

УДК 621.18-5

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗНИЖЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ВДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ ТРИСТУПЕНЕВОГО СПАЛЮВАННЯ ВУГІЛЛЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ВУГІЛЛЯ В ЯКОСТІ ПАЛИВА ДОПАЛЕННЯ

Кобзар С.Г., канд. техн. наук, Халатов А.А., академік НАН України

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2 а, Київ, 03680, Україна

Проведено дослідження впливу застосування низькорекційного палива відновлення вугільного пилу на одночасний перебіг процесів відновлення оксидів азоту за механізмами Reburning та селективного некаталітичного відновлення. Дослідження показало можливість знизити викиди оксидів азоту до 80 % порівняно зі одноступеневим спалюванням вугілля.

Проведено исследование влияния применения низькорекционного топлива дожигания угольной пыли на одновременное протекание процессов восстановления оксидов азота согласно механизмам Reburning и селективного некаталитического восстановления. Исследование показало возможность снизить выбросы оксидов азота до 80 % по сравнению с одностадийным сжиганием угля.

The investigation of the influence of the low reactivity reburning fuel coal dust on the simultaneous processes of the nitrogen oxides reduction in accordance with the mechanisms Reburning and selective non-catalytic reduction was carried out. The study showed the possibility to reduce the nitrogen oxides emissions up to 80 % compared with single-stage coal combustion.

Бібл. 8, табл. 3, рис. 3.

**Ключові слова:** горіння вугілля, математичне моделювання, оксиди азоту.

$P$  – абсолютний тиск;  
 $R$  – універсальна газова стала;  
 $T$  – абсолютна температура;  
 $x, y, z$  – координатні осі;  
 $Y_i$  – масова концентрація;  
 $[Y_i]$  – молярна концентрація;

### Скорочення:

ВМТС – вдосконалений метод триступеневого спалювання;  
 СНКВ – селективне некаталітичне відновлення;  
 ТЕС – теплова електрична станція.

**Вступ.** При спалюванні твердого палива одним з методів зниження викидів оксидів азоту, є *метод триступеневого спалювання вугілля*. При реалізації даного методу витрату палива розділяють не менш ніж на два потоки: перший (80 % по теплу) подається в основні пальники з робочим надлишком повітря; другий (решта вугілля) подається в додаткові пальники, розташовані вище основних пальників, з кількістю повітря нижче від стехіометричного значення. Завдяки цьому утворюється зона відновлення оксидів азоту до молекулярного азоту, що призводить до зниження емісії приблизно на 50 %. Решта необхідного для повного спалювання палива повітря подається у сопла допалювання, які розташовані вище над додатковими пальниками. Перша в Україні система триступеневого спалювання вугілля, яка використовує в якості палива допалювання вугільний пил, змонтована на блоці №6 ДТЕК Ладизинська ТЕС. Результати проведених в ІТТФ НАН України досліджень показали, що є можливість забезпечити 55...60 % зниження емісії оксидів азоту при задовільних втратах палива від недопалу та температурі біля поверхонь системи підвісних ширм [1]. В залежності від навантаження блоку, така ефективність системи забезпечить значення емісії оксиду азоту на рівні 250...340 мг/м<sup>3</sup>, що впритул наближає до нормативів ЄС. Встановлено, що при експлуатації системи ступеневого спалювання вугілля, для забезпечення умов рідкого шлаковидалення, не рекомендується навантаження котлоагрегату менше

за 210 МВт<sub>г</sub>, для недопущення шлакування ширм максимальне навантаження повинно становити не більше 280 МВт<sub>г</sub>.

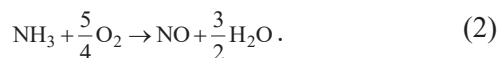
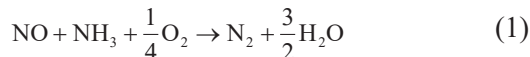
Для того щоб задовольнити вимоги по емісії оксидів азоту у 200 мг/м<sup>3</sup>, необхідно залучати додаткові методи відновлення оксидів азоту. Одним з перспективних шляхів підвищення ефективності системи триступеневого спалювання вугілля є поєднання її з технологією селективного некаталітичного відновлення (СНКВ). Таке поєднання технологій прийнято називати *вдосконаленим методом триступеневого спалювання* (ВМТС).

Для визначення оптимальних параметрів системи вдосконаленого триступеневого спалювання вугілля, які забезпечують максимальне зниження викидів оксидів азоту в атмосферу, доцільно використовувати методи комп'ютерного моделювання, які характеризуються високою надійністю та інформативністю.

**Метою роботи** є верифікація програмного комплексу для розрахунку процесів відновлення оксидів азоту при вдосконаленому методі триступеневого спалювання вугілля та оцінка ефективності вдосконаленого методу триступеневого спалювання вугілля при використанні низько реакційного палива допалювання вугільного пилу.

**Метод селективного некаталітичного відновлення оксидів азоту.** Метод СНКВ концептуально простий процес відновлення оксидів азоту, який полягає в подачі та перемішуванні відповідного хімічного реа-

генту у потік димових газів, що містить оксиди азоту при температурі димових газів 850...1175 °С. Внаслідок протікання швидкої газозфазної реакції в присутності надлишку кисню, який як правило присутній в топці котла, реагент селективно відновлює оксид азоту залишаючи концентрацію кисню не змінною. Метод СНКВ привабливий через його простоту, не потребує дорогих каталізаторів, легко встановлюється на діючому обладнанні, може бути застосований на всіх типах стаціонарних котлів. Крім того впровадження методу СНКВ потребує малих капітальних та експлуатаційних витрат, метод майже не чутливий до концентрації попелу у димових газах та може комбінуватися з іншими методами контролю викидів оксидів азоту. В більшості випадках реалізації методу СНКВ на котлах, в якості реагенту відновника використовують аміак чи карбамід (мочевина) [2]. В роботі [3] був запропонований спрощений двостадійний механізм процесу СНКВ (рис. 1). Згідно з даним механізмом, після єдиної ініціалізації слідує дві паралельні реакції: одна (1) призводить до відновлення оксиду азоту, інша (2) до утворення оксиду азоту.



Результати експериментальних та промислових досліджень, показали що за допомогою методу СНКВ можливо досягти від 50 до 95 відсотків зниження оксидів азоту. На ефективність методу СНКВ сильно впливають наступні фактори: температурне вікно; концентрація кисню в димових газах; молярне відношення  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$ ; вміст сірки в димових газах.

**Вдосконалений метод триступеневого спалювання вугілля.** На відміну від звичайного методу триступеневого спалювання вугілля, ВМТС поєднує в собі два методи контролю утворення оксидів азоту: звичайний метод триступеневого спалювання (Reburning) та метод селективного некаталітичного відновлення. При організації ВМТС, реагент що містить сполуки аміаку такі як аміак чи карбамід, вводиться в збагачену паливом зону або в збіднену паливом зону допалення. Технологія ВМТС потенційно може забезпечити зниження оксидів азоту до 90 % та може бути впроваджена при модернізації діючого обладнання. Проблеми пов'язані з модернізацією діючого обладнання такі, як втрати палива від недопалу, шлакування та забруднення

поверхонь труб, при впровадженні технології ВМТС в більшості випадків можуть бути вирішені. На відміну від звичайного методу СНКВ, технологія ВМТС менш чутлива до вибору місця вводу реагенту-відновника, тому що оптимальне температурне вікно для відновлення аміновмісним реагентом розширюється внаслідок присутності СО після зони відновлення.

Технологія ВМТС експериментально досліджувалася в роботі [4]. Було отримано, що вміст легких у вугіллі та частки палива, що йде на допалювання, мають вирішальне значення для забезпечення найкращого режиму роботи вдосконаленого методу триступеневого спалювання вугілля і тому дана технологія гнучка та може забезпечити потрібний рівень емісії оксидів азоту.

**Верифікація програмного комплексу.** Для дослідження процесів утворення оксидів азоту при спалюванні вугілля використовувався програмний комплекс та модель горіння вугілля, яка була розроблена раніше [5 – 6]. Для розрахунку емісії оксидів азоту в атмосферу при спалюванні вугілля використовувалися стандартні моделі утворення оксидів азоту які дозволяють розраховувати утворення оксидів азоту за наступними механізмами: термічний; Prompt та паливний. Для виявлення ефекту відновлення оксидів азоту при триступеневому спалюванні додатково використовувався Reburning механізм.

Для врахування хімічної кінетики методу СНКВ було вирішено використати спрощений двостадійний механізм [3], який представлений хімічними реакціями (1) та (2).

Проведений аналіз літературних джерел показав, що для визначення швидкості реакцій (1) та (2) доцільно використовувати данні роботи [7], згідно якої кінетичну швидкість реакції (1) можна визначити за формулою

$$k_1 = 4,24 \times 10^2 T^{5,3} e^{-E_1/RT} \left( \frac{M^3}{\text{моль} \cdot \text{с}} \right), \quad (3)$$

де  $E_1 = 349937,06$  Дж/моль. Кінетичну швидкість реакції (2) можна визначити за наступним виразом

$$k_2 = 0,35 T^{7,65} e^{-E_2/RT} \left( \frac{M^3}{\text{моль} \cdot \text{с}} \right), \quad (4)$$

де  $E_2 = 524487,005$  Дж/моль.

Використовуючи вирази (3) та (4), реакції були додані до модулю розрахунку оксидів азоту.

Для верифікації програмного комплексу були

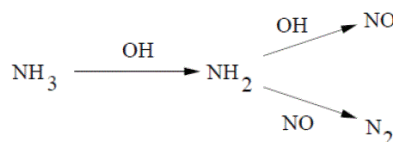


Рис. 1. Спрощений механізм процесу СНКВ.

вибрані експериментальні данні роботи [8]. Експериментальна установка для вивчення процесу утворення та відновлення оксидів азоту підчас спалювання вугілля представлена на рис. 2. Дослідна установка має максимальну теплову потужність 200 кВт, представляє собою циліндричну камеру внутрішнім діаметром 750 мм та довжиною 2,4 м. Пальник оснащений цен-

тральною трубкою для подачі вугілля та первинного повітря діаметром 2,54 см та вихровим завихрювачем, який має змінні блоки завихрювачів з геометричним значенням числа завихрення 0,5 та 1,5. При проведенні досліджень використовувалось вугілля, склад якого наведений в табл. 1.

Таблиця 1. Склад вугілля

Технічний аналіз					
склад	Волога, %	Зола, %	Леткі, %	Вуглець, %	Q, МДж/кг
	25,3	5,1	34,0	35,6	20,83
Горюча маса					
склад	C, %	H, %	N, %	S, %	O, %
	53,32	3,47	0,74	0,36	11,74

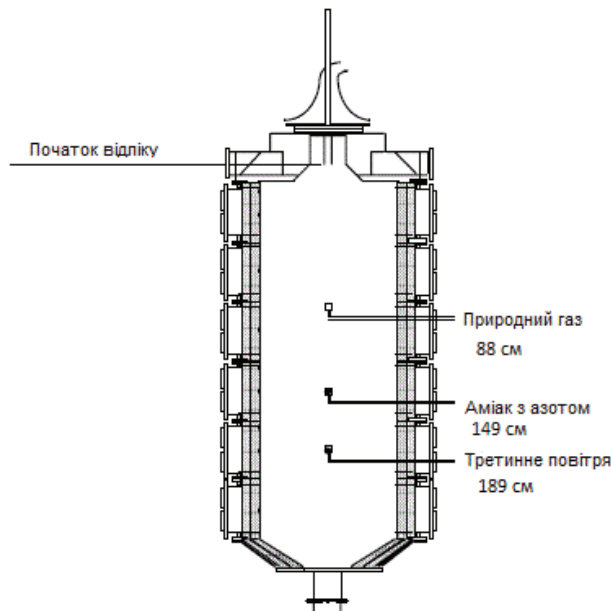


Рис. 2. Схема дослідної установки для вивчення вдосконаленого методу тріступеневого спалювання вугілля.

Комп'ютерна модель дослідної установки (рис. 2) була побудована в препроцесорі пакету прикладних програм. Так як геометрія вісесиметрична відносно вісі Z, геометрія для зменшення витрат машинного часу була зроблена у вигляді сектору у 360. На бічних поверхнях задавалися циклічні граничні умови. Побудована розрахункова сітка складалася з 122981 призматичних елементів та містила 460767 ефективних вузлів. Для врахування теплообміну, на границях розрахункової області було зроблено згущення у 10 чарунок.

Для замкнення рівнянь Нав'є-Стокса використовувалася RNG k-ε модель турбулентності. Радіаційний теплообмін враховувався за допомогою моделі P1. Транспорт часток вугілля розраховувався за допомогою методу Лагранжа.

Програма тестування програмного комплексу з

удосконаленим модулем розрахунку утворення оксидів азоту складалася з трьох варіантів спалювання вугілля: одноступеневе спалювання вугілля; тріступеневе спалювання вугілля з паливом допалювання природний газ та ВМТС вугілля з паливом допалювання природний газ та реагентом-відновником аміаком. Для тестування були взяті експериментальні результати роботи [8]. Теплова потужність дослідної установки складала 150 кВт. Геометричний параметр завихрення вторинного повітря становив 0,5. Загальний надлишок повітря складав 1,1. При тріступеновому спалюванні вугілля та ВМТС кількість палива, що йшло на допалювання складало 10 % теплової потужності установки, надлишок повітря в основному пальнику становив 1,1, а решта повітря подавалося в сопло третинного повітря, яке було розташовано на вісі камери згоряння. При дослідженні ВМТС

додатково подавався реагент відновник аміак, який подавався у вигляді суміші аміаку з азотом з молекулярним відношенням  $NH_3/N_2=1/3$ . Витрата даної суміші складала 0,65 кг/год.

Ефективність зниження оксидів азоту методом ВМТС визначалася за формулою:

$$\Delta NO = \frac{NO_B - NO_{AR}}{NO_B} \times 100\%, \quad (5)$$

де  $NO_B$  – масова концентрація оксидів азоту на виході з камери згоряння при звичайному спалюванні вугілля;  $NO_{AR}$  – масова концентрація оксидів азоту на виході з камери згоряння при вдосконаленому методі триступеневого спалювання вугілля.

Результати верифікації програмного комплексу показали:

- Розподіл температури має добре узгодження з експериментальними даними;
- Концентрація оксидів азоту на виході тестової геометрії при одноступеневому спалюванні вугілля визначається з точністю 25 %;
- Відносна ефективність вдосконаленого методу триступеневого спалювання вугілля визначається з похибкою 6 %.

**Дослідження ефективності зниження оксидів азоту при застосуванні вдосконаленого методу триступеневого спалювання вугілля.** Для розробки технології вдосконаленого триступеневого спалювання вугілля на котлі ТПП 312 необхідно провести дослідження впливу застосування низько реакційного палива відновлення (вугільний пил) на одночасний перебіг процесів відновлення оксидів азоту за механізмами Reburning та СНКВ. В якості об'єкту дослідження використовувалася модель камери згоряння тестової геометрії на якій проводилася верифікація програмного комплексу. Вихідні данні були прийняті аналогічні роботі [8]. Зміни стосувалися палива відновника, який був прийнятий вугіллям однакового фракційного складу з основним потоком палива. Транспортування вугільного пилу на допалювання забезпечувалося димовими газами у кількості рівній масі вугілля, яке йшло на допалювання. До розгляду були прийняті технології відновлення оксидів азоту – триступеневе спалювання вугілля та метод вдосконаленого тристу-

пеневого спалювання вугілля. Отримані результати порівнювалися з одноступеневим спалюванням вугілля.

Аналіз результатів для одноступеневого спалювання показує, що процес горіння завершується на відстані 1,2...1,3 м від зрізу пальника. До цієї зони завершуються всі процеси окислення компонентів палива та утворення оксидів азоту, далі за потоком проходить виключно транспорт утворених компонентів.

При спалюванні вугілля за триступеневою схемою, внаслідок подачі палива допалювання вугільного пилу, утворюється збагачена паливом зона відновлення. Зона відновлення знаходиться в діапазоні 0,4...0,8 м від зрізу пальника. Подача палива допалювання знаходиться на відстані 0,88 м від зрізу пальника, а паливо допалювання подається під кутом  $70^\circ$  до вісі камери. Для початку формування зони відновлення потрібен деякий час, на відміну від випадку коли в якості палива допалювання використовується природний газ. Результати наведені на рис. 3 показують, що після активної фази відновлення, спостерігається подальше зменшення концентрації оксидів азоту до відмітки 1,89 м від зрізу пальника, що пов'язано з подальшим процесом відновлення оксидів азоту вуглеводневими радикалами та процесами перемішування потоків з різною концентрацією оксидів азоту. Після подачі третинного повітря на відмітці 1,89 м, проходить допалювання вуглеводнів, що призводить до підвищення температури та утворення оксидів азоту у незначній кількості.

При спалюванні вугілля методом вдосконаленого триступеневого спалювання до відмітки 1,49 м де організована подача реагенту відновника – аміаку, процеси утворення та відновлення оксидів азоту ідентичні випадку триступеневого спалювання вугілля. Після подачі аміаку починають діяти механізми відновлення оксидів азоту за схемою селективного некаталітичного відновлення. Зона дії селективного некаталітичного відновлення закінчується на відмітці 1,89 м де виконується подача третинного повітря. Після подачі третинного повітря проходить допалювання вуглеводнів, що призводить до підвищення температури та утворення оксидів азоту у незначній кількості. Ця кількість менша ніж при триступеневому спалюванні вугілля. Вплив способу спалювання вугілля на концентрацію оксидів азоту на вісі камери згоряння наведені на рис. 3.

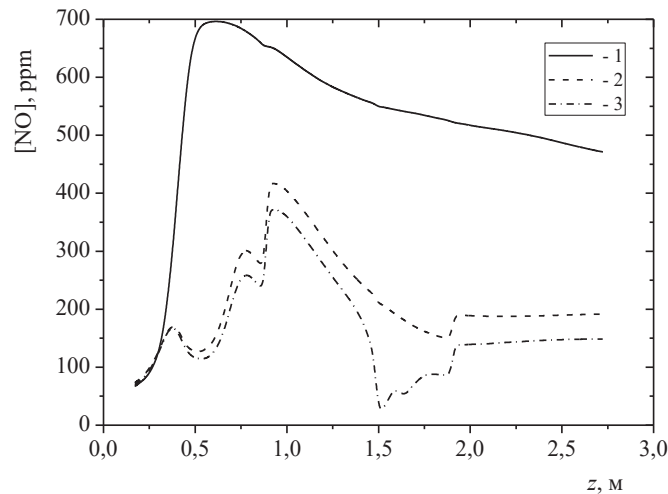
Таблиця 2. Ефективність зниження оксиду азоту

	Концентрація NO на виході, ppm	Ефективність методу $\Delta NO$ , %
Одноступеневе спалювання	500	
Триступеневе спалювання вугілля	181	63
Вдосконалений метод триступеневого спалювання вугілля	143	71

Таблиця 3. Залежність концентрації аміаку на виході з камери згоряння від типу палива відновника

Паливо відновник	Концентрація аміаку на виході, ppm
Природний газ	1,11
Вугілля	3,5





**Рис. 3. Розподіл концентрації оксидів азоту по висоті камери згоряння:**  
 1 – одноступеневе спалювання вугілля; 2 – триступеневе спалювання вугілля;  
 3 – вдосконалене триступеневе спалювання вугілля.

В таблиці 2 приведені розрахунки ефективності зниження оксидів азоту методами триступеневого спалювання вугілля та ВМТС вугілля при використанні в якості палива допалювання вугільного пилу. Ефективність методів оцінювалася за допомогою формули (5). Отримані результати показують, що подача реагенту відновника (аміаку) дозволяє підвищити ефективність триступеневого спалювання вугілля на 8 відсотків при незначній концентрації аміаку на виході з камери згоряння (Табл. 3).

Слід відмітити, що використання в якості палива допалювання вугільного пилу на відміну від випадку, коли в якості останнього використовується високо реакційне паливо (природний газ), знижує ефективність відновлення оксидів азоту при використанні ВМТС вугілля на 7 відсотків: 78,4 % при використанні природного газу проти 71 % при використанні вугільного пилу. Даний факт перш за все пов'язаний з меншою реакційною спроможністю вугілля та наявності паливного азоту в вугіллі, що йде на допалювання. Підвищення концентрації аміаку на виході з камери згоряння при використанні вугілля в якості палива допалювання пов'язано з незадовільними умовами для перемішування реагенту відновника з продуктами згоряння після введення палива допалювання.

Подальше підвищення ефективності зниження оксидів азоту вдосконалим методом триступеневого спалювання з паливом допалювання вугілля можливо шляхом підвищення утилізації реагенту-відновника. Це можливо шляхом оптимізації введення реагенту-відновника з метою забезпечення кращого перемішування. Підвищення ступеню відновлення оксидів азоту також можливо при застосуванні для допалювання вугільного пилу більш дрібної фракції ніж вугілля, що йде на основний палик.

### Висновки

1. Проведене дослідження впливу застосування низько реакційного палива відновлення вугільного пилу на одночасний перебіг процесів відновлення оксидів азоту за механізмами Reburning та селективного некаталітичного відновлення показало можливість підвищити ступінь зниження оксидів азоту до 80 % порівняно зі звичайним процесом спалювання вугілля.

2. При застосуванні вдосконаленого методу триступеневого спалювання вугілля з паливом допалювання вугільний пил слід особливо увагу приділяти умовам перемішування продуктів згоряння з реагентом відновником та фракційному складу вугілля, що йде на допалювання.

Робота виконана за цільовою програмою наукових досліджень НАН України «Науково-технічні основи енергетичного співробітництва між Україною та Європейським Союзом» (Об'єднання-3).

### Література

1. Кобзар С. Г., А. А. Халатов А. А. Ефективність зниження викидів оксидів азоту системою ступеневого спалювання вугілля котла ТПП-312 БЛОКУ № 6 ДТЕК Ладизинська ТЕС на основних режимах навантаження // Вісник НТУ «ХП»: Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». – 2015. – №17. С. 34–39.
2. Javed M.T., Irfan N., Gibbs B.M. Control of combustion-generated nitrogen oxides by selective non-catalytic reduction// Journal of Environment Managment. – v.83. – 2007. – p. 251 – 289.
3. Ostberg M., Dam-Johansen K. Empirical Modeling of the Selective Non-Catalytic Reduction of NO Comparison with Large-Scale Experiments and Detailed Kinetic Modeling// Chem. Engineering Science. – 49(12). – 1994. – p. 1897–1904.

4. *Hampartsoumian E., Folyan O.O., Nimo W., Gibbs, B.M.* Optimisation of NO<sub>x</sub> reduction in advanced coal reburn systems and the effect of coal type// *Fuel*. – 82, 2003. – p. 373–384.

5. *Кобзар С.Г., Халатов А.А.* Визначення ефективності зниження викидів оксидів азоту системою ступеневого спалювання вугілля котла ТПП-312 блоку №6 ДТЕК Ладижинська ТЕС // *Вісник НТУУ ХПІ*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування.– 2014. – №13(1056). – С.85–91.

6. *Кобзар С.Г., Халатов А.А.* Кінетична модель утворення сірководню в топках котлів ТЕС при спалюванні

вугілля, що містить сірку // *Промышленная теплотехника*. – 2014. – Т.36 – №.3. – С.5–19

7. *Brouwer J., Heap M. P., Pershing D.W., Smith P. J.* A Model for Prediction of Selective Non-Catalytic Reduction of Nitrogen Oxides by Ammonia, Urea, and Cyanuric Acid with Mixing Limitations in the Presence of CO// In 26th Symposium (Int'l) on Combustion. The Combustion Institute. 1996.

8. *Tree D.R., Clark A.W.* Advanced reburning measurements of temperature and species in a pulverized coal flame// *Fuel*. – vol. 79. – 2000. – pp. 1687 – 1695.

### THE INVESTIGATION OF THE EFFICIENCY OF THE NITROGEN OXIDES REDUCTION BY ADVANCED REBURNING METHOD APPLICATION WITH THE COAL DUST AS A REBURNING FUEL

**Kobzar S.G., Khalatov A.A.**

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

The investigation of the influence of the low reactivity reburning fuel coal dust on the simultaneous processes of the nitrogen oxides reduction in accordance with the mechanisms Reburning and selective non-catalytic reduction was carried out. The study showed the possibility to reduce the nitrogen oxides emissions up to 80% compared with single-stage coal combustion.

References 8, tables 3, figures 3.

**Key words:** coal combustion, CFD, nitrogen oxides.

1. *Kobzar S. G., Khalatov A. A.* Efficient reduction of nitrogen oxide emissions using the phasic coal firing system of the TPP 312 boiler used by the block No6 of Ladyzhinskaia power station under basic load conditions, *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2015, № 17(1126), P. 34–39. (Ukr.)

2. *Javed M.T., Irfan N., Gibbs B.M.* Control of combustion-generated nitrogen oxides by selective non-catalytic reduction, *Journal of Environment Manegment*,

v.83, 2007, p. 251 – 289.

3. *Ostberg M., Dam-Johansen K.* Empirical Modeling of the Selective Non-Catalytic Reduction of NO Comparison with Large-Scale Experiments and Detailed Kinetic Modeling, *Chem. Engineering Science*, 49(12), 1994, p. 1897–1904.

4. *Hampartsoumian E., Folyan O.O., Nimo W., Gibbs, B.M.* Optimisation of NO<sub>x</sub> reduction in advanced coal reburn systems and the effect of coal type, *Fuel*, 82, 2003, p. 373–384.

5. *Kobzar S.G., Khalatov A.A.* Determining the efficiency of the reduction of nitrogen oxide emissions using the system of phasic coal combustion of the TPP-312 boiler, block No 6 of DTEK Ladyzhinskaia thermal power station, *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*. Kharkiv, NTU "KhPI", 2014, № 13(1056), P. 85–91. (Ukr.)

6. *Kobzar S.G., Khalatov A.A.* Kinetic model of hydrogen sulphide formation in boilers furnaces of the thermal power plants in combusting sulfur-containing coal, *Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]*, 2014, V. 36, №.3, P.5–19 (Ukr.)

7. *Brouwer J., Heap M. P., Pershing D.W., Smith P. J.* A Model for Prediction of Selective Non-Catalytic Reduction of Nitrogen Oxides by Ammonia, Urea, and Cyanuric Acid with Mixing Limitations in the Presence of CO, In 26th Symposium (Int'l) on Combustion. The Combustion Institute. 1996.

8. *Tree D.R., Clark A.W.* Advanced reburning measurements of temperature and species in a pulverized coal flame. *Fuel*, vol. 79, 2000, p. 1687 – 1695.

Получено 12.04.2017

Received 12.04.2017