

УДК 621.18-5

**С. Г. КОБЗАР**, канд. техн. наук, с.н.с.; п.н.с. ІТТФ НАН України; Київ;  
**А. А. ХАЛАТОВ**, д-р техн. наук, академік; зав. відділу ІТТФ НАН України; Київ

**ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТУ  
СИСТЕМОЮ СТУПЕНЕВОГО СПАЛЮВАННЯ ВУГІЛЛЯ КОТЛА  
ТПП-312 БЛОКУ № 6 ДТЕК ЛАДИЖИНСЬКА ТЕС НА ОСНОВНИХ  
РЕЖИМАХ НАВАНТАЖЕННЯ**

Проведено дослідження ефективності зниження оксидів азоту системою ступеневого спалювання вугілля котла ТПП-312 на основних режимах навантаження та визначено вплив її експлуатації на основні технологічні параметри топки. Отримано, що для забезпечення умов рідкого шлаковидалення в низу топки мінімальне навантаження блоку не повинно бути менше 210 МВт<sub>е</sub>, а витрата палива в додаткові пальники не перевищувати 10 % витрати вугілля. Для попередження шлакування системи підвісних ширм на максимальних навантаженнях існуюча система потребує додаткової модернізації. Для забезпечення максимального відновлення оксидів азоту системою ступеневого спалювання вугілля значення надлишку повітря на початку зони допалювання повинно становити 0,9.

**Ключові слова:** горіння вугілля, пальник, оксиди азоту, ступеневе спалювання вугілля.

**Вступ**

Енергетика є базовою галуззю економіки України, що забезпечує функціонування всього господарського комплексу країни. Встановлена потужність генеруючого обладнання у 2012 році складала 53,8 млн. кВт, з яких 54,5 % розміщено на теплових електростанціях (ТЕС і великі ТЕЦ).

Для успішної інтеграції енергетичної системи України з об'єднанням енергосистем європейських країн, крім проведення заходів з підвищення надійності роботи генеруючого обладнання необхідно виконати вимоги по екологічним параметрам до енергоблоків. По екологічним показникам вугільні котли ТЕС оснащені лише системою уловлювання часток – електрофільтрами та мокрими скруберами. Важливого питанню зниження викидів оксидів азоту присвячено недостатньо уваги. На сьогодні показник рівня цих викидів від вугільних блоків складає 400...1600 мг/нм<sup>3</sup>, який потрібно зменшити до 350...500 мг/нм<sup>3</sup> до 2020 року, та до 200 мг/нм<sup>3</sup> після 2020 року. Для досягнення цієї мети необхідно провести реконструкцію вугільних блоків, які мають достатній залишковий ресурс. Прикладом таких блоків можуть бути схожі за конструкцією блоки ТПП-312 та ТПП-312а, якими оснащені Ладижинська ТЕС (6 блоків), Вуглегірська ТЕС (4 блоки), Запорізька ТЕС (4 блоки), Зуївська ТЕС (4 блоки). Залишковий ресурс цих блоків складає 16...34 роки.

Під час спалювання твердого палива одним з методів зниження викидів оксидів азоту є метод ступеневого спалювання вугілля. При реалізації даного методу витрата палива розділяється не менш ніж на два потоки: перший (75–90 % по теплу) подається в основні пальники з робочим надлишком повітря; другий (паливо допалювання) – в додаткові пальники, розташовані вище основних, з кількістю повітря нижче ніж стехіометричне значення. Завдяки цьому утворюється зона відновлення оксидів азоту до молекулярного азоту, що призводить до зниження емісії приблизно на 50 % [1, 2]. Решта необхідного для повного спалювання палива повітря подається у сопла допалювання, які розташовані вище додаткових пальників.

© С.Г. Кобзар, А.А. Халатов, 2015

В роботі [3], використовуючи комп'ютерну модель топки котла ТПП-312 та удосконалену модель горіння вугілля, були проведені розрахунки термогазодинаміки топкового простору котла ТПП-312 з системою ступеневого спалювання вугілля, яка змонтована на блоці № 6 ДТЕК Ладизинська ТЕС, для режиму навантаження турбіни 280 МВт<sub>е</sub>. Розрахунки роботи котла ТПП-312 з системою ступеневого спалювання на проектних значеннях режимних параметрів системи ступеневого спалювання показали можливість зниження оксидів азоту на 22 %. Залишилися не розглянуті питання визначення ефективності системи ступеневого спалювання на часткових режимах навантаження котлоагрегату та вплив її експлуатації на основні технологічні параметри топки котла.

#### **Мета дослідження, постановка задачі**

Метою дослідження є визначення ефективності системи ступеневого спалювання вугілля котла ТПП-312 по зниженню оксидів азоту на основних режимах навантаження блоку та впливу її роботи на основні технологічні параметри топки котла.

По принципу організації процесу спалювання вугілля в топці котла ТПП-312 можна вважати основними режимами навантаження 280 та 210 МВт<sub>е</sub>. При роботі котла на навантаженні турбіни 280 МВт<sub>е</sub> в роботі знаходяться усі 16 основних пальників. Режим навантаження турбіни 210 МВт<sub>е</sub> реалізується шляхом попарного відключення бокових пальників верхнього ярусу розташованих один на проти іншого. Для захисту зупинених пальників від термічної руйнації в тракт аеросуміші залишається повна подача суміші димових газів з повітрям, як і в випадку працюючого пальника, а в тракт вторинного повітря подається приблизно 10 % витрати повітря від робочого значення.

Для транспорту пилу у додаткові пальники за проектом планується використовувати чисті димові гази. Стандартний котел ТПП-312 оснащений двома димососами ГД-20-500у, продуктивність якого при температурі газів 400 °С становить 200 тис. м<sup>3</sup>/год. На систему приготування вугільного пилу відбирається половина витрати димових газів. Решта 200 тис. м<sup>3</sup>/год. з температурою 400 °С подається у сопла рециркуляції. Детальний опис змонтованої системи ступеневого спалювання вугілля наведено в роботі [3]. При введення в експлуатацію системи ступеневого спалювання, транспорт пилу буде виконуватися двома димососами ДДНА-НЖ-15С, продуктивність яких становить 30–60 тис. м<sup>3</sup>/год. Результати досліджень роботи [3] показали, що витрата димових газів у 120 тис. м<sup>3</sup>/год. забезпечує більший ступінь відновлення оксидів азоту, тому це значення було прийнято за основу. У сопла рециркуляції подається решта витрати димових газів – 80 тис. м<sup>3</sup>/год.

#### **Визначення рівня зниження оксидів азоту та зміни технологічних параметрів в топці котла ТПП-312 при роботі системи ступеневого спалювання**

Для визначення ефективності зниження викидів оксидів азоту на проектних режимах роботи, значення витрат димових газів у додаткові пальники та у сопла рециркуляції були зафіксовані. Були проведені розрахунки для різних значень надлишку повітря в основних пальниках. Досліджувалися наступні значення надлишків повітря: 1,0 та 1,15. Витрата вугілля у додаткові пальники змінювалася у діапазоні 0...20 %. Був проведений аналіз отриманих результатів для виявлення впливу надлишку повітря в основних пальниках та відсотку вугілля, що йде на допалювання, на ефективність зниження оксидів азоту та технологічні параметри в середині топки котла.

Результати дослідження роботи системи ступеневого спалювання для навантаження 280 МВт<sub>е</sub> наведені на рис. 1–3. На рис. 1 показана залежність зниження

оксидів азоту від надлишку повітря в основних пальниках та проценту палива, що йде у додаткові пальники для процесу допалення. Для режиму навантаження 280 МВт<sub>е</sub> максимальне зниження оксидів азоту очікується в 35 % при  $\alpha_{\text{осн}} = 1,15$  у основних пальниках та витраті палива 20 %; при  $\alpha_{\text{осн}} = 1,0$  – 30 %. При цьому втрати палива від недопалу, обумовлені тільки роботою системи ступеневого спалювання, будуть становити 0,5 % (див. рис. 2). Зміна осередненої температури в перетині при вході в систему підвісних ширм наведена на рис. 3а. При витраті палива у додаткові пальники у 10 % та  $\alpha_{\text{осн}} = 1,15$  спостерігається збільшення температури на 65 градусів, що пов'язано з організацією зони допалювання в верхній частині топки котла. При витраті палива у додаткових пальниках у 20 % спостерігається збільшення рівня осередненої температури на 80 градусів. Зменшення градієнту зростання осередненої температури при збільшенні витрати вугілля в додаткові пальники з 10 % до 20 % пов'язано зі зростанням недопалу палива (див. рис. 2). Збільшення максимальної температури в перетині перед ширмами наведено на рис. 3б. Локальне збільшення температури, може привести до шлакування поверхонь труб, яке для вугілля що спалюється на станції настає при температурі  $T_A = 1523$  К. Так при витраті палива у додаткові пальники у 10 % та  $\alpha_{\text{осн}} = 1,15$  спостерігається збільшення максимальної температури на 200 градусів.

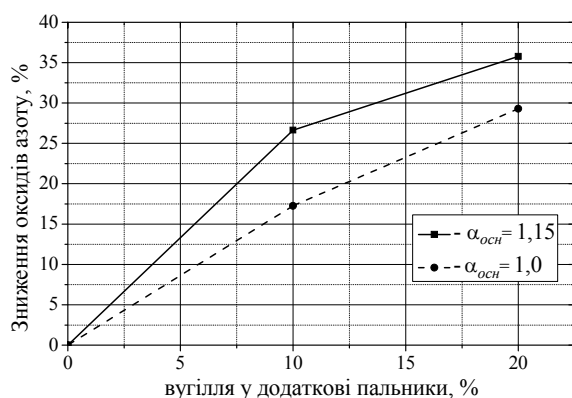


Рис. 1 – Ефективність системи ступеневого спалювання, в залежності від витрати вугілля у додаткові пальники: навантаження турбіни 280 МВт<sub>е</sub>

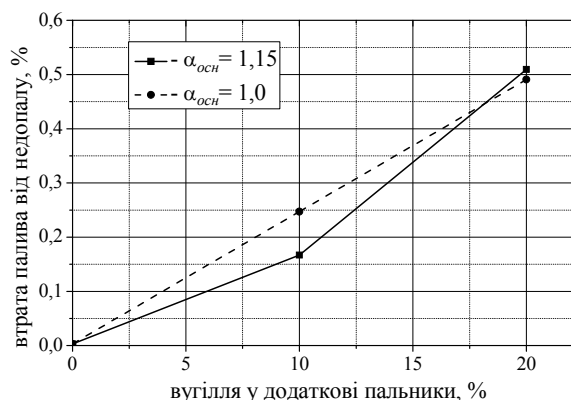


Рис. 2 – Відносні втрати палива від недопалу при роботі системи ступеневого спалювання: навантаження турбіни 280 МВт<sub>е</sub>

При надлишку повітря в основних пальниках  $\alpha_{\text{осн}} = 1,0$  значення надлишку повітря на початку зони відновлення становить  $\alpha_{\text{дод}} = 0,75$ , а при  $\alpha_{\text{осн}} = 1,15$  це значення складає  $\alpha_{\text{дод}} \approx 0,9$ . Цей результат дає змогу зробити висновок, що для максимального відновлення оксидів азоту наявною системою ступеневого спалювання вугілля, треба дотримувати значення надлишку повітря на початку зони відновлення близьким до 0,9, що за даними роботи [4] є оптимальним при роботі системи ступеневого спалювання, яка в якості палива допалювання використовує вугільний пил.

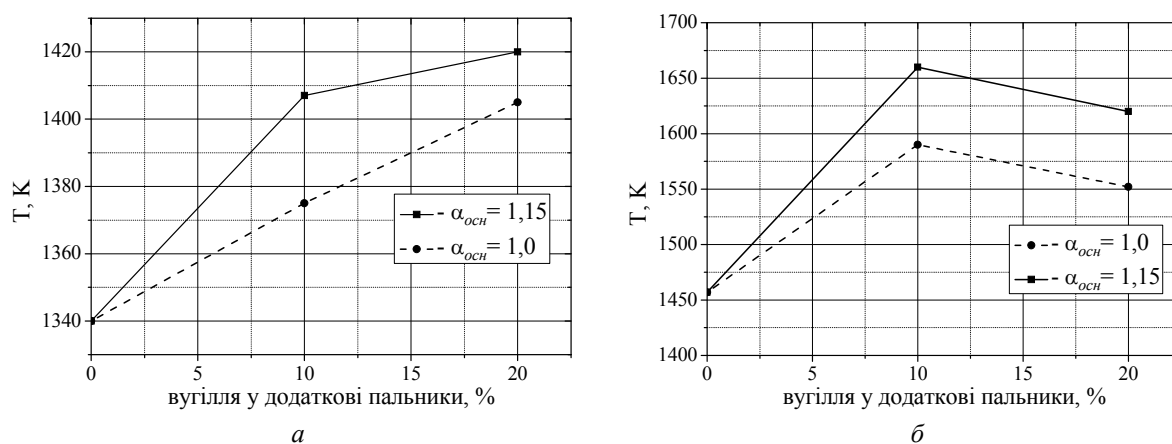


Рис. 3 – Зміна температури продуктів згоряння при вході в систему підвісних ширм при навантаженні турбіни 280 МВт<sub>е</sub>: а – осереднена температура; б – максимальна температура

Результати дослідження роботи системи ступеневого спалювання для навантаження 210 МВт<sub>е</sub> наведені на рис. 4–6. Для режиму навантаження 210 МВт<sub>е</sub> максимальне зниження оксидів азоту очікується в 45 % при надлишку повітря в основних пальниках  $\alpha_{O_2} = 1.15$  та витраті палива в додаткові пальники 20 %; при  $\alpha_{O_2} = 1.0$ –35 % (див. рис. 4). При цьому втрати палива від недопалу, обумовлені тільки роботою системи ступеневого спалювання, будуть становити 0,95 % (див. рис. 5) при  $\alpha_{O_2} = 1.15$  та 0,88 % при  $\alpha_{O_2} = 1.0$ . Робота системи ступеневого спалювання на часткових режимах навантаження призводить до меншого рівня зростання осередненої та максимальної температур перед ширмами порівняно з режимом навантаження 280 МВт<sub>е</sub> (див. рис. 6). Проблем з можливим шлакуванням поверхонь ширм не повинно бути.

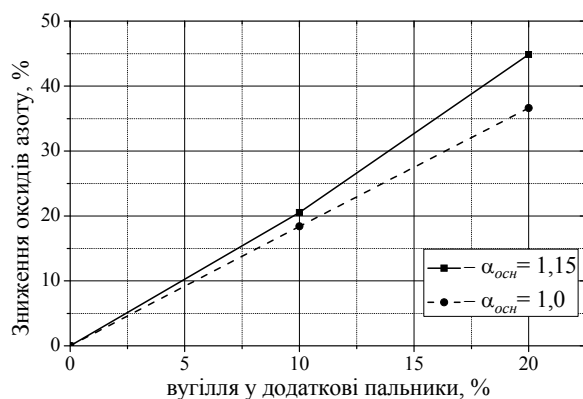


Рис. 4 – Ефективність системи ступеневого спалювання, в залежності від витрати вугілля у додаткові пальники: навантаження турбіни 210 МВт<sub>е</sub>

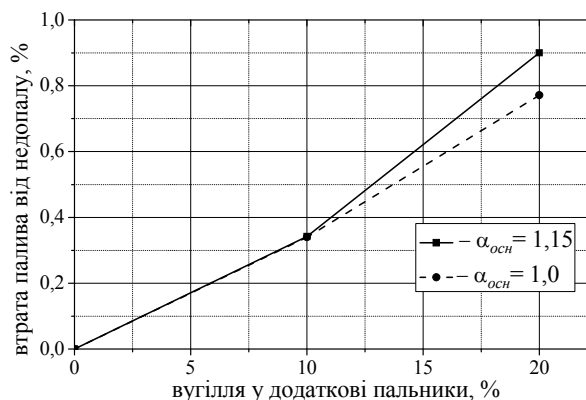


Рис. 5 – Відносні втрати палива від недопалу при роботі системи ступеневого спалювання: навантаження турбіни 210 МВт<sub>е</sub>

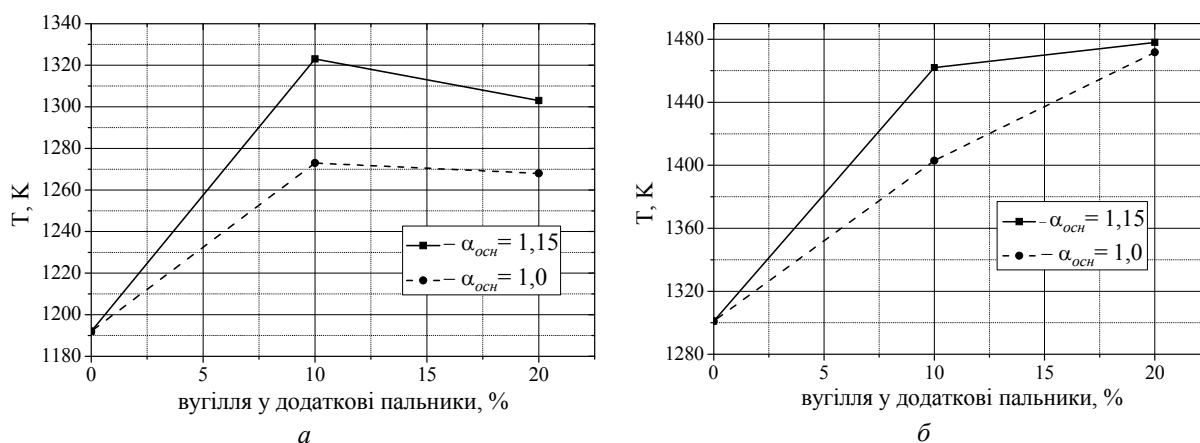


Рис. 6 – Зміна температури продуктів згоряння при вході в систему підвісних ширм при навантаженні турбіни 210 МВт<sub>е</sub>: а – осереднена температура; б – максимальна температура

Котел ТПП-312 оснащений системою рідкого видалення шлаку. Одним з важливих контрольованих параметрів в низу топки є температура рідкого стану шлаку. Проведені дослідження показали, що при навантаженні котлоагрегату у 280 МВт<sub>е</sub> рідке шлаковидалення забезпечується при перерозподілі вугілля в додаткові пальники в діапазоні 0–20 %. В разі зниження навантаження до 210 МВт<sub>е</sub> умови рідкого шлаковидалення забезпечуються тільки при значенні витрати вугілля в додаткові пальники не більше 10 %.

Результати розрахунків роботи системи ступеневого спалювання на проектних параметрах дозволяє зробити висновок, що доцільно тримати коефіцієнт надлишку повітря у основних пальниках на рівні  $\alpha_{O_2} = 1,15$ , що дає більший відсоток зниження оксидів азоту. В той же час, витрата вугілля в додаткові пальники на рівні 10 %, дає прийнятний ступінь зниження оксидів азоту та втрати палива від недопалу 0,25 % при максимальному навантаженні та 0,35 % при частковому.

Слід зазначити, що транспортування вугілля чистими димовими газами при їх температурі 400 °С може призвести до коксування пилопроводів, так як при цих температурах починається термічна деструкція газового вугілля, яке спалюється на ДТЕК Ладизинська ТЕС.

### Шляхи вдосконалення системи ступеневого спалювання котла ТПП-312

Результати дослідження показали, що для безпечної експлуатації системи ступеневого спалювання на максимальних навантаженнях необхідно особливу увагу приділяти температурі біля поверхонь пароперегрівача у верхній частині топки, де внаслідок організації зони допалення спостерігається підвищення рівня осередненої та максимальної локальної температур. Зменшити рівень температур до безпечного значення можливо двома шляхами. Перший шлях направлений на подачу в сопла рециркуляції, які знаходяться в верхній частині топки котла, додаткової витрати димових газів з температурою 380–400 °С, шляхом введення в дію додаткового димососа. Другий шлях полягає в зменшенні по висоті зони допалення, що може бути досягнуто шляхом забезпечення більшої повноти згоряння палива допалення у відновлювальній зоні, яка розташована між додатковими пальниками та соплами третинного повітря. Технічно реалізація даного шляху можлива шляхом підвищення локального надлишку повітря на початку зони допалення до  $\alpha_{\text{дод}} = 0,9\text{--}0,95$ .

### Висновки

1) Проведені розрахунки роботи системи ступеневого спалювання вугілля котла ТПП-312 на проектних режимах роботи показали, що оптимальне значення надлишку повітря на початку зони допалювання дорівнює 0,9.

2) Витрата палива у додаткові пальники на рівні 10 % дає краще значення по рівню втрати палива від недопалу, та в залежності від навантаження блоку, забезпечує зниження оксидів азоту на рівні 20–26 %.

3) Для забезпечення безпечної роботи котла ТПП-312 на максимальних навантаженнях необхідно провести додаткову модернізацію системи стадійного спалювання вугілля.

*Робота виконана за Цільовою комплексною програмою наукових досліджень НАН України «Науково-технічне, нормативне та інформаційне забезпечення створення гнучкої та адаптивної об'єднаної енергетичної системи України» («ОБ'ЄДНАННЯ-2»)*

**Список літератури:** 1. Smoot, L. D. NO<sub>x</sub> control through coal reburning [Text] / L. D. Smoot, S. C. Hill, H. Xu // Prog. Energ. Combust. Sci. – 1998. – Vol. 24, No 5. – P. 385–408. 2. Maly, P. M. Alternative fuel reburning [Text] / P. M. Maly, V. M. Zamansky, L. Ho, R. Payne // Fuel. – 1999. – Vol. 78, No. 3. – P. 327–334. 3. Визначення ефективності зниження викидів оксидів азоту системою ступеневого спалювання вугілля котла ТПП-312 блоку № 6 ДТЕК Ладизинська ТЕС [Текст] / С. Г. Кобзар, А. А. Халатов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2014. – № 13(1056). – С. 85–91. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. 4. Qiu, P. Industrial test on coal re-burning at s 600 MW utility boiler and NO<sub>x</sub> reduction [Text] / P. Qiu, S. Wu, H. Liu, L. Yang, G. Wang // Korean J. Chem. Eng. – 2007. – Vol. 24, No 4. – P. 683–687.

**Bibliography (transliterated):** 1. Smoot, L. D., S. C. Hill and H. Xu. "NO<sub>x</sub> control through coal reburning." *Prog. Energ. Combust. Sci.* 24.5 (1998): 385–408. Print. 2. Maly, P. M., et al. "Alternative fuel reburning." *Fuel* 78.3 (1999): 327–334. Print. 3. Kobzar, S. G., and A. A. Khalatov. "Vyznachennya efektyvnosti znyzhennya vykydiv oksydiv azotu systemoyu stupenevoho spalyuvannya vuhillya kotla TPP-312 bloku # 6 DTEK Ladyzhyns'ka TES." *Visnyk NTU "KhPI". Ser.: Energetychni ta teplotekhnichni procesy j ustatkuvannja*. No. 13(1056). Kharkiv : NTU "KhPI", 2013. 85–91. ISSN 2078-774X. Print. 4. Qiu, P. et al. "Industrial test on coal re-burning at s 600 MW utility boiler and NO<sub>x</sub> reduction." *Korean J. Chem. Eng.* 24.4 (2007): 683–687. Print.

*Надійшла (received) 09.02.2015*