

Охрана окружающей среды

УДК 621.18:632.15

Сігал І.Я., докт. техн. наук, проф., **Сміхула А.В.**, канд. техн. наук,
Марасін О.В., канд. техн. наук, **Лавренцов Є.М.**,
Домбровська Е.П., канд. техн. наук
Інститут газу НАН України, Київ
вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: isigal@ukr.net

Модернізація газових котлів ТЕС, ТЕЦ та котельнь відповідно до вимог екологічних директив ЄС

Показано, що встановлена потужність котлоагрегатів в Україні значно перевищує потреби споживачів та як один з найменш капіталоємних шляхів підвищення їх техніко-економічних та екологічних показників з подовженням ресурсу можна розглядати перемаркування котлоагрегатів на меншу потужність. Встановлено, що для котлів паливоспалюючих установок (ПСУ), вхідна теплова потужність яких 50 МВт та більше, що працюють на природному газі, для досягнення норм ЄС необхідно знизити викиди NO_x на 50–80 %. Збільшення об'єму газів рециркуляції в дуттьове повітря більше 25 % від димових газів значно зменшує концентрацію кисню у суміші повітря та димових газів, що може призвести до погіршення горіння, виносу факелу в конвективну частину, призвести до значного збільшення витрати електроенергії та збільшення температури вихідних газів. Використання газів CO_2 чи N_2 для баластування природного газу з метою зниження викидів NO_x є економічно недоцільним. Застосування технології баластування, що ґрунтується на підмішуванні димових газів до природного газу, потребує спеціальних пальникових пристроїв, та діапазон регулювання потужності пальника може бути обмежений. Доцільне поєднання декількох заходів зниження NO_x одночасно. Розроблено план дій для виконання екологічних директив ЄС існуючими котлоагрегатами, що працюють на природному газі, з підвищенням їх техніко-економічних показників. Одним з можливих шляхів виконання екологічних директив ЄС котлоагрегатами в Україні є перенесення навантаження від існуючих ПСУ вхідною тепловою потужністю 50 МВт та більше до менш потужних. Крім того, можливо перемаркування частини котлів на нову номінальну потужність з метою отримання ПСУ, вхідна теплова потужність якої буде менше 50 МВт, що виведе їх з-під дії директиви ЄС 2010/75/EU. *Бібл. 18, рис. 6, табл. 1.*

Ключові слова: оксиди азоту, горіння, ресурс, котли, рециркуляція.

Збільшення вартості природного газу дає змогу впроваджувати більш капіталоемні та енергоефективні заходи щодо його використання існуючими котельними установками різної потужності. У той же час Україна при вступі до Європейського Енергетичного Співтовариства та підписанні Асоціації з Європейським Союзом зобов'язалася виконувати директиви ЄС, зокрема щодо викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря [1, 2]. Тобто впроваджені нові технології, у тому числі при реконструкції та модернізації паливоспалюючих установок (ПСУ), мають забезпечити виконання сучасних екологічних нормативів та бути економічно виправданими.

У ЄС та в Україні використання природного газу протягом наступних 15–20 років планується у межах 22–31 % первинного постачання енергії [3, 4]. Основний напрям використання природного газу в Україні – це його спалювання у котлах різної потужності з метою отримання пари чи теплової енергії та у деяких технологічних процесах (металургія, хімія та ін.).

При спалюванні природного газу в порівнянні з іншими викопними паливами (вугілля, торф, нафта) на одиницю вивільненої теплової енергії викидається значно менше шкідливих речовин в атмосферне повітря, а основних забруднювачів усього три: NO_x , CO та VOCs (volatile organic compounds). При цьому вклад

оксидів азоту серед основних забруднювачів (відношення концентрації забруднюючої речовини у димових газах до її максимально допустимої концентрації в атмосферному повітрі) становить 95–98 % [5–7].

У таблиці наведені норми щодо викидів оксидів азоту в залежності від вхідної теплової потужності паливоспалюючої установки N при спалюванні природного газу на ТЕС, ТЕЦ та у котельнях ($\text{O}_2 = 3 \%$, $P = 101,325$ кПа, сухі гази) для різних ПСУ: великих – Large Combustion Plant, ПСУ ≥ 50 МВт, директива 2010/75/EU [2]; середніх – Medium Combustion Plant, $1 \leq \text{ПСУ} < 50$ МВт, директива (EU) 2015/2193 [8]. Потужність ПСУ – це сума вхідних потужностей всіх котлоагрегатів, підключених до однієї димової труби [2, 9].

Викиди	Існуючі ПСУ, МВт			Нові ПСУ, МВт
	$1 \leq N \leq 5$	$5 < N < 50$	$50 \leq N$	$1 \leq N$
NO_x , мг/нм ³	250	200	100	100

На рис.1 показано орієнтовну річну структуру споживання природного газу в Україні котлоагрегатами, які умовно, в залежності від потужності, розподілені на групи I–V (крім побутових котлоагрегатів індивідуального опалення), за 2015–2017 рр., та коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП).

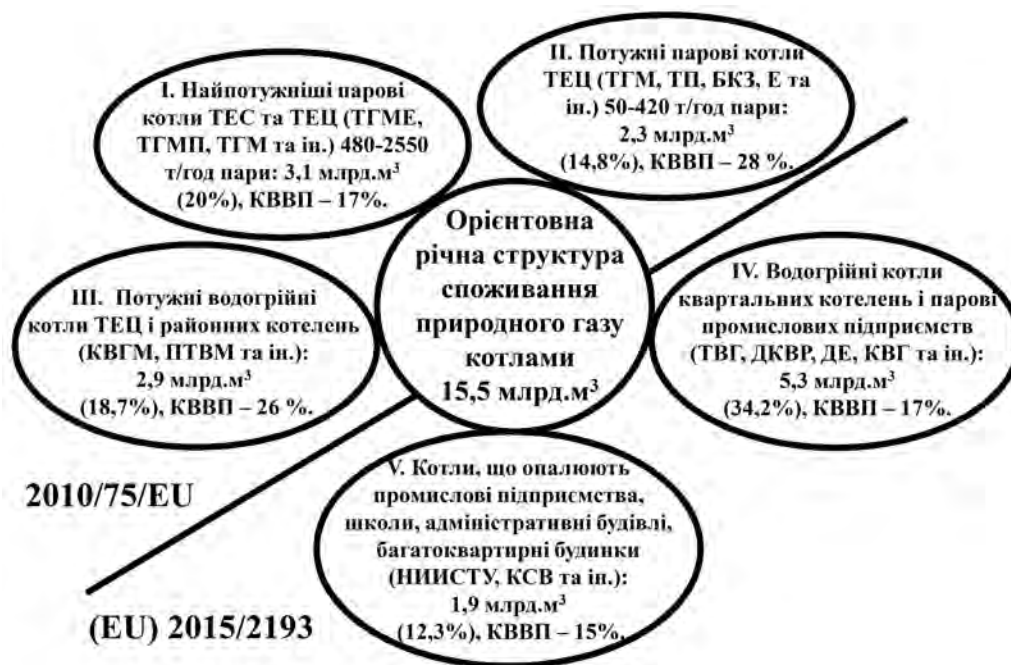
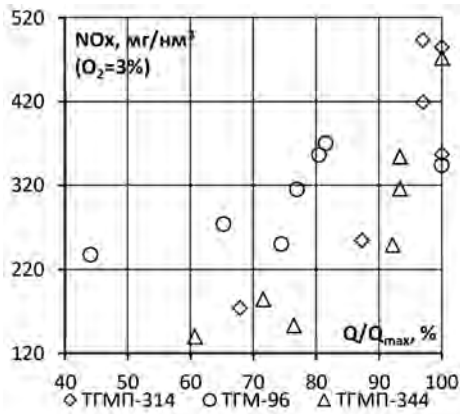
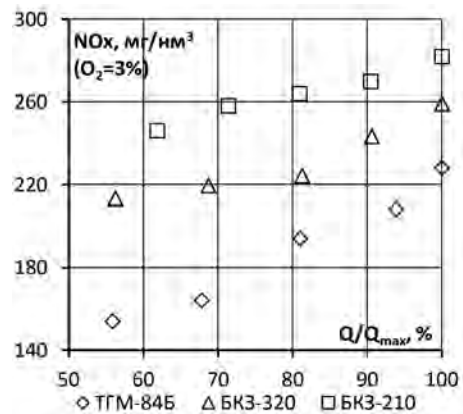


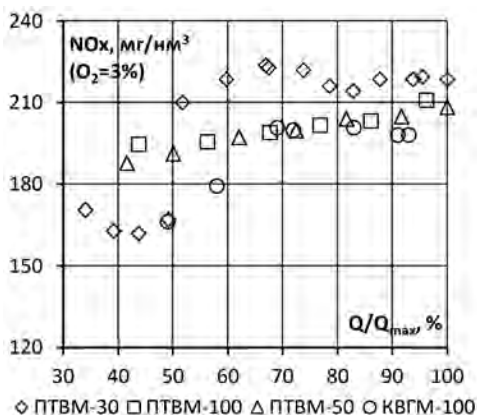
Рис.1. Орієнтовне річне споживання природного газу в Україні котлоагрегатами різної потужності та їх коефіцієнт використання встановленої потужності.



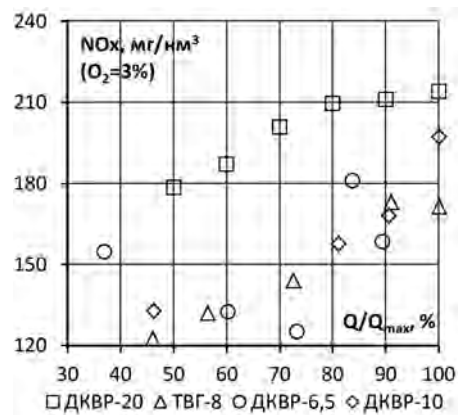
Група I



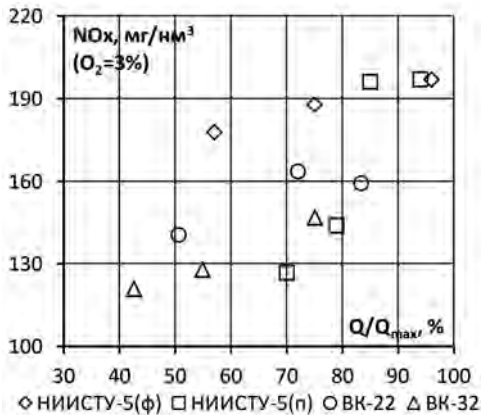
Група II



Група III



Група IV



Група V

Рис.2. Показники по викидах NO_x котлоагрегатами ТЕС, ТЕЦ, районних та квартальних котельних, промислових та опалювальних котлів підприємств (котли ТГМП у роботі з димосамами рециркуляції газів (ДРГ) для різних груп: для I, III, IV – дані з [10]; для II – дані з [11]; для V – наші дані (п – подові пальники; ф – форкамерні пальники; ВК-22 (КСВ-1,0), ВК-32 (КСВ-1,25)).

Котельні з котлами, які підпадають під директиву ЄС 2010/75/EU [2], споживають

близько 8,3 млрд м^3 природного газу, або 53,5 % (групи I–III), під директиву (EU) 2015/2193 [8] – 7,2 млрд м^3 , або 46,5 % (групи IV–V), середній коефіцієнт використання встановленої потужності котлів КВВП, що працюють на природному газі, низький (див. рис.1). Треба враховувати, що значна кількість котлів опалювальні, тобто працюють близько 4300 год/рік. Щодо груп I, II, то кількість річних робочих годин може бути більше, оскільки це котлоагрегати ТЕС та ТЕЦ, які працюють також у літній період для виробництва електроенергії чи пари для технологічних потреб підприємств (ТЕЦ-5, ТЕЦ-6 та Дарницька ТЕЦ м. Києва, Білоцерківська ТЕЦ та ін.).

Реальне навантаження котлоагрегатів усіх груп у більшості випадків вище та знаходиться, за нашими даними, у межах 20–80 % (20 % – мінімальний нижній робочий діапазон навантаження більшості котлів); інші котли, як правило, знаходяться у резерві.

На рис.2 наведено експериментальні дані рівня викидів NO_x для типових представників парових та водогрійних котлів груп I–V.

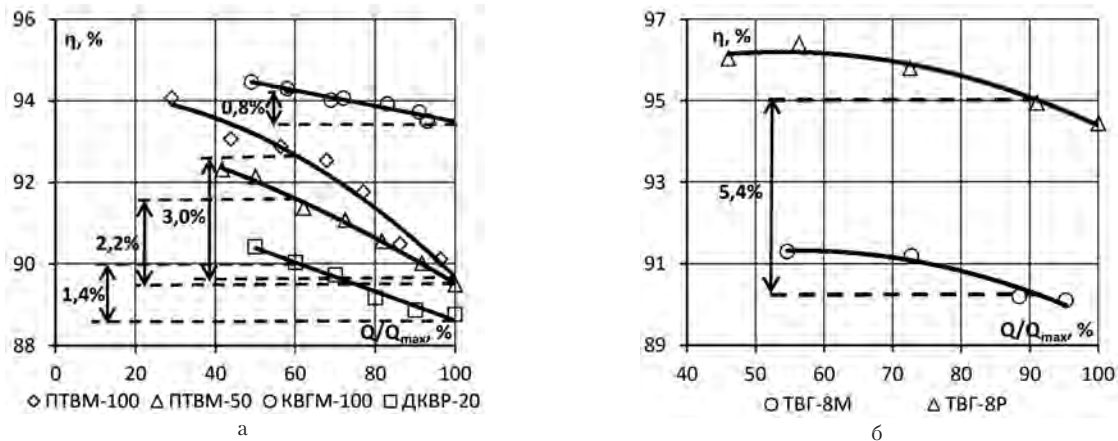


Рис.3. Залежність ККД котлоагрегатів від навантаження: а – різниця між ККД котлів на номінальному навантаженні та потужності 60 %; б – ККД заводського котла ТВГ-8М та модернізованого ТВГ-8Р у залежності від навантаження.

На рис.3 наведено ККД типових котлоагрегатів у залежності від їх режиму роботи та показано величину його збільшення у разі роботи котлів на потужності 60 % у порівнянні з номінальним навантаженням. Збільшення ККД (у середньому на 1,8 %) котлів при зниженні їх навантаження до 60 % пояснюється зменшенням температури вихідних газів, тобто зменшується втрата тепла з димовими газами (q_2), при цьому зростає відносний відсоток втрат теплоти в оточуюче середовище через зовнішню поверхню (q_5). Відповідно, зниження номінальної потужності котлоагрегатів можна розглядати як один з найменш капіталоемних шляхів підвищення ефективності використання природного газу котлами.

Вважаємо, що перемаркування котлів із зменшенням їх номінальної теплової потужності з урахуванням сьогоденного стану їх використання (див. рис.1) ефективно для котлоагрегатів, що відпрацювали заводський ресурс, та регламентується ГКД 34.25.509-2003 [12]. Економічна доцільність такого перемаркування обґрунтовується не тільки підвищенням ККД котлів, а й подовженням їх ресурсу за рахунок зменшення теплонатруги топкового об'єму та різниці температур по газовому тракту котлоагрегату. Крім того, для досягнення сучасних вимог щодо рівня викидів оксидів азоту у відповідності до директив ЄС [2, 8] з'являється можливість застосування для перемаркованих на меншу потужність котлів методів зниження NO_x , що ґрунтуються на використанні штатного тягодуттьового обладнання (перепуск димових газів з димососу на всас дуттьового вентилятора – «саморециркуляція») [13, 14].

У значній частині випадків приєднане навантаження споживачів не дає змоги зменшити

проектну потужність котельної, відповідно й котлів, тому необхідна їх модернізація чи реконструкція зі збереженням номінальної теплової продуктивності.

Інститутом газу НАН України для багатьох типів котлів розроблені комплексні проекти їх реконструкції [15–17]. На рис.3,б показано ККД котла ТВГ-8М у залежності від навантаження до та після модернізації (ТВГ-8Р). Комплексна модернізація котла ТВГ-8М полягає у збільшенні поверхні конвективної частини на 60 % завдяки виготовленню конвективної поверхні нової конструкції з труби діаметром 32×3 мм замість 28×3 мм при незначному збільшенні габаритів конвективної шахти та заміні штатних пальників на удосконалені подові МПИГ-3 з каліброваними соплами та більш досконалим розподілом повітря [16]. Фактично температура вихідних газів знижена до економічно обґрунтованої температури 70–120 °С (ККД 94–95 %). При ще більшому охолодженні димових газів можливе випадіння конденсату та пошкодження ним останніх по ходу газів труб конвективної частини та димової труби. Тобто для глибокої утилізації димових газів з частковою конденсацією водяних парів необхідно значно більші капітальні та експлуатаційні витрати, які передбачають захист поверхонь від дії конденсату, його збір та утилізацію.

Основні позитивні та негативні аспекти зменшення номінальної потужності котлоагрегатів, крім підвищення ККД, при їх перемаркуванні такі:

а) спалювання природного газу буде відбуватися в топці більшого об'єму (зменшення теплонатруги топкового об'єму), що збільшує ресурс топкових екранів, пальників та перших по ходу димових газів пакетів конвективної частини;

б) абсолютна втрата теплоти у навколишнє середовище через зовнішню поверхню котла (q_5) практично не зміниться, але її питомий вклад у загальних втратах зросте;

в) тягодуттєве обладнання надлишкової продуктивності доцільно обладнати частотним регулюванням або замінити менш продуктивним;

г) зменшення максимального об'єму димових газів на 30–40 % дасть змогу здійснити повноцінну рециркуляцію димових газів на новій номінальній потужності для зниження NO_x із застосуванням існуючого тягодуттєвого обладнання або установкою ДРГ (це було в деяких випадках складно реалізувати при роботі котлів на заводській номінальній потужності через збільшення швидкості газів у газоходах котла, що могло вивести їх з ладу, або через інші проблеми). При застосуванні рециркуляції додатково збільшується ресурс топкової камери, пальників та перших по ходу газів конвективних пакетів за рахунок зменшення температурного рівня між димовими газами та поверхнями;

д) зменшення номінальної встановленої теплової потужності котельної, що в деяких випадках може бути неприйнятним через більше приєднане навантаження споживачів.

У разі якщо котли відпрацювали свій заводський ресурс, але мають залишковий фізичний, а вартість їх реконструкції чи модернізації більше орієнтовно 50 % вартості закупки нового котла (з урахуванням проектних, монтажних та пуско-налагоджувальних робіт), то необхідність заміни старих котлів на нові обґрунтовується такими факторами:

а) при установці нового котла всі елементи його номенклатури серійно випускаються про-

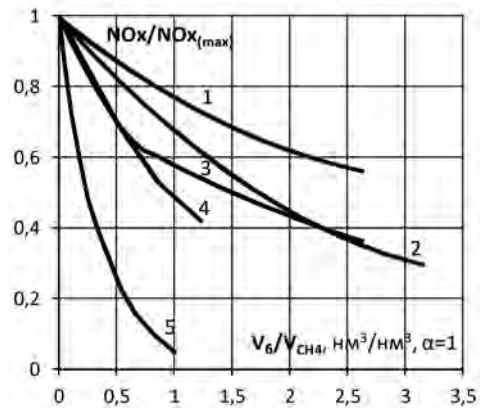


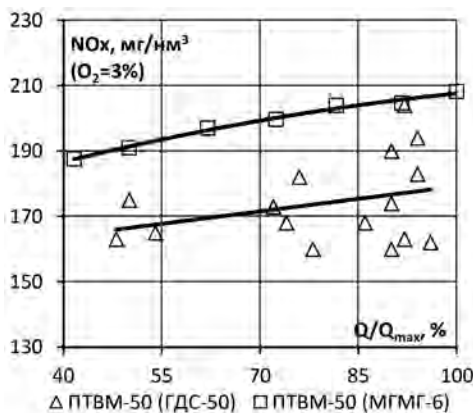
Рис.4. Залежність виходу оксидів азоту при додаванні баласту різного складу та способів його подачі в зону горіння: 1 – підмішування димових газів до дуттєвого повітря; 2 – підмішування CO_2 до дуттєвого повітря; 3 – підмішування димових газів до природного газу в пальнику [10]; 4 – подача суміші N_2 та природного газу; 5 – подача суміші CO_2 та природного газу; V_6 – об'єм баласту, nm^3 ; V_{CH_4} – об'єм природного газу, nm^3 .

мисловістю (арматура, поверхні нагріву тощо) та можуть бути замовлені та замінені у найкоротші терміни з нижчими фінансовими витратами у порівнянні з замовленням несерійного обладнання;

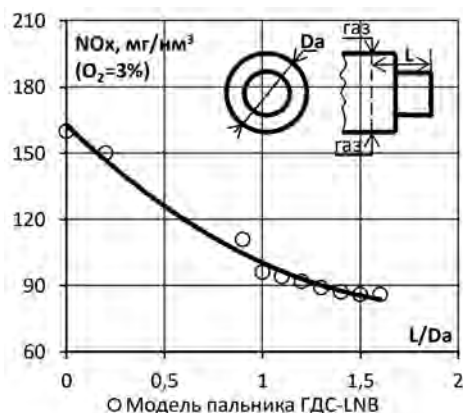
б) використовуються сучасні контрольно-вимірвальні прилади та серійна система автоматичного управління котлом, що побудована на новій елементній базі;

в) топка котла, як правило, розрахована під номенклатуру пальників, що випускаються на даний час не тільки вітчизняними, а й закордонними виробниками, у тому числі розрахована на пальники Low NO_x burner;

г) кількість постійного технічного персоналу менше чи він може бути взагалі відсутній, що зменшує експлуатаційні затрати;



а



б

Рис.5. Викиди оксидів азоту при застосуванні пальників одно- та двостадійного спалювання: а – у котлі ПТВМ-50 з пальниками МГМГ-6 та ГДС-50; б – на моделі пальника ГДС-LNB на лабораторному стенді (L – відстань від місця подачі природного газу в первинне повітря; D_a – діаметр амбразури пальника).

д) викиди шкідливих речовин відповідають директивам ЄС.

У зв'язку з тим, що для існуючих ПСУ при вхідній тепловій потужності $1 \leq \text{ПСУ} < 50$ МВт допускаються значно нижчі рівні викидів забруднюючих атмосферу речовин, ніж для нових, введених в дію після 20 грудня 2018 р. [8], економічна доцільність заміни котлоагрегатів цього діапазону потужностей, що відпрацювали свій заводський ресурс, у порівнянні з їх реконструкцією чи модернізацією може бути сумнівною. Також з аналізу рис.1 видно, що одним із раціональних шляхів виконання директив ЄС котлоагрегатами в Україні є часткове перенесення навантаження від існуючих ПСУ вхідною тепловою потужністю 50 МВт та більше до менш потужних. Крім того, при перемаркуванні частини котлів на нову номінальну потужність таким чином, щоб вхідна теплова потужність ПСУ була менше 50 МВт [12], можна вивести частину котельень з-під дії директиви ЄС 2010/75/EU [2].

Однією з перевірених та надійних технологій зниження викидів оксидів азоту котлоагрегатами є баластування зони горіння [5, 10]. На рис.4 [10] показано узагальнення методів зниження NO_x баластуванням зони горіння CO_2 , N_2 та димовими газами (ДГ) та способів їх подачі в зону горіння при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1$.

З рис.2 видно, що для груп I–III необхідно у середньому знизити викиди оксидів азоту на 50–80 %, з рис.4 – що лише баластуванням зони горіння за рахунок рециркуляції продуктів згоряння із застосуванням 25 % об'єму димових газів (закінчення кривої 1) можливо знизити викиди оксидів азоту на близько 45 %. Подальше збільшення об'єму газів рециркуляції зменшує концентрацію кисню у суміші повітря та димових газів нижче 17,5 % ($\alpha = 1,2$) [5, 14], що може призвести до погіршення горіння, виносу факелу в конвективну частину, призвести до значного збільшення витрати електроенергії та збільшення температури вихідних газів. Можливе застосування більш складних техно-



Рис.6. Схема-план дій щодо виконання екологічних директив ЄС котлоагрегатами паливоспалюючих установок одночасно з підвищенням їх техніко-економічних показників та ресурсу.

логій баластування для зниження викидів NO_x (криві 2, 4, 5), але використання газів CO_2 чи N_2 є економічно недоцільним через їх високу вартість. Перевіреним заходом на котлах є використання технології баластування, що ґрунтується на підмішуванні димових газів до природного газу (крива 3), але це потребує спеціальних палинкових пристроїв [7, 10, 18], а діапазон регулювання потужності пальника може бути обмежений.

Ще одна перевірена технологія зниження викидів NO_x — це застосування пальників стадійного спалювання [5]. На лабораторному стенді, який є неекранованою камерою згоряння, проведено дослідження рівня викидів NO_x у залежності від місця введення вторинного повітря. Результати представлені на рис.5,б. Для порівняння на рис.5,а приведено показники по викидах NO_x при застосуванні штатних пальників МГМГ-6 котла ПТВМ-50 та пальників двостадійного спалювання першого покоління ГДС-50.

Як бачимо з рис.5,б, при застосуванні удосконалених пальників стадійного спалювання (ГДС-LNB) з подачею вторинного незакрученого повітря на відстані $L = (1-1,5) D_a$ від місця подачі природного газу в первинне закручене повітря утворення оксидів азоту зменшується на більше 50 %. Однак, матеріал виготовлення каналу вторинного повітря від площини роздачі природного газу в напрямку факелу має бути виконаний з жаростійких марок сталі або керамічним. Крім того, слід враховувати, що рівень концентрації викидів оксидів азоту суттєво залежить від теплонапруги топкового об'єму котлоагрегату, топкової геометрії та потужності котлоагрегату. Через це застосування одних і тих самих пальників стадійного спалювання Low- NO_x burner у різних котлоагрегатах може призвести до показників рівнів утворення оксидів азоту, що суттєво відрізняються.

Зважаючи на необхідність зниження викидів оксидів азоту при спалюванні природного газу на 50–80 % для груп I–III (див. рис.2), доцільне поєднання декількох заходів зниження NO_x одночасно, наприклад, рециркуляції та пальників стадійного спалювання, топкового поярусного ступеневого спалювання та ін. [5]. Однак для кожної конструкції котлоагрегату набір таких заходів, як і сумарна ефективність заходів щодо зниження NO_x , індивідуальна та потребує проведення дослідних робіт та випробувань на діючих котлах.

Враховуючи вищевикладене, нами розроблений та пропонується план дій щодо існу-

ючих в Україні котлоагрегатів, які працюють на природному газі, по виконанню ними директив ЄС 2010/75/EU та (EU)2015/2193 [2, 8] одночасно з підвищенням їх техніко-економічних показників. Схематично план дій зображено на рис.6.

Висновки

Показано, що встановлена потужність котлоагрегатів в Україні значно перевищує потреби споживачів. Як один з найменш капіталомістких шляхів підвищення їх техніко-економічних та екологічних показників та подовження ресурсу можна розглядати перемаркування котлоагрегатів зі зменшенням їх номінальної теплової потужності та одночасним застосуванням заходів зниження викидів NO_x , насамперед застосування рециркуляції димових газів з використанням існуючого тягодуттєвого обладнання.

Встановлено, що для котлів паливоспалюючих установок, вхідна теплова потужність яких 50 МВт та більше, що працюють на природному газі, для досягнення норм ЄС необхідно знизити викиди NO_x на 50–80 %. За рахунок рециркуляції продуктів згоряння в дуттєве повітря із застосуванням близько 25 % об'єму димових газів можливо знизити викиди оксидів азоту лише на 45 %. Подальше збільшення об'єму газів рециркуляції суттєво зменшує концентрацію кисню у суміші повітря та димових газів, що може призвести до погіршення горіння, вносу факелу в конвективну частину, призвести до значного збільшення витрати електроенергії та збільшення температури вихідних газів. Використання газів CO_2 чи N_2 для баластування природного газу з метою зниження викидів NO_x є економічно недоцільним.

Перевіреним заходом на котлах є використання технології баластування, що ґрунтується на підмішуванні димових газів до природного газу, але це потребує спеціальних палинкових пристроїв, а діапазон регулювання потужності пальника може бути обмежений. Доцільне поєднання декількох заходів зниження NO_x одночасно, наприклад, рециркуляції та пальників стадійного спалювання, топкового поярусного ступеневого спалювання та ін. Однак для кожної конструкції котлоагрегату набір таких заходів, як і сумарна їх ефективність щодо зниження NO_x , індивідуальна та потребує проведення дослідних випробувань.

Розроблено план дій для виконання екологічних директив ЄС існуючими котлоагрега-

тами, що працюють на природному газі, щодо зниження викидів NO_x та підвищення їх техніко-економічних показників та ресурсу. Показано, що одним з можливих шляхів виконання екологічних директив ЄС котлоагрегатами в Україні є перенесення навантаження від існуючих ПСУ вхідною тепловою потужністю 50 МВт та більше до менш потужних. Крім того, можливо перемаркування частини котлів на нову номінальну потужність з метою отримання ПСУ, вхідна тепла потужність якої буде менше 50 МВт, що виведе їх з-під дії директиви ЄС 2010/75/EU.

Список літератури

1. Directive 2001/80/EC of the European parliament and of the council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants. — 21 p. — <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32001L0080>
2. Directive 2010/75/EU of the European parliament and of the council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). — 119 p. — <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0075>
3. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 605-р. — 66 с. — <http://195.78.68.67/minugol/doccatalog/document?id=245234103>
4. Energy Roadmap 2050 / Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions, Brussels, 15.12.2011. — 20 p. — <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52011DC0885>
5. Сигал І.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. — Л.: Недра, 1988. — 313 с.
6. ДСП 201-97. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами): Наказ МОЗ № 201 від 09.07.97. — <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=803>
7. Сигал І.Я., Дубоший А.Н., Сигал А.І., Смихула А.В. Повышение эффективности влияния рециркуляции дымовых газов на снижение выброса оксидов азота котлами электростанций // *Енерготехнології і ресурсосбереження*. — 2010. — № 1. — С. 48–52.
8. Directive (EU) 2015/2193 of the European parliament and of the council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants. — 19 p. — <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332>
9. Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок: Кінцевий проект. — Київ, 15 бер. 2015 р. — 78 с. — <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32015L2193>
10. Сигал І.Я., Смихула А.В., Дубоший А.Н., Горбунов А.В., Гобунов А.А. Снижение образования оксидов азота при сжигании природного газа // *Енерготехнології і ресурсосбереження*. — 2016. — № 4. — С. 44–51.
11. Таймаров М.А., Чикляев Д.Е., Ахметова Р.В., Чикляев Е.Г. Влияние конструктивных особенностей топок котлов на образование окислов азота // *Технические науки в мире от теории к практике: Сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-практ. конф., Ростов-на-Дону, 2014.* — С. 15–20.
12. ГКД 34.25.509-2003. Перемаркування основного енергетичного устаткування енергопідприємств Міністерства палива та енергетики України. Положення. — Київ: Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики», 2003. — 29 с.
13. Сигал І.Я., Нижник С.С. Зменшення утворення оксидів азоту рециркуляцією продуктів згоряння // *Цукор України*. — 1994. — № 3. — С. 14–16.
14. Сигал І.Я., Смихула А.В., Марасин А.В., Лавренцов Е.М. Продление ресурса промышленных и отопительных котлов от 12 МВт котельных и ТЭЦ // *Енерготехнології і ресурсосбереження*. — 2015. — № 3. — С. 46–53.
15. Сигал І.Я., Смихула А.В., Лавренцов Е.М., Марасин А.В. Широкомасштабная реконструкция существующих котлов с целью уменьшения расхода природного газа // *Енергоэффективность-2013: Сб. науч. тр.* — Киев: Ин-т газа НАНУ, 2013. — С. 17–20.
16. Лавренцов Е.М., Сигал І.Я., Смихула А.В. и др. Модернизация водогрейных котлов ТВГ // *Енерготехнології і ресурсосбереження*. — 2010. — № 6. — С. 70–76.
17. Лавренцов Е.М., Сигал І.Я., Смихула А.В. и др. Реконструкция и модернизация водогрейных и паровых котлов отопительных систем теплоснабжения // *Енерготехнології і ресурсосбереження*. — 2012. — № 3. — С. 63–71.
18. Сигал І.Я., Косинов О.И., Дубоший А.Н., Нижник С.С. Повышение эффективности методов снижения образования оксидов азота в топках котлов // *Теплоэнергетика*. — 1986. — № 7. — С. 6–9.

Надійшла до редакції 07.11.17

Сигал И.Я., докт. техн. наук, проф., **Смихула А.В.,** канд. техн. наук,
Марасин А.В., канд. техн. наук, **Лавренцов Е.М.,**
Домбровская Э.П., канд. техн. наук

Институт газа НАН Украины, Киев

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: isigal@ukr.net

Модернизация газовых котлов ТЭС, ТЭЦ и котельных в соответствии с требованиями экологических директив ЕС

Показано, что установленная мощность котлоагрегатов в Украине значительно превышает потребности потребителей и как один из наименее капиталоемких путей повышения их технико-экономических и экологических показателей с увеличением ресурса можно рассматривать перемаркировку котлоагрегатов на меньшую мощность. Установлено, что для котлов топливосжигающих установок (ТСУ), входная тепловая мощность которых 50 МВт и более, работающих на природном газе, для достижения норм ЕС необходимо снизить выбросы NO_x на 50–80 %. Увеличение объема газов рециркуляции в дутьевой воздух более 25 % от дымовых газов значительно уменьшает концентрацию кислорода в смеси воздуха и дымовых газов, что может привести к ухудшению горения, выносу факела в конвективную часть, привести к значительному увеличению расхода электроэнергии и увеличению температуры отходящих газов. Использование газов CO_2 или N_2 для балластирования природного газа с целью снижения выбросов NO_x является экономически нецелесообразным. Использование технологии балластирования, основанной на подмешивании дымовых газов к природному газу, требует специальных горелочных устройств, и диапазон регулирования мощности горелки может быть ограничен. Целесообразно сочетание нескольких методов снижения выбросов NO_x одновременно. Разработан план действий для выполнения экологических директив ЕС существующими котлоагрегатами, работающими на природном газе, с повышением их технико-экономических показателей. Одним из возможных путей выполнения экологических директив ЕС котлоагрегатами в Украине является перенос нагрузки от существующих ТСУ входной тепловой мощностью 50 МВт и более к менее мощным. Кроме того, возможна перемаркировка части котлов на новую номинальную мощность с целью получения ТСУ, входная тепловая мощность которой будет менее 50 МВт, что выведет их из-под действия директивы ЕС 2010/75/EU. *Библ. 18, рис. 6, табл. 1.*

Ключевые слова: оксиды азота, горение, ресурс, газовые котлы, рециркуляция.

Sigal I.Ya., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Smikhula A.V., Candidate of Technical Sciences,
Marasin O.V., Candidate of Technical Sciences, **Lavrentsov E.M.,**
Dombrowska E.P., Candidate of Technical Sciences
The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
39, Degtjariivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: isigal@ukr.net

Modernization of Gas Boilers of TPP, CHP and Boilers Rooms to the EU Directive Ecological Requirements

The installed capacity of boiler units in Ukraine significantly exceeds the needs for consumers was shown. The remarking of boiler units to lower capacity is the one of the least capital-intensive ways to increase their technical, economic, environmental indicators and the extension of their resource. To achieve EU norms it is necessary to reduce emissions of NO_x by 50–80 % for boilers of LCP with an capacity a rated thermal input of 50 MW or more, which operate on natural gas has been established. An increase the concentra-

tion of recirculation gases in blow air of more than 25 % of all exhaust gases significantly reduces the concentration of oxygen in the mixture of air and exhaust gases. It's can cause to: deterioration of combustion, the removal of a torch into the convective part, a significant increase electricity consumption and increase the temperature of the exhaust gases. The using of CO₂ or N₂ gases for balancing natural gas to reduce NO_x emissions is economically impractical. The using of ballasting technology, which based on mixing exhaust gases with natural gas, requires special burners, due to the range of burner power control must be limited. To reduce NO_x is advisable to combine several measures simultaneously. The plan an action to implement EU environmental directives by existing boiler units operating on natural gas with an increase their technical and economic indicators has been developed. There is one of the possible ways to implement the EU ecological directives by boiler units in Ukraine, it's transferring the load from existing LCP with a rated thermal input of 50 MW or more to less powerful ones. For remove combustion plants from the requirements of the EU Directive 2010/75/EU, it is necessary to remark part of the boilers for a new nominal capacity for the purpose of obtaining combustion plants a rated thermal input of less than 50 MW. *Bibl. 18, Fig. 6, Tab. 1.*

Key words: nitrogen oxides, combustion, resource, boilers, recirculation.

References

1. Directive 2001/80/EC of the European parliament and of the council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants, 21 p. — <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32001L0080>
2. Directive 2010/75/EU of the European parliament and of the council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control), 119 p. — <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0075>
3. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 roku «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist»: Cabinet of Ministers of Ukraine — Law of Ukraine, 18.08.2017 No. 605-p., 66 p. — <http://195.78.68.67/minugol/doccatalog/document?id=245234103> (Ukr.)
4. Energy Roadmap 2050 / Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions, Brussels, 15.12.2011, 20 p. — <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52011DC0885>
5. Sigal I.Ya. Protection of ambient air at fuel burning, Leningrad : Nedra, 1988, 313 p. (Rus.)
6. DSP 201-97. Derzhavni sanitarni pravyla okhorony atmosfernoho povitria naselenykh mist (vid zabrudnennia khimichnymi ta biolohichnymi rehovynamy) : Nakaz MOZ — Law of Ukraine, 09.07.97 No. 201. — <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=803> (Ukr.)
7. Sigal I.Ya., Duboshiy A.N., Sigal O.I., Smikhula A.V. The efficiency increase of smoked gases recirculation influence on nitrogen oxides emission from power plant boilers reduction, *Energotehnologii i resurso-sberezhenie*, 2010, (1), pp. 48–52. (Rus.)
8. Directive (EU) 2015/2193 of the European parliament and of the council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants, 19 p. — <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332>
9. Natsionalnyy plan skorochennya vykydiv vid velykykh spalyvalnykh ustanovok : Kintsevyi Proekt, Kyiv, 15 mart 2015, 78 p. — <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015L2193> (Ukr.)
10. Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Duboshiy O.M., Horbunov O.V., Horbunov A.O. Reducing the formation of nitrogen oxides during the combustion of natural gas, *Energotehnologii i resurso-sberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2016, (4), pp. 44–51. (Rus.)
11. Taimarov M.A., Chykliayev D.E., Akhmetova R.V., Chykliayev E.H. Vlyianyie konstruktyvnykh osobenostei topok kotlov na obrazovanye okyslov azota, Tekhnicheskyye nauky v myre ot teoryi k praktike : Sbornik nauchnykh trudov po ytoham mezhdunarodnoi nauchno-praktycheskoi konferentsyy, Rostov-on-Don, 2014, (5), p. 15–20. (Rus.)
12. HKD 34.25.509-2003. Peremarkuvannia osnovnoho enerhetychnoho ustatkuvannia enerhopidpriemstv Ministerstva palyva ta enerhetyky Ukrainy. Polozhennia, Kiev : Obiednannia enerhetychnykh pidpriemstv «Haluzevyi rezervno-investytsiyni fond rozvytku enerhetyky», 2003, 29 p. (Ukr.)
13. Sigal I.Ya., Nizhnik S.S. Zmenschennya utvorennia oksidiv azotu retsirkulyatsiyu produktiv zgoryannya, Tsukor Ukraini, 1994, (3), pp. 14–16. (Rus.)
14. Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Marasin O.V., Lavrentsov E.M. [The increasing duration of operation of boiler houses and heat electro power stations above 12 MW in Ukraine], *Energotehnologii i resurso-sberezhenie*, 2015, (3), pp. 46–53. (Rus.)
15. Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Lavrentsov E.M., Marasin O.V. Shyrokomashtabnaia rekonstruktsiya sushchestvuiushchykh kotlov s tseliu umenshenyia raskhoda pryrodnoho haza, *Enerhoefektyvnist-2013*, Kiev : The Gas Institute of NAS of Ukraine, 2013, pp. 17–20. (Rus.)
16. Lavrentsov E.M., Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Berezanskiy V.V., Ovchar V.V. [Water Boilers of TVG and KVG Types Modernization], *Energotehnologii i resurso-sberezhenie*, 2010, (6), pp. 70–76. (Rus.)

17. Lavrentsov E.M., Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Sigal A.I., Kuchin G.P., Skripko V.Ya., Bykorez E.I. [Reconstruction and Modernization of Water-Heating and Steam Boilers in Heat-Systems], *Energotechnologii i resursosberezhenie*, 2012, (3), pp. 63–71. (Rus.)
18. Sigal I.Ya., Kosinov O.I., Duboshiy O.M., Nizhnik S.S. Povysheniye effektivnosti metodov snizheniya obrazovaniya oksidov azota v topkakh kotlov, *Teplenergetika*, 1986, (7), pp. 6–9. (Rus.)

Received November 7, 2017

Сводное содержание №№ 1–4, 2017 г.

Алексенко В.В., Сезоненко О.Б., Васечко О.О., Нікітін В.Ю. Экспериментальне дослідження термічного знешкодження деяких фармацевтичних відходів	4	53
Безродний М.К., Пригула Н.О., Гобова М.О. Оптимальні умови роботи теплонасосних систем опалення з використанням акумульованої теплоти ґрунту	1	19
Білоусова Н.А., Герасименко Ю.С., Редько Р., Яцишина Н. Вплив ультразвуку на накипоутворення та протикорозійний захист теплообмінної поверхні	3	35
Бондаренко В.П., Матвейчук А.А. Компьютерное моделирование химических равновесий в системе WO_3-H_2O	4	35
Бондарь В.П. Условия минимальных потерь эксергии в неравновесных процессах теплообмена рабочих сред	2	30
Бондарь В.П., Жуков В.О., Жукова С.В. Минимум потерь эксергии в неравновесных процессах теплообмена рабочих сред	1	39
Браверман В., Власюк В. Технологии утилизации твердых бытовых отходов как источник получения альтернативных энергетических ресурсов на примере Одесской области (Обзор)	1	54
Вольчин И.А., Коломиец А.М., Ращепкин В.А. Альтернативное решение для реконструкции электрофильтров угольных ТЭС	3	49
Гомеля Н.Д., Глушко Е.В., Трохименко А.Г., Бутченко Л.И. Электролитическое извлечение ионов тяжелых металлов из солянокислых растворов	1	60
Карп І.М., П'яних К.Є., Нікітін Є.Є. Проблема утилізації та знешкодження мулових осадів міських стічних вод і шляхи її вирішення	2	35
Ковалишин Б.М. Роль електроактивації молекул-реагентів реакції горіння у підвищенні енергоефективності паливних установок при спалюванні пропан-бутанової суміші та природного газу	3	19
Колесник В.В., Орлик В.М., Хвастухін Ю.І., Костогриз К.П., Жайворонко В.А. Кальцинація дрібнодисперсного вапняку в псевдозрідженому шарі інертного зернистого матеріалу. 1. Математичний опис процесу кальцинації частинки вапняку	2	49
Макаренко І.Н., Трус І.Н., Петриченко А.И., Кийченко А.Ю. Исследование эффективности сорбционной очистки воды от ионов аммония на природных и искусственных сорбентах	3	42
Мисак І.С., Заяць М.Ф., Римар Т.І. Дослідження економічних показників роботи модернізованого РПП-98	4	27
Мисак І.С., Кравець Т.Ю., Мисак С.И., Шатило Д.Д., Якимів Є.М. Переведення пилувугільних котлів ТПП-210А Трипільської ТЕС на спалювання твердого палива з технічними характеристиками, відмінними від проектних	4	4
Мисак І.С., Кузик М.П., Заяць М.Ф. Випробування котла фірми SEFAKO при спалюванні біопалива	4	8
Мисак І.С., Ліс С.С. Дослідження процесу газифікації деревної біомаси у суцільному шарі	4	14
Мисак І.С., Федоришин В.С., Мисак С.И., Коваленко Т.П., Ханас А.А. Дослідження експлуатаційного паро-хімічного очищення котла ТГМП-344А Мінської ТЕЦ-4	4	20
Морару В.Н. Механизм повышения и количественная оценка удельного теплового потока при кипении наножидкостей в условиях свободной конвекции	3	25
Никитин Е.Е. Концептуальные положения модернизации существующих неэффективных систем централизованного теплоснабжения	2	11
Олабін В.М., Максимук О.Б., Трухан С.П., Нікітіна І.В. Рекуператори плавильних барботажних печей	3	63
Пикашов В.С., Великодний В.А. Особенности использования газов нефтепереработки для отопления печей и котлов	2	3
Рудька В.И. Потенциал технологий прямого восстановления железа и направления его использования в металлургическом производстве (Обзор)	1	45
Рудька В.И., Малина В.П., Федак С.П., Цымбал А.А. Основные тенденции развития мирового коксохимического производства на современном этапе (Обзор)	2	22
Сігал І.Я., Сміхула А.В., Марасін А.В., Лавренцов Є.М., Домбровська Е.П. Модернізація газових котлів ТЕС, ТЕЦ та котельні відповідно до вимог екологічних директив ЄС	4	61
Сігал І.Я. Воспоминания об ученом	4	3
Снігур О.В., Праженнік Ю.Г., Марчук Ю.В., Бондаренко Б.І. Термодинамічне моделювання процесів газифікації горючої маси твердого палива	1	27
Сорока Б.С., Горупа В.В. Анализ процесса конденсации водяного пара газовых атмосфер и продуктов сгорания	1	3
Сорока Б.С., Горупа В.В. Науково-технологічні засади ефективного використання палива та екологічно чистого спалювання газу. 1. Сучасний стан та визначальні характеристики спалювання газу в побутових газових плитах	3	3
Sych N.V., Trofymenko S.I., Tsyba M.M., Vikarchuk V.M. Energy Saving Approach to Chemical Processing of Lignocellulosic Feedstock into Sorptive Mater	4	49
Торчинский А.И., Ляшко А.Ю., Чичуа З. Модернизация туннельной печи обжига керамического кирпича на предприятии «Метехис керамика» (Грузия)	2	67
Торчинский А.И., Ляшко А.Ю., Шкарлинский О.Ф., Чичуа З., Волобуев С.В. Внедрение энергосберегающего оборудования для обжига керамического кирпича в туннельной печи	3	56
Шаманский С.И., Бойченко С.В., Матвеева И.В. Технологические основы организации экологически безопасного функционирования системы водоотведения	2	59
XIII Международная научно-практическая конференция «Угольная теплоэнергетика : Пути реконструкции и развития»	3	69