

УДК 621.18-5

ВПЛИВ ЗАМІЩЕННЯ ЧАСТИНИ ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ ПІРОЛІЗНИМИ ГАЗАМИ НА ЕКОЛОГІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ КОТЛА ТПП 312 ПРИ ЙОГО РОБОТІ НА ПОНИЖЕНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

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

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.11>

Встановлено, що при подачі продуктів піролізу біомаси з первинним повітрям рівномірно крізь всі пальники, що знаходяться в роботі, спостерігається збільшення теплового потоку крізь дно топки і існує можливість розширити нижню межу роботи котла до навантаження 170 МВт. Заміщення частки вугілля на продукти піролізу біомаси не призводить до зменшення генерації оксидів азоту. Навпаки спостерігається незначне зростання емісії оксидів азоту зі збільшенням частки піролізних газів для навантажень 210...170 МВт.

It was found that when feeding pyrolysis products of biomass with primary air evenly through all burners in operation, there is an increase in heat flow through the bottom of the furnace and it is possible to expand the lower limit of the boiler to a load of 170 MW. The substitution of coal for biomass pyrolysis products does not reduce the generation of nitrogen oxides. On the contrary, there is a slight increase in the emission of nitrogen oxides with an increase in the part of pyrolysis gases for boilers loads of 210 - 170 MW.

Бібл. 7, табл. 2, рис. 3.

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

d – діаметр, м;

T – температура, К;

$[Y_i]$ – масова концентрація компоненти.

Індекси:

e – електрична потужність, Вт

t – теплова потужність, Вт

ave – осереднене значення

max – максимальне значення

Скорочення:

ТЕС – теплова електростанція.

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 [1] 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. 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 [1] при навантаженнях котла близьких до максимальних. В роботі [1] було встановлено, що система триступеневого спалювання вугілля може бути реалізована при навантаженнях котла 210...280 МВт. Нижня межа навантаження обумовлена температурними умовами в низу топки котла для забезпечення рідкого видалення шлаку. Верхнє обмеження потужності котлоагрегату обумовлено умовами відсутності шлакування труб ширмового пароперегрівника, яке виникає внаслідок розтягування факелу в топці котла внаслідок введення частини палива через додаткові пальники для утворення зони відновлення оксидів азоту.

В даній роботі було розглянуто вплив заміщення частини вугільного пилу піролізними газами на екологічні та технологічні показники котла ТПП 312 при його роботі на понижених навантаженнях. Розглядалася можливість використання продуктів піролізу біомаси для забезпечення умов рідкого видалення шлаку вниз топки котла. Передбачалось, що піролізні гази додаються у потік аеросуміші і разом з вугіллям потрапляють до топки котла.

Котли ТПП 312 на Ладизинській ТЕС працюють на вугіллі марок Г та ДГ. Осереднені характеристики вугілля наведені в роботі [2-5].

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:

$$R_x = \exp\left(-\left(\frac{d}{77,4}\right)^{1,23}\right).$$

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

Склад продуктів піролізу біомаси був прийнятий наступний [6]: $[CH_4] = 0,01984$; $[CO] = 0,4122$; $[CO_2] = 0,27821$; $[H_2] = 0,00337$; $[N_2] = 0,28638$. Було прийнято допущення, що горіння піролізних газів відбувається за трьохстадійним механізмом горіння метану [7]:

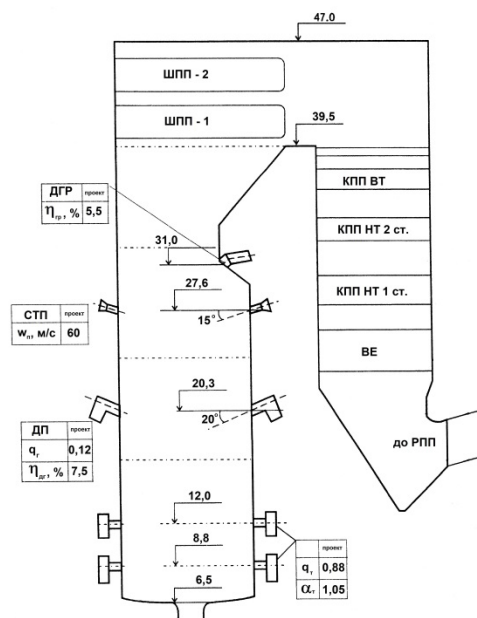
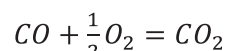
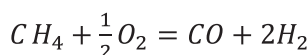
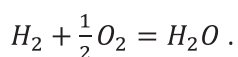


Рис. 1. Вертикальна компоновка котла ТПП 312 з системою триступеневого спалювання блоку № 4 Ладизинська ТЕС [1]

Таблиця 1. Фізико-хімічні характеристики вугілля [2-5]

Технічний аналіз						Елементний склад на суху горючу масу					
$W_p, \%$	$W_{гн}, \%$	$A^c, \%$	$S_{огт}^c, \%$	$V_r, \%$	$Q_{рн}, \text{МДж/кг}$	$S_r, \%$	$C_r, \%$	$H_r, \%$	$N_r, \%$	$O_r, \%$	$Q_{рн}, \text{МДж/кг}$
13,2	2,2	23,6	1,8	42,0	20,9	1,21	82,31	5,51	2	8,97	33,94



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 наведені в роботах [2 – 5].

Режими пониженого навантаження реалізуються шляхом відключення частини пальників. В роботі розглянуто випадок, коли для зниження навантаження відбувається відключення чотирьох крайніх пальників верхнього ярусу. При відключенні пальника через нього відсутня подача палива, а для охолодження пальника залишається подача первинного повітря як для випадку робочого пальника та подача вторинного повітря у розмірі 10% від значення для номінального навантаження [5].

При проведенні дослідження спочатку було розглянуто випадок, коли продукти піролізу біомаси подаються з первинним повітрям крізь пальники, що знаходяться в роботі. Витрата первинного повітря збільшувалася на відповідну кількість піролізних газів з одночасним перерахунком масових концентрації складових газової суміші.

До розгляду були взяті наступні значення навантажень котлоагрегату 210, 190, 170 та 150 МВт_е. Частка продуктів піролізу біомаси в тепловому балансі котлоагрегату приймалися у 10 та 20%. Для порівняння також був розрахований режим роботи котлоагрегату тільки на вугіллі.

Для оцінки екологічних характеристик котла до розгляду бралось значення масової витрати оксиду азоту на виході з котла. Для контролю експлуатаційних характеристик котла увагу було зосереджено на значеннях температур в горизонтальних перетинах, які знаходяться по осях пальників першого та другого ярусів. Також контролювалося сумарне значення втрати палива від недопалу та значення теплового потоку через дно топки котла, для оцінки забезпечення умов рідкого видалення шлаку.

Для визначення впливу заміщення частини вугілля продуктами піролізу біомаси контролювалися наступні параметри:

- На виході з котла – масові витрати оксидів азоту, оксиду вуглецю та коксового залишку;
- Повний тепловий потік до поду топки (Q_{bot});

- Значення максимальної та осередненої температур у горизонтальному перетині, що розташований по осях пальників першого ярусу (T_{1max} , T_{1ave});

- Значення максимальної та осередненої температур у горизонтальному перетині, що розташований по осях пальників другого ярусу (T_{2max} , T_{2ave});

Мінімальний тепловий потік з поду котла для забезпечення умови для рідкого видалення шлаку становить 29 – 30 МВт_т. Це значення бралось до уваги при аналізі впливу частки газів піролізу біомаси на технологічні параметри роботи котла.

Сумарні втрати палива визначалися на виході з розрахункової області як сума добутків витрат горючих компонент на їх питому теплоту згоряння. Результати впливу частки газів піролізу біомаси в паливному балансі на технологічні та екологічні характеристики котла ТПП 312 зведені в табл. 2.

Розрахунки полів температури (рис. 2) та концентрацій оксиду азоту (рис. 3) в середині котла ТПП 312 при подачі продуктів піролізу біомаси з первинним повітрям рівномірно крізь всі пальники, що знаходяться в роботі показали що спостерігається збільшення теплового потоку крізь дно топки і існує можливість розширити нижню межу роботи котла до навантаження 170 МВт_е.

Заміщення частки вугілля на продукти піролізу біомаси не призводить до зменшення генерації оксидів азоту. Навпаки спостерігається незначне зростання емісії оксидів азоту зі збільшенням частки піролізних газів для навантажень 210...170 МВт_е. Цей факт пояснюється тим що при зменшенні утворення оксидів азоту за паливним механізмом, в наслідок заміни частини вугілля газами, що не містять в собі паливного азоту спостерігається збільшення утворення частки оксидів азоту за термічним та швидким механізмами. Збільшення утворення оксидів азоту за термічним механізмом пояснюється збільшенням зони температурного вікна 1100...1500 К в об'ємі топки котла в наслідок затягування горіння оксиду вуглецю, що міститься у піролізних газах та потребує більшого часу перебування для повного згоряння. Даний факт також пояснює збільшення втрат палива.

Збільшення генерації оксидів азоту при заміщенні частини вугілля на продукти піролізу біомаси певною мірою пов'язано з присутністю водню в піролізних газах. Водень має високу реакційну спроможність, що веде до миттєвого згоряння при потраплянні в топку котла з локальним підвищенням температур в зонах, що збагачені киснем.

Таблиця 2. Вплив частки газів піролізу біомаси в паливному балансі на технологічні та екологічні характеристики котла ТПП 312

Відсоток газів піролізу біомаси в паливному балансі	NO, кг/с	Сумарні втрати палива, Вт _т	T_{1max}, K	T_{1ave}, K	T_{2max}, K	T_{2ave}, K	Q_{bot}, MBT_t
Навантаження котла 210 MBT _т							
0	0,2465	74	2014	1232	2020	1496	43
10	0,2568	496	1891	1406	1937	1517	36
20	0,2519	654	1876	1457	1900	1338	32
Навантаження котла 190 MBT _т							
0	0,2475	85	1905	1336	1948	1407	28,43
10	0,2513	480	1908	1360	1912	1479	31
20	0,2574	650	1905	1294	1916	1447	30,9
Навантаження котла 170 MBT _т							
0	0,2287	165	1945	1320	1989	1350	27,25
10	0,2464	459	1970	1296	1963	1440	31,45
20	0,2564	617	1991	1236	2012	1398	30,1
Навантаження котла 150 MBT _т							
0	0,2414	291	1884	1325	1914	1384	26,5
10	0,2206	457	2042	1182	1925	1337	29,5
20	0,2257	875	1960	1186	1944	1312	27,7

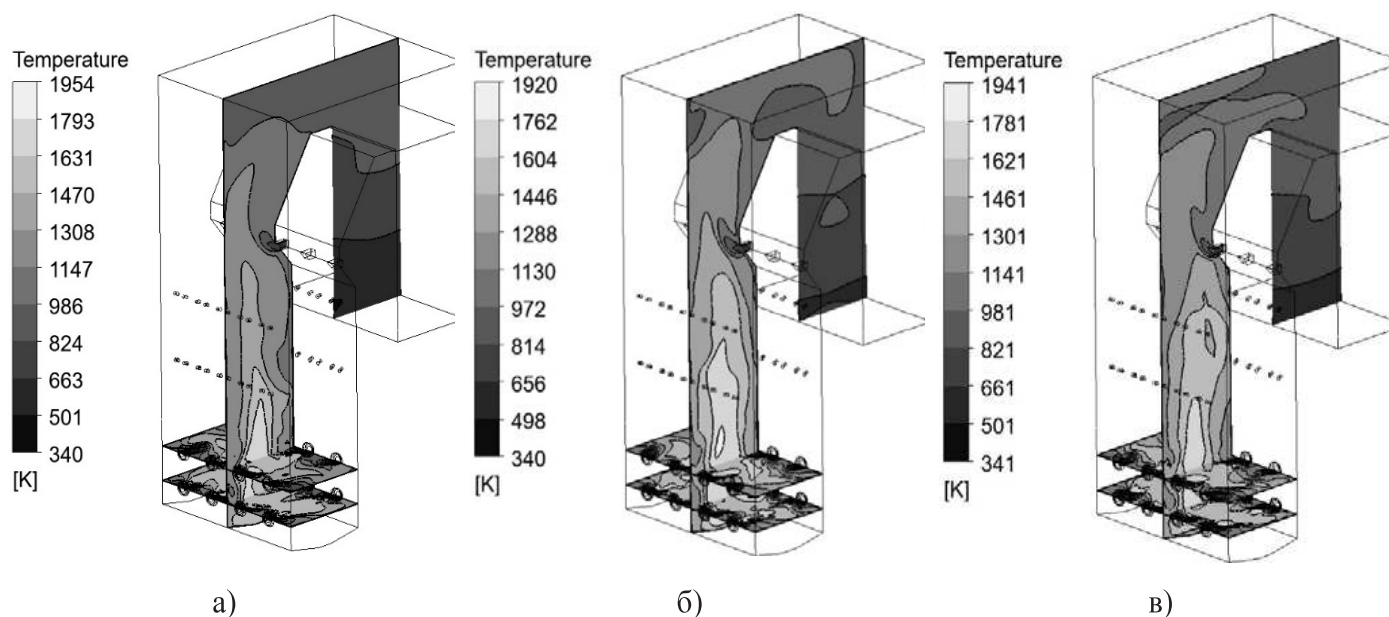


Рис. 2. Вплив заміщення частини вугільного пилу піролізними газами на температурне поле середині топки котла: а) – вугілля 100%; б) – вугілля 90% + піролізні газы 10%; в) – вугілля 80% + піролізні газы 20%;

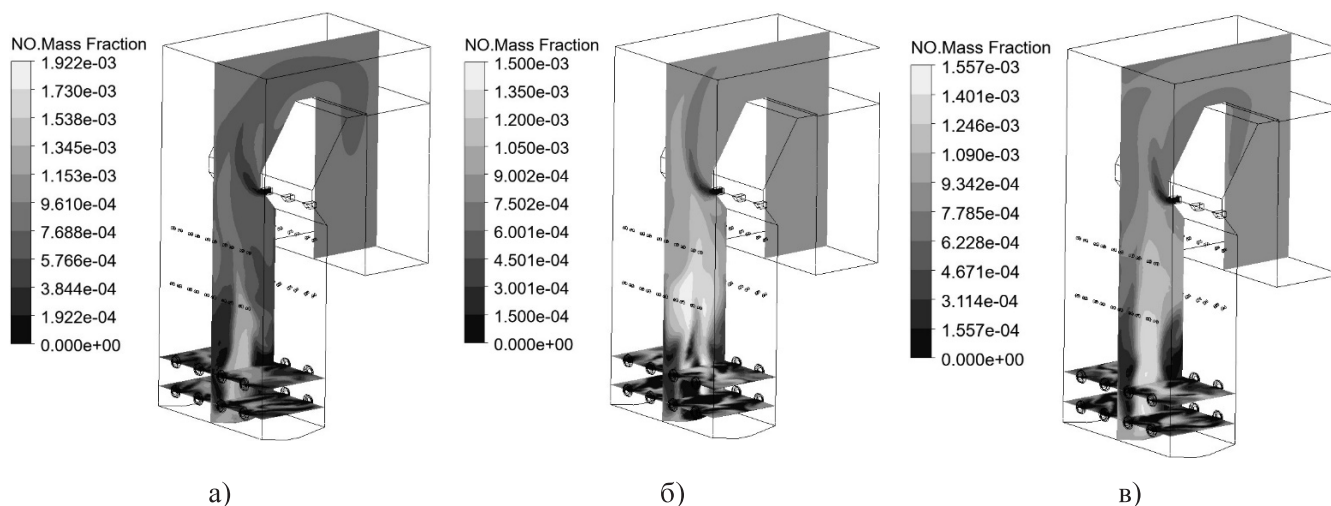


Рис. 3. Вплив заміщення частини вугільного пилу піролізними газами на генерацію оксидів азота в середині топки котла: а) – вугілля 100%; б) – вугілля 90% + піролізні гази 10%; в) – вугілля 80% + піролізні гази 20%.

На другому етапі роботи було досліджено вплив частки газів піролізу біомаси на екологічні та технологічні характеристики роботи котла при подачі продуктів піролізу біомаси у крайні пальники першого ярусу. Ця серія мала на меті дослідити вплив концентрованої подачі газоподібного палива у крайні пальники нижнього ярусу на температурний стан поду котла та вплив на хімічний недопал палива.

В цій серії розрахунків у пальники, що розташовані у центрі котла у першому та другому ярусах (пальники №№2,3,6,7 на фронті котла та №№10,11,14,15 та тилу котла) подавалось тільки вугілля. Бокові пальники другого ярусу (№№5,8 на фронті котла та №№13,16 на тилу котла) були відключені з роботи, паливо в них не подавалось. Для охолодження пальників подавалася суміш повітря та димових газів через канал аеросуміші, та через канал вторинного повітря витрата повітря у розмірі 10% від витрати працюючого пальника. У крайні пальники першого ярусу (№№1,4 на фронті котла та №№9,12 на тилу котла) подавалися продукти піролізу біомаси у розмірі 10 чи 20% від теплової потужності котла та решта вугілля. Витрата продуктів піролізу біомаси та вугілля були рівномірно розподілені між 4 боковими пальниками нижнього ярусу.

Проведені розрахунки показали, що як і для першого способу спостерігається збільшення теплового потоку крізь дно топки і існує можливість розширити нижню межу роботи котла до навантаження н 170 МВт_е, але при подачі піролізних газів у крайні пальники першого ярусу збільшення теплового потоку менше.

Висновки

Підводячи підсумок, можна зазначити, що заміна частини вугілля продуктами піролізу біомаси при роботі котла ТПП 312 на понижених навантаженнях дозволяє забезпечити стабільну роботу котла до 170 МВт_е, але разом з цим погіршує екологічні та економічні характеристики. Кращі результати дає випадок коли подача продуктів піролізу біомаси організовано рівномірно у аеросуміш пальників, що працюють.

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. Кобзар С.Г., Халатов А.А. Використання технології reburning з продуктами піролізу біомаси в якості палива допалення для зниження емісії оксидів азоту від котла ТПП 312// Теплофізика та Теплоенергетика. – 2021. – 43, №1. – С. 82-88. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.10>
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>*

7. *Westbrook C. K., Dryer F. L. Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames // Combustion Science and Technology, 1981, Vol. 27, pp. 31–43.*

THE EFFECT OF REPLACEMENT OF PART OF THE COAL DUST BY PYROLYSIS GASES ON THE ENVIRONMENTAL AND TECHNOLOGICAL PERFORMANCE OF THE BOILER TPP 312 DURING ITS OPERATION AT LOW LOADS

Kobzar S.G., Khalatov A.A.

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2022.11>

The paper was consider the influence of the replacement of part of coal dust by pyrolysis gases on ecological and technological operational parameters of TPP 312 boiler during its operation at low loads. The following values of boiler loads 210, 190, 170 and 150 MW were taken into account. The part of biomass pyrolysis products in the heat balance of the boiler was taken in 10 and 20%.

It was found that when feeding pyrolysis products of biomass with primary air evenly through all burners in operation, there is an increase in heat flow through the bottom of the furnace and it is possible to expand the lower limit of the boiler to a load of 170 MW_e.

The substitution of coal for biomass pyrolysis products does not reduce the generation of nitrogen oxides. On the contrary, there is a slight increase in the emission of nitrogen oxides with an increase in the part of pyrolysis gases for boilers loads of 210...170 MW_e.

References 7, fig. 3, tab. 2.

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

1. Kobzar, S., & Khalatov, A. [Use of the reburning technology with biomass pyrolysis products as a reburning fuel to reduce emissions of nitrogen oxides from TPP 312 boiler] // *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 2021, 43 (1), 82-88. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2021.10> (in Ukr.)

2. Kobzar S.G., 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. (in Ukr.)

3. Kobzar S.G., Khalatov A.A. [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 (in 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. (in 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> (in 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> (in Ukr.)

7. Westbrook C. K., Dryer F. L. *Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames* // *Combustion Science and Technology*, 1981, Vol. 27, pp. 31-43.

Отримано 01.06.2022

Received 01.06.2022