, а інша частина з $\alpha_r > 1,0$.

Такий варіант двоступеневого спалювання досліджувався, наприклад, на котлі ТГМ-84 при триярусному компонуванні 18 пальників [1]. Шляхом перерозподілу потоків дуттєвого повітря на яруси вдалося знизити викиди оксидів азоту приблизно на 20 %. Поряд з цим відзначалось певне погіршення техніко-економічних показників котла.

Для котла ТГМ-84, але з чотириярусним компонуванням пальників, розроблено інший (маловитратний) варіант двоступеневого спалювання газу й мазуту з використанням частини пальників верхнього ярусу для подачі вторинного повітря. Через 6 сопел, встановлених у пальникових амбразурах, подавалося до 20 % загальної кількості повітря [8].

У результаті реалізації цього проекту досягнуто зниження викидів оксидів азоту як на газі, так і на мазуті приблизно в 1,5–2 рази. Потрібно відзначити, що топкові камери котлів ТГМ-84 мають великі присоси повітря з атмосфери (більше як 10 %). У зв'язку з цим вказані вище режими двоступеневого спалювання вдається реалізувати лише при спалюванні мазуту при підвищених надлишках повітря на виході з топок ($\alpha = 1,05-1,07$) за умов повноти вигорання палива.

Перерозподіл потоків повітря між пальниками котлів БКЗ-400-120 НГМ, що працюють на нафтовому газі перемінного складу, є обов'язковою умовою двоступеневого спалювання. У роботі [7] відзначено, що при спалюванні при-

родного газу з високим вмістом сірководню забезпечується зниження C_{NO_x} в 2 рази і C_{SO_x} – на 25 %. Збільшення витрати електроенергії, викликане нерівномірною подачею повітря по пальниках, перекривається зменшенням витрати електроенергії на дуття у зв'язку зі зменшенням надлишку повітря, необхідного для підтримки заданого рівня перегріву пари.

Схема двоступеневого спалювання була застосована на котлі ДКВР 10/13 [8]. Це серійний двобарабанный вертикально-водотрубний котел номінальною видатністю D по парі 10 т/год при дозволеному тиску 1,3 МПа. Його топкова камера обладнана двома напірними газомазутними пальниками типу ГМГ-5, встановленими в один ярус на фронтівій стінці котла.

Котел має радіаційну поверхню $47,9 \text{ м}^2$, об'єм його топки дорівнює 42 м^3 . Котел обладнано дуттєвим вентилятором типу ВД-10 (видатність $40\,000 \text{ м}^3/\text{год}$) і димососом типу Д-12 (видатність $40\,000 \text{ м}^3/\text{год}$). Потужність електродвигуна вентилятора дорівнює 13 кВт, димососа – 75 кВт.

Обсяг робіт реконструкції цього котла включав установку шести сопел гострого дуття (по три на лівій і на правій бокових стінках) і прокладку труб від загального повітряного короба до згаданих сопел. Після реконструкції на котлі були проведені досліди при максимальному навантаженні ($D = 10,9 \text{ т/год}$) і при зниженому навантаженні ($D = 8 \text{ т/год}$). Склад димових газів ви-

значався електрохімічним приладом типу TESTO-33. При закритих шиберах на коробці гострого дуття й тиску повітря, що відповідає режимній карті, концентрація оксидів азоту була 182 мг/м^3 при $CO = 0,001 \text{ \% об.}$

У дослідах із відкритими шиберами при подачі частини повітря в кінцеву зону факела концентрація NO_x знизилась до $81\text{--}85 \text{ мг/м}^3$, тобто більше ніж у 2 рази.

На рис. 2 показано залежності масових концентрацій оксидів азоту Y_{NO_x} від ступеня розведення суміші повітря m в котлі ДКВР 10/13, отримані згідно з реакторною математичною моделлю (суцільна лінія) та експериментально в роботі [1]. Видно, що при збільшенні ступеня розведення суміші повітря до $m = 0,29$ масова концентрація NO_x зменшується майже в 4 рази. Наведені залежності також свідчать про добру узгодженість розрахункових і дослідних даних і можливість використання математичної моделі для розрахунку схеми двоступеневого екологічно чистого спалювання органічних палив у котлоагрегатах різних типів.

Узагальнюючи дані, можна зауважити, що дво- і триступеневе спалювання доцільно застосовувати насамперед для котлів, що працюють на безсірковому газі. У котлах, які спалюють сірковий мазут, застосування цих схем обмежено параметрами пари. Для котла надкритичних параметрів ефективність даного методу необхідно

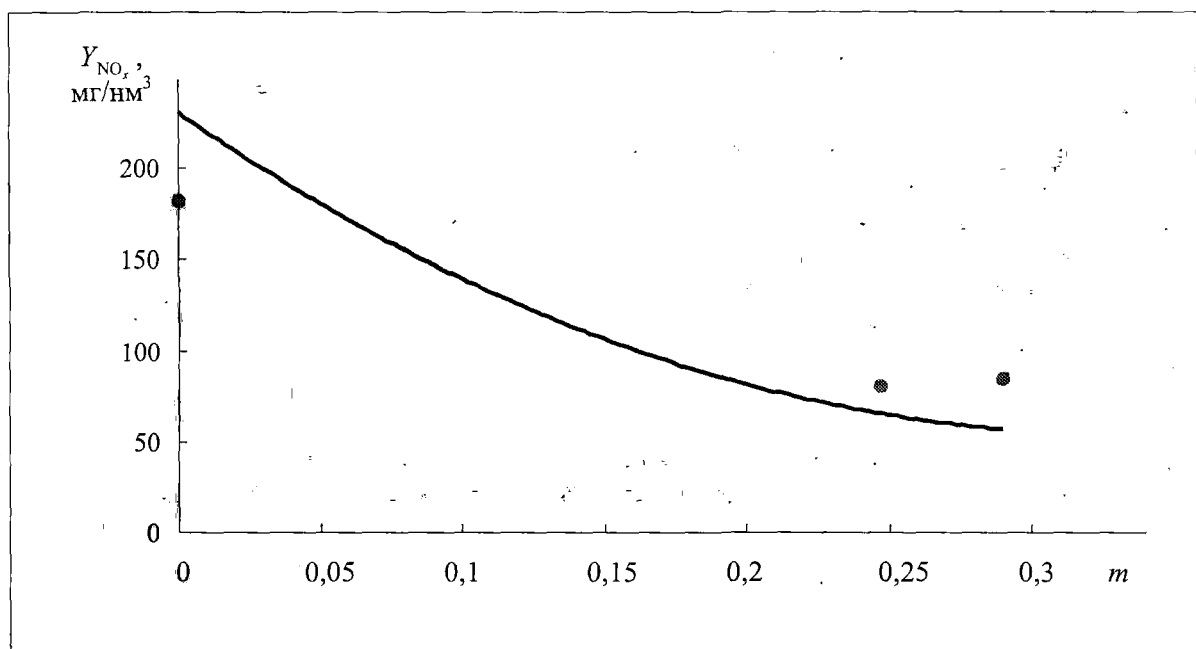


Рис. 2. Залежність масових концентрацій оксидів азоту Y_{NO_x} від ступеня розведення суміші повітря m в котлі ДКВР 10/13 при $\alpha = 1,15$:
 ■ – експеримент; — – дані розрахунків

перевіряти через загрозу виникнення в районі нижньої радіаційної частини сірководневої ерозії екранних труб.

Зниження викидів токсичних речовин при спалюванні палива з малими надлишками повітря є одним із раціональних методів, оскільки поряд із екологічним ефектом дозволяє підвищити економічність котла, а при спалюванні палив, що містять сірку, також зменшити швидкість корозії і забруднення поверхонь нагріву.

Дослідження впливу режимних факторів на вміст шкідливих інгредієнтів у продуктах згоряння газу й мазуту проведені на енергетичних, промислових і опалювальних котлах багатьма дослідницькими підприємствами [1, 6]. Мінімально допустимий рівень надлишків повітря визначається індивідуально для кожного котла залежно від кількості сірки в паливі, яке використовується, а також від ступеня досконалості встановлених на ньому паликових пристроїв, газощільності обмурівки топкової камери, оснащення засобами вимірювання і т. п.

З погляду надійності й економічності при цьому сумарні втрати від хімічної й механічної неповноти згоряння не повинні перевищувати 0,3 %.

Необхідно враховувати також, що зниження надлишку повітря при збереженні незмінних конструктивних режимних факторів може призвести до збільшення викидів іншого токсичного компонента – бенз(α)пірену. Кількість твердих викидів при цьому збільшується внаслідок збільшення органічної складової аерозолів. Частиною цих аерозолів є поліциклічний ароматичний вуглеводень, що має велику канцерогенну активність, – бенз(α)пірен, який утворюється іноді при горінні низькомолекулярних вуглеводневих газів в основному шляхом синтезу з продуктів розпаду простих аліфатичних вуглеводнів, а при горінні важких рідких палив (наприклад мазуту) – насамперед у результаті деструкції високомолекулярних з'єднань (і лише частково шляхом синтезу).

Залежно від температури димових газів бенз(α)пірен може змінювати свій агрегатний стан і при температурах нижчих за точку плавлення (178 °С) осідати у вигляді твердих часток на поверхнях нагріву котлів. У районах розташування агрегатів, які працюють на рідкому паливі, іноді відзначено накопичення бенз(α)пірену на поверхні ґрунтів.

Аналіз результатів проведених досліджень показує, що рідке й газоподібне паливо можна спалювати з дуже низькими надлишками повітря

при наявності викидів бенз(α)пірену в кількостях, котрі, як правило, не призводять до порушення санітарних норм у районі розташування ТЕС.

Для ефективного зменшення концентрації бенз(α)пірену, що утворюється шляхом синтезу з простих вуглеводнів, необхідно процес спалювання палива проводити без появи в локальних зонах топкової нестачі окисника.

Дослідження можливості спалювання палива з гранично низькими надлишками повітря разом із допалюванням бенз(α)пірену поблизу поверхонь вогнетривких насадок було проведено в [9].

У результаті досліджень встановлено, що при коефіцієнтах надлишку первинного повітря $\alpha_1 = 0,98$ і подачі вторинного повітря при $\alpha_2 = 1,05$ можна знизити вміст NO_x в продуктах згоряння до 120 мг/м^3 . Відхідні гази при даних умовах містили $\text{CO} - 0,006 \%$; сажі – 10 мг/м^3 ; бенз(α)пірену – $0,08 \text{ мкг/100 м}^3$, тобто концентрація бенз(α)пірену не перевищувала ГДК, встановлених для атмосферного повітря. При форсуванні топкової камери котла вміст токсичних речовин не перевищував: $\text{CO} - 0,008 \%$; сажі – 12 мг/м^3 ; бенз(α)пірену – $0,2 \text{ мкг/100 м}^3$ [9].

Впорскування води (або водяної пари) в зону горіння палива є засобом зменшення утворення оксидів азоту в топках котлів, які не мають системи рециркуляції димових газів і в котрих організація двоступеневого спалювання палива важка [9]. Впорскування води дозволяє не тільки знизити викид оксидів азоту, а й зменшити викид у атмосферу сажі, бенз(α)пірену та інших канцерогенних продуктів згоряння.

Вплив режимних факторів на динаміку горіння вивчався шляхом фіксації граничних значень коефіцієнта надлишку повітря, при яких починалися передзривні пульсації горіння. У результаті дослідження отримано таку характеристику стійкості горіння метанопароповітряних сумішей: при ступенях розбавлення, що не перевищують $0,35 \text{ кг пари на } 1 \text{ кг повітря}$, стійке горіння можливе при значеннях коефіцієнта надлишку повітря до $1,25-1,35$ [2].

За експериментальними даними [8], впорскування води в зону горіння призводить до помітного зниження концентрації NO_x в продуктах горіння. Якщо питома витрата води, що вприскується в зону горіння, становить $0,25 \text{ кг/м}^3$ спалюваного газу, то концентрація в продуктах згоряння зменшується до 110 мг/м^3 , тобто майже в 2 рази порівняно з процесом горіння без вприскування. Введення у факел стічних вод, що містять суміші токсичних органічних з'єднань (напри-

клад, метанолу, формальдегіду і т. п.), дає можливість зменшити концентрацію NO_x в димових газах без істотного зниження ККД котла. Так, наприклад, при спалюванні в топці 1000 м^3 природного газу за 1 годину введення 1000 г/год стічної води, що містить 10 % метанолу, зменшує ККД котла всього на 0,7 %.

Найбільший ефект впливу на концентрацію оксидів азоту в димових газах спостерігався при введенні вологи в кількості 8–30 % (від витрати палива) через диспергатори, розташовані в повітряних каналах пальників [9]. При подачі води в кількості 6–8 % (від витрати палива) додаткові втрати теплоти становлять близько 0,5 %.

Для підвищення ефективності запобігання утворенню NO_x в [4] запропоновано вводити 2–3 % вологи (від маси палива) до початкової ділянки факела тому, що це призводить до збільшення швидкості горіння і зменшення виходу продуктів недопалу. Окрім того, рекомендовано введення 8–10 % води в зону максимальних температур для зниження утворення оксидів азоту.

На основі матеріалів [8] можна зробити висновки, що двоступеневе введення води або водяної пари у дві зони факела може привести до ефективного й одночасного зменшення концентрацій двох протилежних груп токсичних продуктів згоряння (з одного боку, сажі, бенз(α)пірену й сірководню, а з другого – оксидів азоту).

Цей спосіб особливо ефективний для котлів, що працюють у режимах навантажень, які часто змінюються, і коли при мінімальних навантаженнях не вдається досягти економічного спалювання мазуту й суміші його з газом при малих надлишках повітря. Однак при цьому виникають труднощі позонного введення води у факел, якщо врахувати зміну його довжини при змінних навантаженнях.

Даний спосіб зменшення шкідливих викидів у атмосферу має позитивне значення ще й тому, що дозволяє одночасно вирішити друге важливе завдання – зменшення (або в окремих випадках навіть повне припинення) скидання в водойми забруднених вод за рахунок їх вогневого знешкодження в топках котлів. Необхідно підкреслити, що подача вологи в топку котла в усіх випадках знижує ККД пристрою приблизно на 0,7 % при подачі 8 % вологи від маси палива.

Таким чином, для промислових та опалювальних котлів, що експлуатуються на природному газі, розроблено й можуть бути рекомендовані у виробничих умовах маловитратні заходи (наприклад, нестехіометричне спалювання, спрощена схема рециркуляції й ступеневе введення повітря), що дозволяють у 2–5 разів скоротити викиди токсичних речовин в атмосферу без зниження надійності й погіршення техніко-економічних показників котельних установок.

1. Котлер В., Беликов С. Малые котлы и защита атмосферы от оксидов азота // Мировая электроэнергетика, 1995.– № 4.– С. 21–29.
2. Котлер Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов.– М.: Энергоатомиздат, 1987.– 144 с.
3. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД: Пер. с англ.– М.: Мир, 1986.– 566 с.
4. Проект нормативов предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ завода «Океан».– Николаев, 1992.– 407 с.
5. Романовський Г. Ф., Сербін С. І. Екологічно чисті камери згоряння газотурбінних установок: Навчальний посібник.– Миколаїв: УДМТУ, 2002.– 84 с.
6. Романовський Г. Ф., Сербін С. І. Камери згоряння суднових газотурбінних двигунів: Навчальний посібник.– Миколаїв: УДМТУ, 2000.– 259 с.
7. Романовский Г. Ф., Сербин С. И. Плазмохимические системы судовой энергетики.– Николаев: УГМТУ, 1998.– 246 с.
8. Сербин С. И. Исследование математической модели камеры сгорания судового газотурбинного двигателя // Проблемы автоматизации исследований и проектных решений в судовой энергетике: Межвуз. сб.– Горький: ГПИ, 1990.– С. 58–63.
9. Спейшер В. А., Горбаненко А. Д. Повышение эффективности использования газа и мазута в энергетических установках.– М.: Энергоатомиздат, 1991.– 1984 с.

I. Maliuchenko

MAIN TENDENCIES OF BOILER PLANTS ECOLOGICAL PURITY INCREASING

The article deals with the main reducing emissions directions of the main contaminating substances with products of combustion of boiler plants. The analysis of less expensive measures is made, which allow to reduce the emission of toxic substances into the atmosphere not reducing their reliability and without worsening the technical and economical indices of boiler plants.