

УДК 621.18-5

# ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ REBURNING З ПРОДУКТАМИ ПІРОЛІЗУ БІОМАСИ В ЯКОСТІ ПАЛИВА ДОПАЛЕННЯ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ЕМІСІЇ ОКСИДІВ АЗОТУ ВІД КОТЛА ТПП 312

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

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2021.10>

Проведено дослідження роботи системи тристадійного спалювання вугілля, яка змонтована на блоці №4 ДТЕК Ладизинська ТЕС, на проектних параметрах роботи для навантаження котла 280 МВт. Встановлено, що подача палива допалення обсязі 12% від загальної теплової потужності котла дає добрий рівень зниження оксидів азоту (до 25%), забезпечує умову відсутності шлакування труб ширмового пароперегрівника та не призводить до зростання втрат палива від хімічного та механічного недопалу.

Проведено исследование работы системы трехстадийного сжигания угля, которая смонтирована на блоке №4 ДТЕК Ладизинская ТЭС, на проектных параметрах работы для нагрузки котла в 280 МВт. Установлено, что подача топлива дожигания в объеме 12% от общей тепловой мощности котла дает хороший уровень снижения оксидов азота (до 25%), обеспечивает условие отсутствия шлакования труб ширмового пароперегревателя и не приводит к росту потерь топлива от химического и механического недожога.

The study of the operation of the Reburning coal combustion system, which was mounted on the unit №4 DTEK Ladyzhynska TPP, on the design parameters for the operation for the boiler load of 280 MW, was carried out. It is established that the supply of reburning fuel at 12% of the total heat capacity of the boiler gives a good level of the reduction of nitrogen oxides (up to 25%), provides no slag conditions for superheater pipes and does not lead to increase of the fuel losses with unburnt carbon.

Бібліографія 6, табл. 2, рис. 3.

**Ключові слова:** біомаса, піролізні гази, спалювання вугілля, оксиди азоту, відновлення оксидів азоту.

$T$  – температура;

$[Y_i]$  – масова концентрація компоненти.

**Скорочення:**

ШПП – ширмовий пароперегрівач.

Зниження викидів шкідливих речовин від ТЕС є однією з актуальних задач сьогодення. Одним з можливих шляхів зниження викидів оксидів азоту від пилувугільного котла ТПП 312 є використання технології Reburning з продуктами піролізу біомаси в якості палива допалення. Як приклад може бути взято котел ТПП 312 енергоблоку №4 ДТЕК Ладизинська ТЕС зі змонтованою системою спалювання вугілля за технологією Reburning, яка розрахована на використання природного газу в якості палива допалення та не використовується на теперішній час через ліміти на використання природного газу. В роботі розглянуто перспективи використання продуктів піролізу біомаси в якості палива допалення для відновлення оксидів азоту за технологією Reburning на прикладі пилувугільного котла ТПП 312.

Система триступеневого спалювання вугілля (Reburning) була змонтована на типовий проект котла ТПП 312, під час його реконструкції. Вертикальна компоновка котла ТПП 312 блоку №4 ДТЕК Ладизинська ТЕС після реконструкції наведена на рис.1. Система

розрахована на спалювання вугілля в основних пальниках в обсязі 88% теплової потужності котла з надлишком повітря 1,05. Відновлювальна зона утворюється додатковими пальниками, в які подається природний газ разом з димовими газами. Природний газ подається у кількості 12% теплової потужності котла.

В результаті реконструкції для організації зони відновлення, на відмітці 20,3 м були змонтовані додаткові пальники для подачі палива. Додаткові пальники мають круглий перетин  $\varnothing 0,3$  м, які встановлені під горизонтальним кутом  $20^\circ$ . На фронті та тилу котла змонтовано по 10 додаткових пальників. Природний газ подається у додаткові пальники, де змішується з димовими газами рециркуляції. На фронті та на тилу котла, для організації зони допалення, на відмітці 27,6 м встановлено сопла третинного повітря. Кожна сторона має по десять сопел прямокутного перетину  $0,3 \times 0,3$  м, які встановлені під горизонтальним кутом  $15^\circ$ . Проектний коефіцієнт надлишку повітря за топкою котла становить 1,2. Загальний об'єм газів рециркуляції прийнято 18%,

з яких 7,5 % подаються у додаткові пальники, 5,5 % у верхні сопла рециркуляції димових газів на тилу котла, а 5% на пилосистему [1]. В процесі реконструкції котла на тилувій стінці був виконаний аеродинамічний виступ, в якому розташовані 5 сопел рециркуляції димових газів.

Котли ТПП 312 на Ладизинській ТЕС працюють на вугіллі марок Г та ДГ. Осереднені характеристики вугілля наведені в роботі [2-3]. Для помелу вугілля використовуються кульові барабанні млини (КБМ). Результати аналізу вугільного пилу, що йде на спалювання, на ситах з чарункою 90 мкм та 200 мкм, дали наступні результати  $R_{90} = 30\%$ ,  $R_{200} = 4\%$ . Використовуючи ці результати було отримано розподіл Розіна-Раммлера:

$$R_x = \exp\left(-\left(\frac{d}{7,4}\right)^{1,3}\right).$$

Еквівалентний діаметр часточки, який характеризує дану суміш складає 45,58 мкм.

Дослідження було виконано за допомогою пакета прикладних програм *Ansys CFX*, з адаптованою моделлю горіння вугілля. Модель горіння була розроблена та пройшла верифікацію в попередніх дослідженнях. Детальний опис моделі горіння вугілля та конструкції стандартного котла наведені в роботах [2 – 5].

Для виявлення впливу конструктивних та експлуатаційних параметрів на екологічні та технічні характеристики котла ТПП 312 була реалізована наступна програма розрахунків:

- Варіант №1 – Стандартний котел ТПП 312 ;
- Варіант №2 – Котел ТПП 312 зі змонтованою системою триступеневого спалювання, що працює в режимі пиловугільного котла з відключеною системою Reburning;
- Варіант №3 – Котел ТПП 312 зі змонтованою системою триступеневого спалювання, що працює з системою Reburning з природним газом в якості палива допалення;
- Варіант №4 – Котел ТПП 312 зі змонтованою системою триступеневого спалювання, що працює з системою Reburning з продуктами піролізу біомаси в якості палива допалення;

Всі розрахунки були виконані для навантаження 280 МВт та сумарного надлишку повітря 1,15. Для всіх розрахунків витрата у верхні сопла рециркуляції димових газів на тилу котла була однаковою та складала 5,5 % загальної витрати димових газів. Температура газів рециркуляції приймалася 380 °С. Склад димових газів (масова доля) приймався наступним:  $\text{CO}_2 = 0,18804$ ;  $\text{H}_2\text{O} = 0,167$ ;  $\text{O}_2 = 0,06496$ ;  $\text{N}_2 = 0,58$ .

При моделюванні стандартного котла (Варіант 1) та котла з відключеною системою триступеневого спалювання (Варіант 2), вся витрата вугілля та повітря подава-

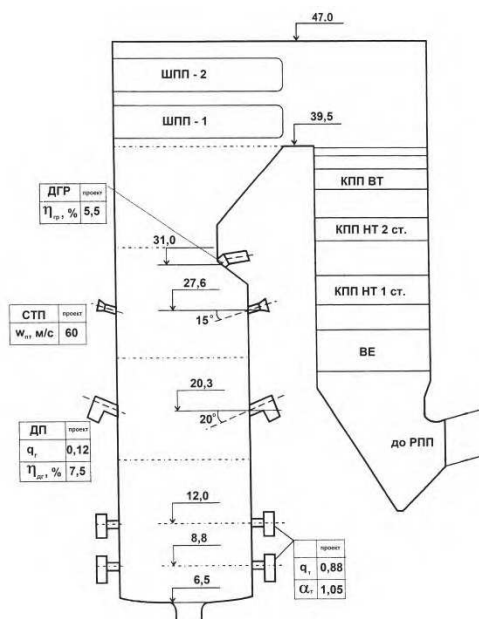


Рис. 1. Вертикальна компоновка котла ТПП 312 з системою триступеневого спалювання блоку № 4 Ладизинська ТЕС [1]

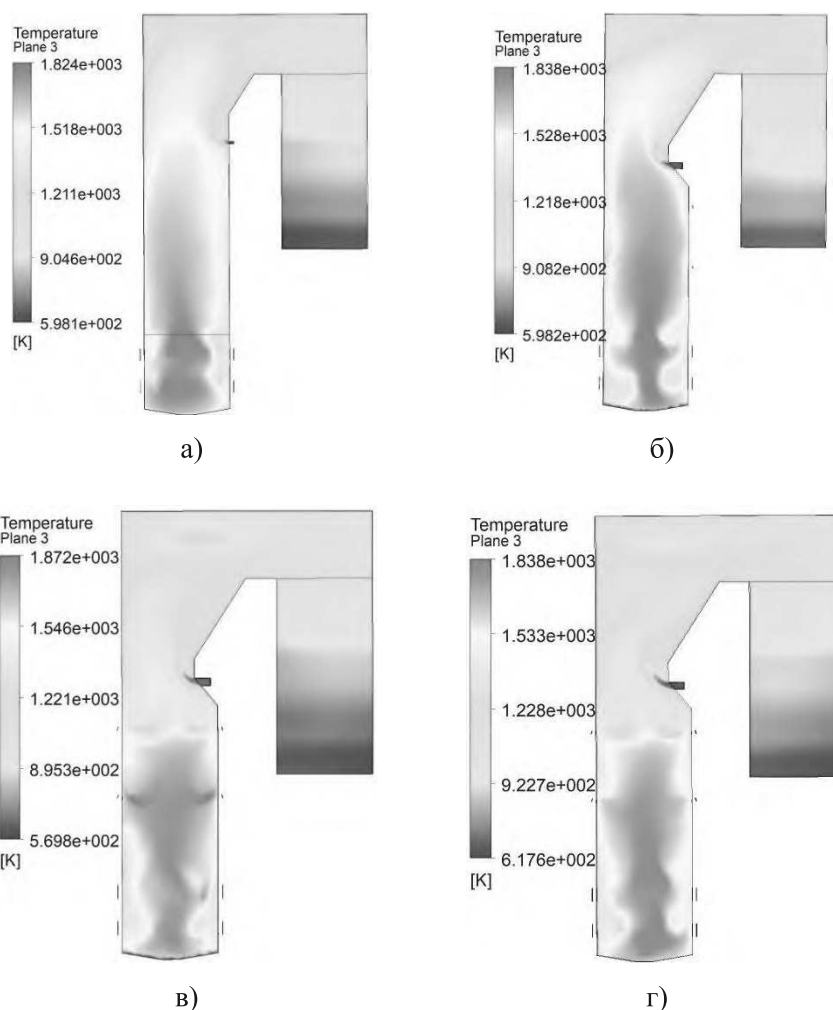
лися у основні пальники. Робота системи *Reburning* моделювалася шляхом розділення витрати палива на два потоки: в основні пальники подавалася витрата вугілля в еквіваленті теплової потужності 88% при надлишку повітря 1,05, а у додаткові пальники подавалася суміш природного газу з димовими газами (Варіант 3) чи суміш піролізних та димових газів (Варіант 4). Теплова потужність палива, що подавався у додаткові пальники в обох випадках складала 12% від загальної теплової потужності котла. При використанні в якості пали-

ва допалення природного газу було прийнято, що він складається тільки з метану. Склад піролізних газів був взятий з результатів попередніх досліджень [6] з припущенням, що всі вуглеводні представлені еквівалентною кількістю (масова частка) метану. Склад суміші, що подавалася у в додаткові пальники в залежності від виду палива допалення наведений в таблиці 1.

Для Варіанту №3 сумарна витрата крізь додаткові пальники складала 33,4533 кг/с, з них 1,81 кг/с - метан з теплотою згоряння 50,1 МДж/кг. Для Варіанту №4

Таблиця 1. Склад суміші, що подавався у в додаткові пальники в залежності від виду палива допалення

Варіант №	T, K	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>
3	663	0,17786	0,15796	0,06144	0,54861	0,05413	0,0	0,0
4	663	0,1938	0,144	0,0478	0,5183	0,0211	0,0739	0,0011



**Рис. 2. Температурне поле на осі котла ТПП 312: а) стандартний котел; б) – г) котел з системою тріступеневого спалювання: б) – котел з відключеною системою; в) – в якості палива допалення використовується природний газ; г) – в якості палива допалення використовуються продукти піролізу біомаси**

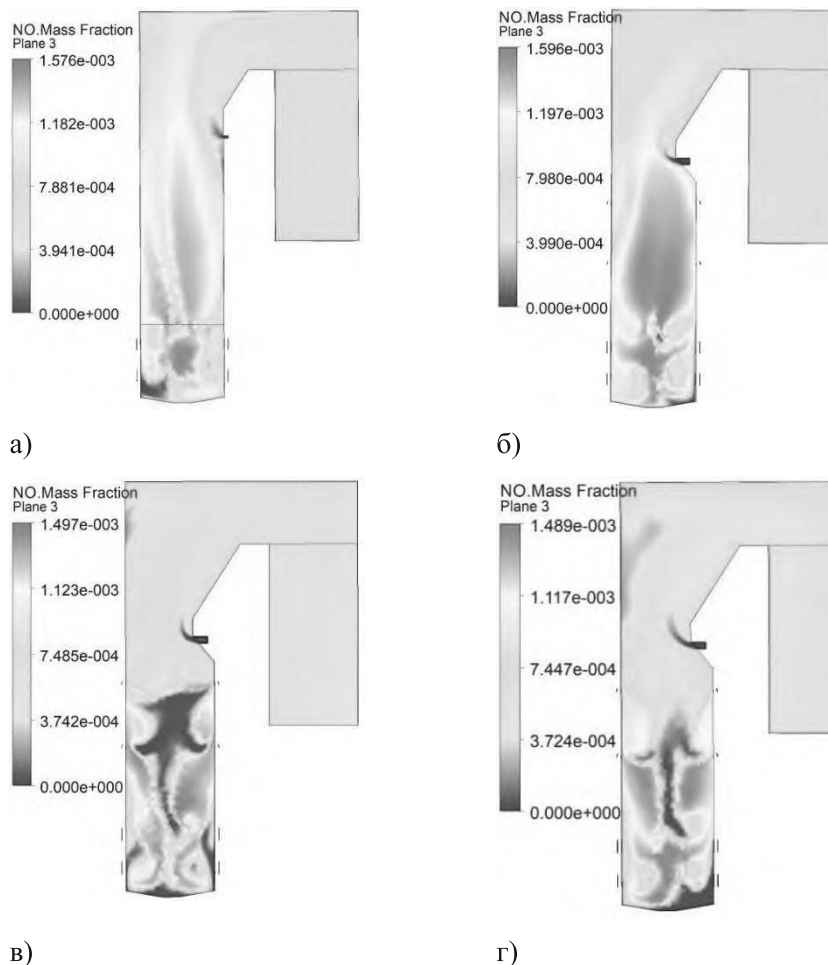
сумарна витрата крізь додаткові пальники складала 42,983 кг/с, з них 11,34 кг/с - піролізні гази з теплою згоряння 8 МДж/кг.

Для моделювання горіння метану та піролізного газу використовувався триступеневий механізм горіння метану, який показав гарні результати при тестуванні [6].

Результати розрахунків температурного поля для базової конструкції котла ТПП 312 (рис. 2, а) показують, що максимальна температура знаходиться в межах запального поясу, після запального поясу факел займає майже всю ширину топки. В горі топки, внаслідок підмішування димових газів рециркуляції максимум температури зміщується до фронту котла. Максимальне значення температури в перетині перед ШПП I ст. становить 1399 К (див. Табл. 2), що менше температури розм'ягчення попелу, що забезпечує умову відсутності шлакування труб ширмового пароперегрівника.

Розподіл концентрації оксиду азоту на осі котла ТПП 312 для всіх варіантів, що розглядалися представлено на рис. 3. Результати розрахунків показують, що максимальна концентрація оксиду азоту однакова для всіх варіантів, що в першу чергу пов'язано з температурними полями в середині топки (рис. 2). Максимальне значення концентрації оксидів азоту знаходиться в центрі топки в зоні де розташовані пальники. Для стандартної конфігурації топки котла (рис.3,а), після максимуму концентрації оксиду азоту в низу топки, спостерігається транспорт утворених та генерація нових оксидів азоту переважно біля фронтальної та тилової поверхонь топки. Генерація нових оксидів азоту в першу чергу пов'язана з паливним механізмом від азоту, що міститься у коксовому залишку часток вугілля.

При спалюванні вугілля в топці з відключеною системою триступеневого спалювання вугілля (рис.3,б),



**Рис. 3. Концентрація оксиду азоту на осі котла ТПП 312: а) стандартний котел; б) – г) котел з системою триступеневого спалювання: б) – котел з відключеною системою; в) – в якості палива допалення використовується природний газ; г) – в якості палива допалення використовуються продукти піролізу біомаси**

внаслідок встановлення аеродинамічного виступу, відбувається піджим потоку димових газів, внаслідок чого, вся генерація оксидів азоту відбувається в об'ємі топки, що розташований нижче аеродинамічного виступу. Внаслідок зміни геометрії топки котла, сумарна генерація оксидів азоту, порівняно зі стандартним котлом, зменшилася на 8,5 % (див. Табл. 2).

У випадку експлуатації системи триступеневого спалювання вугілля з використанням природного газу в якості палива допалення (рис. 3, в) спостерігається утворення зони відновлення оксидів азоту, яка розташована вище додаткових пальників. В цій зоні, при взаємодії оксидів азоту з вуглеводневими радикалами, відбувається відновлення оксидів азоту до молекулярного азоту. Далі за потоком при введенні третинного повітря яке призначено для допалення фрагментів палива, що не згоріло, спостерігається зона генерації оксидів азоту, переважно за термічним механізмом утворення. В наслідок роботи системи триступеневого спалювання вугілля спостерігається зменшення емісії оксидів азоту на 31,6 %. Цей результат коригується з результатами випробування даної системи на 4 блоці ЛаТЕС у 1992 році, коли спостерігалось зменшення емісії оксидів азоту на 28...40 % [1]. Різниця у значенні ефективності в першу чергу пов'язана з відмінностями у складі вугілля, в першу чергу через вміст паливного азоту в вугіллі. Слід відзначити, що зниження емісії оксидів азоту при експлуатації системи триступеневого спалювання вугілля з паливом допалення – природний газ відбувається через два основні фактори:

- Відновлення оксидів азоту внаслідок дії механізму хімічної кінетики Reburning;

- Зменшення генерації оксидів азоту за паливним механізмом утворення, через заміну в паливному балансі котла частини вугілля на природний газ, в складі якого відсутній паливний азот.

При експлуатації системи триступеневого спалювання вугілля з використанням продуктів піролізу біомаси в

якості палива допалення (рис. 3, г) спостерігається утворення зони відновлення оксидів азоту подібної як і для випадку коли використовується природний газ, але вона менша за площею та має меншу інтенсивність. Даний факт пов'язаний з тим, що продукти піролізу біомаси містять незначну кількість вуглеводнів, а основна частка складає оксид вуглецю. Ефективність зниження оксидів азоту системою триступеневого спалювання вугілля з використанням продуктів піролізу біомаси в якості палива допалення складає 23,1 % в порівнянні зі стандартним проектом котла ТПП 312 (табл. 2). Зниження емісії оксидів азоту при експлуатації системи триступеневого спалювання вугілля з паливом допалення – продукти піролізу біомаси відбувається через чотири основні фактори:

- Відновлення оксидів азоту внаслідок дії механізму Reburning;

- Зменшення генерації оксидів азоту за паливним механізмом утворення, через заміну в паливному балансі котла частини вугілля на піролізний газ, в складі якого відсутній азот;

- Зниження концентрації молекулярного азоту в паливі допалення в наслідок баластування його оксидом вуглецю (табл. 1);

- Пригнічення генерації оксидів азоту за термічним механізмом утворення в зоні допалення, внаслідок зменшення температури, що обумовлено меншою реакційністю піролізних газів порівняно з природним газом.

Порівнюючи результати по відновленню оксидів азоту в наслідок роботи системи триступеневого спалювання вугілля яка використовує в якості палива допалення природний газ чи продукти піролізу біомаси (табл. 2), можна зробити висновок, що вони мають близьку ефективність при однаковій тепловій потужності палива, що подається у додаткові пальники. При використанні природного газу ефективність відновлення оксидів азоту вище на 8,5 % ніж при використанні продуктів піролізу

Таблиця 2. Експлуатаційні характеристики топки котла ТПП 312 в залежності від режиму роботи системи триступеневого спалювання

Варіант розрахунку	Кількість палива допалення, %	$T_{\max}$ біля ШПП, К	Втрати палива, %	Емісія NO, кг/с	Зниження NO, %
1	0	1399	0,24	0,294	0
2	0	1399	0,26	0,269	8,5
3	12	1283	0,3	0,201	31,6
4	12	1291	0,23	0,226	23,1

біомаси. Слід відзначити, що подача палива допалення у обсязі 12% від загальної теплової потужності котла дає добрий рівень зниження оксидів азоту, забезпечує умову відсутності шлакування труб ширмового пароперегрівника та не призводить до зростання втрат палива від хімічного та механічного недопалу.

### Висновки

1. Проведено моделювання роботи системи триступеневого спалювання вугілля блоку №4 Ладизинської ТЕС з паливом допалення природний газ та продукти піролізу біомаси.

2. Подача палива допалення у обсязі 12% від загальної теплової потужності котла дає добрий рівень зниження оксидів азоту, забезпечує умову відсутності шлакування труб ширмового пароперегрівника та не призводить до зростання втрат палива від хімічного та механічного недопалу.

*Робота виконана в межах наукової роботи Н.Е.4.4 «Підвищення екологічності котла ТПП 312 шляхом застосування технології Reburning при використанні традиційних та відновлюваних джерел енергії» цільової програми НАН України «Інтелектуальна екологічно безпечна енергетика з традиційними та відновлюваними джерелами енергії».*

### ЛІТЕРАТУРА:

1. Моспан Ю.М., Лисовой В.Г. Итоги внедрения схемы трехступенчатого сжигания топлива на котле ТПП 312 Ладизинской ГРЭС// Первая Американско-украинская конференция «Защита атмосферного воздуха от вредных выбросов ТЭС», 9-10 сентября 1996, Киев. – С. 84 – 88.
2. Кобзар С.Г., Халатов А.А. Визначення зон підвищеної ерозії топкових екранів в залежності від режиму навантаження котлоагрегату ТПП 312 Ладизинської ТЕС// Пром. теплотехніка. — 2011. — 33, № 4. — С. 55-62.

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

4. Зменшення ерозії топкових екранів шляхом керування структурою течії в об'ємі топки котла ТПП-312/ Кобзар С.Г., Халатов А.А// в кн.. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин: Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2010-2012 рр. – Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2012. – 612 с./ - С. 279 – 288.

5. Кобзар С.Г., Халатов А.А. Дослідження ефективності зниження оксидів азоту при застосуванні вдосконаленого методу триступеневого спалювання вугілля з використанням вугілля в якості палива допалення// Промышленная теплотехника. – 2017. – Т.39 – №.5. – С. 91 – 96.

6. Кобзар С.Г., Халатов А.А. Використання продуктів піролізу біомаси в якості палива допалення для відновлення оксидів азоту: тестування механізму хімічної кінетики // Теплофізика та теплоенергетика, 2020, т. 42, №2, с.92-98; <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.10>

# USE OF THE REBURNING TECHNOLOGY WITH BIOMASS PYROLYSIS PRODUCTS AS A REBURNING FUEL TO REDUCE EMISSIONS OF NITROGEN OXIDES FROM TPP 312 BOILER

Kobzar S.G., Khalatov A.A.

*Institute of Engineering Thermophysics, NAS of Ukraine, vul. Marii Kapnist, 2a, Kiev, 03057, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.10>

In Ukraine, a three-stage coal combustion system fueled by a natural gas as a reburning fuel for nitrogen oxides emission reduction was mounted on Unit № 4 of the Ladyzhyn TPP. This system was developed in cooperation with Combustion Engineering (USA), VTI (Russia) and the Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and was assembled by the Ladyzhyn TPP staff in 1992. The test runs of this system had confirmed the effectiveness of this method of reducing emissions of nitrogen oxides into the atmosphere (up to 50%). Unfortunately, due to the high price of natural gas and the introduction of limits on its use, currently the use of natural gas as a fuel for reburning is impossible. One of the possible ways to reduce emissions of nitrogen oxides from the coal-fired boiler TPP 312 is the operation of Reburning technology with the biomass pyrolysis product as reburning fuel.

The aim of the work was to evaluate the possibility of the application the biomass pyrolysis products as a reburning fuel in Reburning technology to reduce nitrogen oxides from the coal-fired boiler TPP 312. For this purpose, a detailed computer model of a standard TPP 312 boiler and a TPP 312 boiler with a coal reburning combustion system was developed and built.

The study of the operation the Reburning coal combustion system, which is mounted on the unit №4 DTEK Ladyzhynska TPP, on the design parameters of the operation for the boiler load of 280 MWe was carried out. It was determinate that the supply of reburning fuel at 12% of the total heat capacity of the boiler gives a good level of the reduction of nitrogen oxides (up to 25%), provides no slag conditions for superheater pipes and does not lead to increase of the fuel losses with unburnt carbon.

Bibliography 6, fig. 3, tab. 2

**Key words:** biomass, pyrolysis gas, coal combustion, nitrogen oxides, nitrogen oxides reduction.

1. Mospan Yu.M., Lisovoy V.G. Results of the implementation of a three-stage fuel combustion scheme at the TPP 312 boiler at Ladyzhinskaya GRES // First American-Ukrainian Conference "Protection of atmospheric air from hazardous emissions from thermal power plants", September 9-10, 1996, Kiev., P. 84 - 88. (Rus)

2. Kobzar SG, Khalatov A.A. Determination of zones of increased erosion of furnace screens depending on the load mode of the boiler CCI 312 Ladyzhynska TPP// Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]. 2011. 33, № 4. P. 55-62. (Ukr.)

3. Kobzar SG, Khalatov AA. Determination of the efficiency of reducing emissions of nitrogen oxides by a system of step-by-step combustion of a boiler of coal TPP-312 of block # 6 of DTEK Ladyzhinsk TPP // Bulletin of NTUU KhPI. Series: Power and heat engineering processes and equipment. 2014 # 13 (1056). P.85-91 (Ukr.)

4. Reducing the erosion of furnace screens by controlling the structure of the flow in the volume of the furnace boiler TPP-312 / Kobzar SG, Khalatov AA // in the book. Problems of resource and safety of structures, structures and machines: Collection of scientific articles according to the results obtained in 2010-2012 - Kyiv: Institute of Electric Welding. E.O. Paton of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2012. - 612 pp. / P. 279 - 288. (Ukr.)

5. Kobzar, S., & Khalatov, A.. The investigation of the efficiency of the nitrogen oxides reduction by advanced reburning method application with the coal dust as a reburning fuel. Thermophysics and Thermal Power Engineering, 2017, 39(5), 91-96. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.15> (Ukr.)

6. Kobzar, S., & Khalatov, A. Application of the biomass pyrolysis products as a reburning fuel for nitrogen oxides reduction: testing the chemical kinetics mechanism. Thermophysics and Thermal Power Engineering, 2020, 42(2), 92-98. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.10> (Ukr.)

*Отримано 26.01.2021  
Received 26.01.2021*