

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; проф., академік НАНУ; Інститут технічної
теплофізики НАН України; НТТУ «КПІ», Київ

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТУ СИСТЕМОЮ СТУПЕНЕВОГО СПАЛЮВАННЯ ВУГІЛЛЯ КОТЛА ТПП-312 БЛОКУ № 6 ДТЕК ЛАДИЖИНСЬКА ТЕС

Виконано адоптацію моделі горіння вугілля програмного комплексу до хімічного складу палива, що спалюється на ДТЕК Ладизинська ТЕС. Проведено комп'ютерне моделювання роботи топки котла ТПП-312 блоку №6 ДТЕК Ладизинська ТЕС з системою ступеневого спалювання вугілля для режиму навантаження турбіни 280 МВт_е. Розрахунки проведено для проектних значень режимних параметрів системи ступеневого спалювання вугілля: надлишок повітря в основних пальниках – 1,15, кількість вугілля, що подається у додаткові пальники – 20 %. Ефективність зниження оксидів азоту системою ступеневого спалювання вугілля визначалася шляхом співставлення з результатами розрахунків роботи котла ТПП-312 без системи ступеневого спалювання. Отримано, що при проектних значеннях режимних параметрів, система ступеневого спалювання вугілля забезпечує зниження емісії оксидів азоту на 22,6 %..

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/нм³, який потрібно зменшити до 350...600 мг/нм³ до 2020 року, та до 200 мг/нм³ 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 Ладизинська 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, 2014

Пробні пуски системи ступеневого спалювання на блоці № 4 ДТЕК Ладжинська ТЕС, яка використовує в якості палива допалювання природний газ, підтвердили ефективність цього методу зниження викидів оксидів азоту в атмосферу [3]. Через високу вартість природного газу та введення лімітів на його використання на даний час його використання в якості палива допалювання неможливе. У той же час в якості палива допалювання можливо використовувати вугілля. Порівняно з газом вугілля має меншу реакційну спроможність та потребує точних розрахунків параметрів експлуатації котла таких, як тонина помелу вугілля, що йде на допалювання, швидкість його подачі в пальники допалювання та значення локальних коефіцієнтів надлишку повітря в зонах основних та додаткових пальників.

Мета дослідження, постановка задачі

Метою дослідження є визначення ефективності системи ступеневого спалювання вугілля, яка змонтована на котлі ТПП-312 блоку № 6 ДТЕК Ладжинська ТЕС, на проектних режимах роботи.

На блоці № 6 ДТЕК Ладжинська ТЕС для зниження викидів оксидів азоту змонтована система ступеневого спалювання. В якості проектного палива допалювання заплановано використовувати вугільний пил. У додаткові пальники планується подавати вугілля такого ж фракційного складу, як і на основні пальники, без додаткових заходів з подрібнення палива, яке йде на допалювання. Система ступеневого спалювання вугілля змонтована на типовий проект котла ТПП-312 під час його реконструкції. Вертикальна компоновка котла ТПП-312 блоку № 6 після реконструкції наведена на рис. 1. В результаті реконструкції на відмітці 20,3 м були змонтовані додаткові пальники для подачі палива, які мають прямокутний перетин 0,3×0,3 м та встановлені під горизонтальним кутом 20°. На фронті та тилу котла змонтовано по 10 додаткових пальників. На фронті котла на відмітці 26,6 м та на тилу котла на відмітці 27,4 м встановлено сопла третинного повітря. Кожна сторона має по десять здвоєних по вертикалі сопел прямокутного перетину 0,3×0,15 м, при чому верхня частина встановлена під кутом 22° до бокової поверхні.

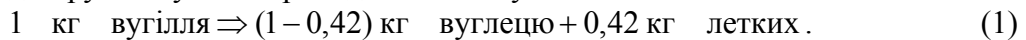
Для транспорту пилу у додаткові пальники планується використовувати димові гази. Стандартний котел ТПП-312 оснащений двома димососами ГД-20-500у з продуктивністю кожного 200 тис. м³/год. при температурі газів 400 °С. На систему приготування вугільного пилу відбирається половина витрати димових газів. Решта 200 тис. м³/год. подається у сопла рециркуляції. При введенні в експлуатацію системи ступеневого спалювання транспортування вугільного пилу у додаткові пальники буде здійснюватися димовими газами за допомогою двох димососів ДДНА-НЖ-15С з продуктивністю кожного 30–60 тис. м³/год. Залежно від продуктивності димососів ДДНА-НЖ-15С на транспортування аеросуміші у додаткові пальники буде витрачатися 60 чи 120 тис. м³/год., а решта витрати димових газів (140 чи 80 тис. м³/год.) буде подаватися у сопла рециркуляції (ДРГ на рис. 1).

Особливості моделі горіння вугілля

Котли ТПП-312 на ДТЕК Ладжинська ТЕС працюють на вугіллі марок Г та ДГ. Аналіз даних якості вугілля, яке використовується на станції, дав можливість вивести його осереднені характеристики, які використовувалися для вдосконалення моделі горіння вугілля пакету прикладних програм *Phoenix* [4].

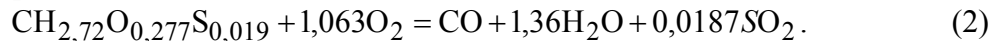
Для зменшення витрат машинного часу використовувалась модель сурогатного палива [5], за якою склад легких було представлено у вигляді однієї речовини та розраховувався відповідно до елементного складу вугілля. Масова частка легких у горючій складовій вугілля становить 42 %. При нагріванні вугільної частинки під час

термохімічної деструкції палива 42 % горючої маси вугілля переходить у газову фазу, а 58 % маси залишається в твердій фазі. В даній роботі зроблено припущення, що під час термохімічної деструкції вугілля тверда фаза складається лише з вуглецю. Процес термохімічної деструкції вугілля проходить за наступною схемою:



Виходячи з хімічного складу горючої маси летких, молекулярну формулу летких представлено як $C_xH_yO_zS_wN_r$. Оскільки азот не горить і становить незначну частку у складі летких, у подальшому він виключався з розгляду і формула летких вугілля представлялася у вигляді $CH_{2,72}O_{0,277}S_{0,019}$. Молекулярна маса летких становить 19,75 кг/кмоль.

Процес горіння летких за двостадійною схемою можна записати як:



Виходячи з рівняння (2) були зроблені необхідні кодування програмного

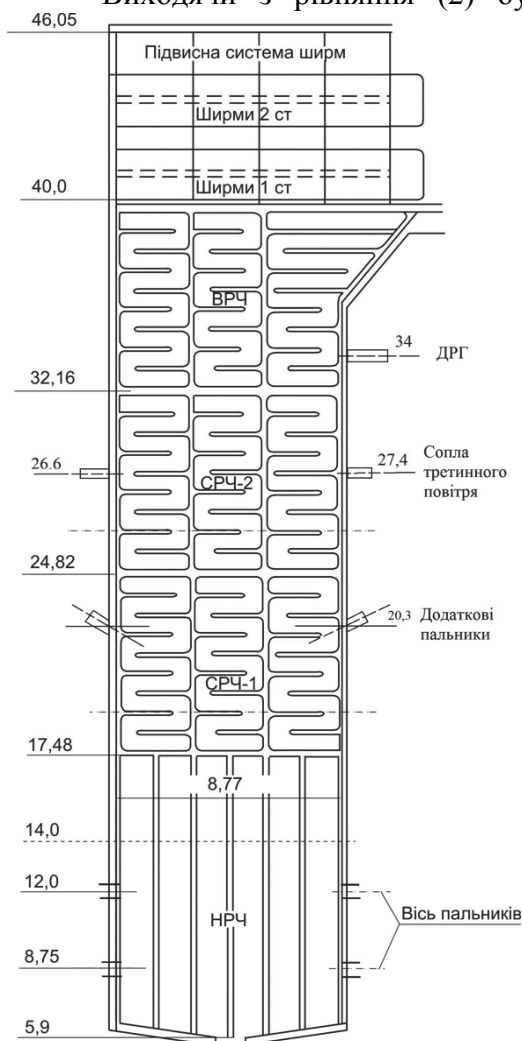


Рис. 1 – Вертикальна компоновка котла ТПП-312 з системою ступеневого спалювання вугілля: ВРЧ – верхня радіаційна частина; ДРГ – димові рециркуляційні гази; СРЧ – середня радіаційна частина; НРЧ – нижня радіаційна частина

комплексу по тепловому ефекту реакції та зміні концентрацій летких, кисню, водяної пари, монооксиду вуглецю та оксиду сірки. Детально модель горіння вугілля описана в роботі [4]. Для розрахунку емісії оксидів азоту в атмосферу при спалюванні вугілля використовувалися стандартні моделі утворення оксидів азоту, а саме термічний, *Prompt* та паливний. Для виявлення ефекту відновлення оксидів азоту при ступеневому спалюванні додатково використовувався *Reburning* механізм.

Граничні умови

Для визначення теплових граничних умов використовувалися дані станції по вхідним та вихідним температурам кожної з радіаційних поверхонь [4]. На кожній радіаційній поверхні температура задавалася сталою та визначалася, як середнє арифметичне вихідної та вхідної температур. За цією температурою задавався питомий радіаційний потік, що сприймала кожна з поверхонь. Міра чорноти труб була прийнята сталою та дорівнювала 0,8. Для розрахунку радіаційного теплообміну використовувалася *P-1* модель. Температури радіаційних поверхонь були збільшені на значення термічного перепаду в товщині матеріалу труб.

Для розрахунку двофазної течії використовувався метод Лагранжа. Згідно з даних станції кульові барабанні млини по фракційному складу мають наступну характеристику $\delta_{R_{90}} = 32 \%$. При проведенні

розрахунків було прийнято, що склад пилу складається з чотирьох фракції 12; 38; 62 та 90 мкм з масовими долями у суміші відповідно 0,18; 0,25; 0,25 та 0,32, що характерно для кульових барабанних млинів.

Програма розрахунків

Розрахунки проведені для максимального режиму навантаження турбіни ДТЕК Ладизинська ТЕС, яке становить 280 МВт_е. При даному режимі навантаження в роботі використовуються 16 пальників. Коефіцієнт надлишку повітря тримається на рівні 1,15. Для визначення ефективності системи стадійного спалювання вугілля спочатку проведено розрахунок роботи котла без системи ступеневого спалювання (Варіант 1). Для цього були задані нульові граничні умови по витратам у додаткових пальниках та соплах третинного повітря. В сопла рециркуляції подавалися димові гази з вмістом кисню 6 об. % у кількості 200 м³/год. при температурі 400 °С.

Проектна витрата пилу в додаткові пальники складає 20 % загальної витрати вугілля на котел. Надлишок повітря в основних пальниках при ступеневому спалюванні прийнято 1,15, решта повітря подавалася у сопла третинного повітря. Були проведені розрахунки двох режимів роботи системи ступеневого спалювання: Варіант 2 – подача пилу здійснюється димовими газами в кількості 60 тис. м³/год.; Варіант 3 – подача пилу здійснюється димовими газами в кількості 120 тис. м³/год.. Витрати вугілля в основні та додаткові пальники, а також витрата повітря у сопла третинного повітря для обох варіантів були однакові.

Результати дослідження

Використовуючи пакет прикладних програм *Phoenix* проведено комп'ютерне моделювання роботи топки котла ТПП–312 базового варіанту та з системою ступеневого спалювання, яка змонтована на блоці № 6 ДТЕК Ладизинська ТЕС. Результати розрахунків роботи системи ступеневого спалювання порівнювалися з базовим варіантом (без системи ступеневого спалювання).

На рис. 2 наведено температурне поле на вісі котла. Аналіз температурного поля на вісі котла для Варіанту 1 (див. рис. 2а) показав, що зона високих температур знаходиться в межах НРЧ та СРЧ-1. Максимальна температура полум'я ($T = 1875$ К) спостерігається посередині топки котла вище центральних пальників другого ярусу. При роботі системи ступеневого спалювання поле температур трансформується (див. рис. 2б та рис. 2в). Так, спостерігається зменшення максимальної температури на 60 градусів. В зоні основних пальників зона високих температур закінчується до додаткових пальників. В зоні подачі палива спостерігається зниження температури, що в першу чергу пов'язано з витратою теплової енергії на нагрів палива та термічну деструкцію «сирого» вугілля, в результаті якої виходять леткі.

В топці без системи ступеневого спалювання допалювання коксового залишку закінчується в районі сопел третинного повітря. При роботі системи ступеневого спалювання, ступінь вигорання коксового залишку залежить від швидкості подачі вугілля у додаткові пальники. При більшій швидкості подачі вугільного пилу (Варіант 3) очікується повне спалювання коксового залишку до ширм. У випадку Варіант 2, швидкість подачі палива забезпечує менший імпульс часткам вугілля, якого недостатньо для руху в середину топки. В цьому випадку очікується знос незгорілого коксового залишку в зону ширм, в першу чергу часток більшого діаметра.

На рис. 3 наведено розподіл масової концентрації оксиду азоту на вісі котла залежно від швидкості подачі вугілля у додаткові пальники. При роботі котла без системи ступеневого спалювання (рис. 3а) перша зона утворення оксиду азоту знаходиться в зоні пальників на середині котла, яка обумовлена утворенням оксиду

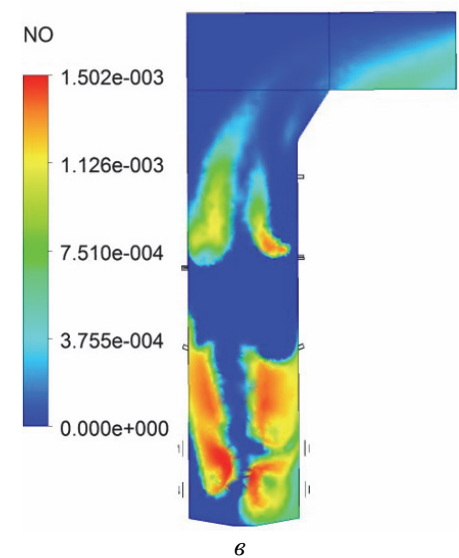
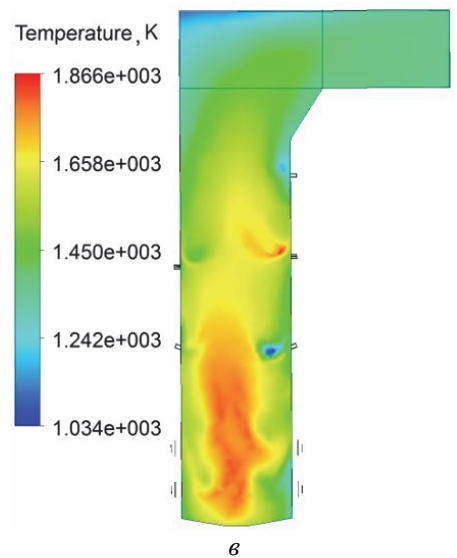
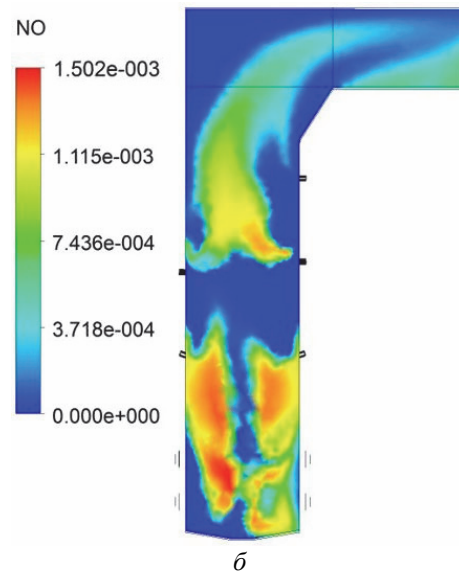
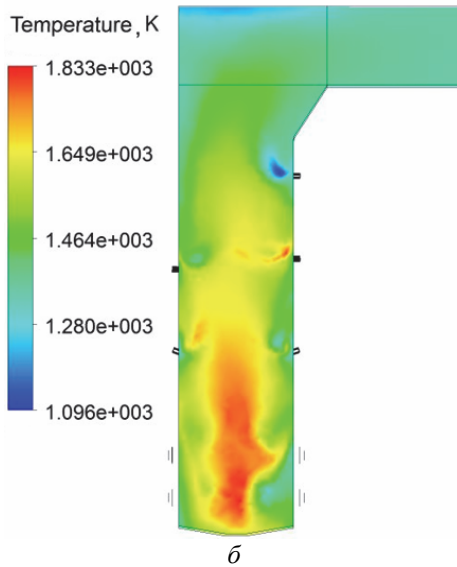
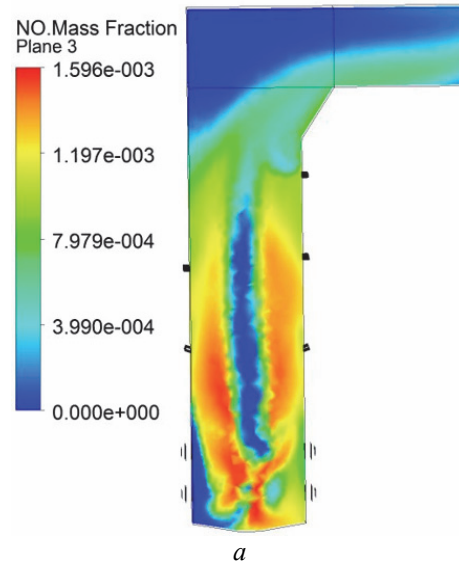
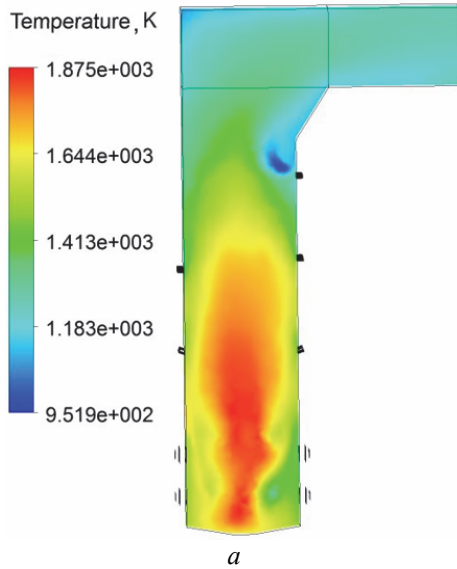


Рис. 2 – Температурне поле на осі котла:
a – Варіант 1; *б* – Варіант 2; *в* – Варіант 3

Рис. 3 – Масова концентрація оксиду азоту на осі котла:
a – Варіант 1; *б* – Варіант 2; *в* – Варіант 3

азоту за термічним механізмом. Основна зона утворення оксиду азоту розташована в межах СРЧ-1 та СРЧ-2 ближче до фронтальної та тилової сторін топки. В цій зоні утворення оксиду азоту відбувається переважно за паливним механізмом. Посередині топки котла розташована зона з низьким вмістом оксиду азоту, такий розподіл обумовлений аеродинамікою в середині топки котла та мінімальною концентрацією кисню у цій зоні.

При роботі топки котла з системою ступеневого спалювання вугілля спостерігається зона відновлення оксиду азоту, яка розташована між додатковими пальниками та соплами третинного повітря (див. рис. 3б та рис. 3в). Після сопел третинного повітря спостерігається нова зона утворення оксидів азоту. У разі подачі палива у додаткові пальники з більшою швидкістю, зона відновлення оксиду азоту має більшу площу (див. рис. 3в).

Ефективність системи ступеневого спалювання по зниженню викидів оксиду азоту для режиму навантаження 280 МВт_е наведено в таблиці. У разі подачі палива крізь додаткові пальники за допомогою витрати димових газів у об'ємі 120 тис. м³/год. зниження викидів становить 22,6 %.

Таблиця

Ефективність системи ступеневого спалювання по зниженню викидів оксиду азоту

Варіант	Емісія оксиду азоту, кг/с	Зниження емісії оксиду азоту, %
1	0,09243	0
2	0,07643	17,3
3	0,07153	22,6

Шляхи підвищення ефективності системи ступеневого спалювання вугілля котла ТПП-312

Проведені розрахунки показали, що система ступеневого спалювання з проектними значеннями коефіцієнту надлишку повітря та в разі подачі пилу у додаткові пальники вугільного пилу за допомогою димових газів у об'ємі 120 тис. м³/год. забезпечує зниження викидів оксидів азоту на рівні 22,6 %. З літератури [1–2] відомо, що системи ступеневого спалювання, які використовують в якості палива допалення вугілля, мають потенціал зниження викидів оксидів азоту до 50 %.

Шляхи підвищення відсотку зниження викидів оксиду азоту при експлуатації змонтованої на котлі ТПП-312 системи стадійного спалювання вугілля можна розділити на два напрями. Перший полягає у оптимізації коефіцієнту надлишку повітря у основних пальниках, з одночасним перерозподілом повітря у сопла третинного повітря. Другий полягає у подачі пилу з більшою тониною помелу у додаткові пальники. Поєднання двох напрямків, на нашу думку, дозволить підвищити ефективність системи ступеневого спалювання вугілля по зниженню викидів азоту у атмосферу.

Висновки

1) Проведено комп'ютерне моделювання роботи топки котла ТПП-312 з системою ступеневого спалювання вугілля для режиму навантаження турбіни 280 МВт_е.

2) Результати розрахунків показали, що у разі подачі у додаткові пальники вугільного пилу за допомогою димових газів у об'ємі 60 тис. м³/год. забезпечується зниження оксидів азоту на рівні 17,3 %; при подачі пилу у додаткові пальники за

допомогою димових газів у об'ємі 120 тис. м³/год. забезпечується зниження емісії оксидів азоту на рівні 22,6 %. Експлуатація системи ступеневого спалювання не повинна привести до значного шлакування ширм та забезпечує умови для плавлення золи у нижній частині топки.

3) Підвищення відсотку зниження викидів оксиду азоту при експлуатації змонтованої на котлі ТПП-312 блоку № 6 Ладижинської станції можливо досягти шляхом зменшення коефіцієнту надлишку повітря у основних пальниках до 1,0–1,1 з одночасним збільшенням витрати повітря у соплах третинного повітря.

Список літератури: 1. Smoot, L. D. NO_x control through coal reburning [Текст] / 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 [Текст] / P. M. Maly, V. M. Zamansky, L. Ho, R. Payne // Fuel. – 1999. – Vol. 78, No. 3. – P. 327–334. 3. Моспан, Ю. М. Итоги внедрения трехступенчатого сжигания топлива на котле ТПП-312 Ладыжинской ГРЭС [Текст] / Ю. М. Моспан, В. Г. Лисовой // Первая американо-украинская конференция: «Защита атмосферного воздуха от вредных выбросов ТЭС»: сб. докладов. – Киев, 1996. – С. 84–88. 4. Кобзар, С. Г. Визначення зон підвищеної ерозії топкових екранів в залежності від режиму навантаження котлоагрегату ТПП-312 Ладижинської ТЕС [Текст] / С. Г. Кобзар, А. А. Халатов // Пром. теплотехника. – 2011. – Т. 33, № 4. – С. 55–62. 5. Кобзарь, С. Г. Аprobация упрощенной модели расчета горения и формирования оксидов азота при сжигании жидкого топлива [Текст] / С. Г. Кобзар, А. А. Халатов // Пром. теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 3. – С. 62–69.

Bibliography (transliterated): 1. Smoot, L. D., S. C. Hill and H. Xu "NO_x 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. Mospan, Ju. M., and V. G. Lisovoj. "Itogi vnedrenija trehstupenchatogo szhiganiya topliva na kotle TPP-312 Ladyzhinskoj GRJeS." *Pervaja amerikano-ukrainskaja konferencija: "Zashhita atmosfernogo vozduha ot vrednyh vybrosov TJeS"*. Kiev, 1996. 84–88. Print. 4. Kobzar, S. G., and A. A. Halatov. "Vyznachennja zon pidvyshhenoi' erozii' topkovykh ekraniv v zalezhnosti vid rezhymu navantazhennja kotloagregatu TPP-312 Ladyzhyns'koi' TES." *Prom. teplotehnyka*. 33.4 (2011): 55–62. Print. 5. Kobzar', S. G., and A. A. Halatov. "Aprobacija uproshhennoj modeli rascheta gorenija i formirovanija oksidov azota pri szhiganii zhidkogo topliva." *Prom. teplotehnika* 28.3 (2006): 62–69. Print.

Надійшла (received) 10.02.2014