

УДК 621.18-5

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМІКИ ПАЛЬНИКА ЗІ ЗМЕНШЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ
ОКСИДІВ АЗОТУ ДЛЯ ПИЛОВУГІЛЬНОГО КОТЛА ТПП 312**

Кобзар С.Г., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, провідний науковий співробітник, с.н.с., e-mail: skobzar@nas.gov.ua, ORCID: 0000-0002-8615-4400

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.13>

Створено концепцію пального зі зменшеною генерацією оксидів азоту для котла ТПП 312 в принцип роботи якого покладено умову затягування горіння, шляхом відокремлення зони високих температур від вільного кисню димовими газами рециркуляції. Отримані результати показують, що запропонована концепція пального, дозволяє отримати зниження оксидів азоту до 15%. Максимальне зниження оксидів азоту спостерігається при 10% рециркуляції димових газів.

The concept of a burner with reduced generation of nitrogen oxides for the TPP 312 boiler was created. It was used the principle of prolonging combustion process by separating the high-temperature zone from free oxygen by flue gas. The obtained results are shown that the proposed concept of the burner allows reduce nitrogen oxides up to 15%. The maximum reduction of nitrogen oxides was observed at 10% recirculation of flue gases.

Бібл. 5, табл. 3, рис. 3.

Ключові слова: рециркуляція димових газів, спалювання вугілля, оксиди азоту.

d – діаметр, м;

T – температура, К;

$[Y_i]$ – масова концентрація компоненти.

Індекси:

e – електрична потужність, Вт.

Індустріалізація людського життя призводить до збільшення забруднення атмосфери в основному продуктами згорання органічного палива. За виключенням водяної пари, всі інші складові продуктів згорання активно впливають на навколишнє середовище. Оксиди азоту є найбільш шкідливими з усіх продуктів, що забруднюють атмосферу, тому для зменшення негативно впливу треба докладати зусиль по зменшенню оксидів азоту в процесі горіння. Це досягається удосконаленням процесу згорання, яке досягається так званими «первинними» та «вторинними» методами. Первинні методи направлені на зменшення викидів оксидів азоту безпосередньо під час горіння в топці чи камері згорання, а вторинні методи направлені на видалення шкідливих речовин з продуктів згорання після виходу їх з топки чи камери згорання [1].

Ідея дослідження полягає у підвищенні екологічності котла ТПП 312, шляхом створення концепції низькоемісійного пального на базі штатного. Об'єкт дослідження – котлоагрегат ТПП 312 виробництва має П-подібну компоновку, топка котла відкритого типу. Котел оснащений 16-ма пальниками, що розташовані у два яруси [2]. На теперішній час котли ТПП-312

Скорочення:

ТЕС – теплова електростанція.

Ладжинської ТЕС оснащені реконструйованими силами станції пальниками [2].

Дослідження гідродинаміки потоку в моделі пального. Проведено окреме дослідження гідродинаміки завихреного потоку в моделі пального котла ТПП 312 з різною кількістю лопатей для завихрення вторинного повітря. В моделі пального використовувалися аксіальні лопаті з кутом повороту потоку у 57 градусів. Стандартний палик може бути оснащений 8 чи 24 лопатками завихрення периферійного повітря. На рис. 1 наведено лінії швидкості для пального з 24 лопатками для завихрення периферійного вторинного повітря. Попередні розрахунки показали, що варіант пального з 8 лопатками має кращі екологічні характеристики порівняно з випадком коли встановлено 24 лопатки, тому в подальшому використовувався варіант пального з 8 лопатками для завихрення периферійного повітря.

На виході з кожного кільцевого каналу визначалось осереднене значення співвідношення тангенційної складової до осьової, яке в подальшому використовувалось для завдання граничних умов при розрахунку котла.

Коефіцієнт витрати визначалися на виході з кожного кільцевого каналу як співвідношення маси повітря

через канал до загальної маси повітря, що подається у пальник – індекс 1 відповідає внутрішньому каналу, індекс 2 – зовнішньому. Були проведені розрахунки для навантаження котлоагрегату 240 – 300 МВт_е, які характеризуються підвищеним рівнем генерації оксидів азоту.

Результати дослідження впливу навантаження котлоагрегату на структуру потоку на виході з пальника наведено в таблиці 1. Результати таблиці 1 використовували для завдання граничних умов на зрізі пальників при розрахунку термогазодинаміки котла ТПП 312.

Термогазодинаміка топки котла. Було побудовано комп'ютерну модель газового тракту котла ТПП 312, опис допущень та спрощень, що були використані при побудові моделі описано в роботі [4]. Задача розв'язувалася в тримірній постановці. Осереднені за числом Рейнольдса рівняння Нав'є-Стокса вирішувалися для в'язкого теплопровідного газу в стаціонарній постановці з використанням в якості

моделі теплообміну повного рівняння збереження енергії. Для замкнення рівняння руху використовувалася RNG *k-ε* модель турбулентності. Густина суміші газів розраховувалася за допомогою закону ідеального газу для суміші газів. Вплив гравітації враховувався шляхом завдання сили земного тяжіння в напрямку протилежному напрямленню осі Z. Радіаційний теплообмін моделювався за допомогою моделі Дискретного Переносу (Discrete Transfer). Рух твердих часток моделювався методом Лагранжа.

Характеристики палива. Котли ТПП 312 на ДТЕК Ладизинська ТЕС працюють на вугіллі марок Г та ДГ. Аналіз даних по якості вугілля, яке приходить на станцію згідно сертифікатів на вугілля марок Г (Г 0-100 енергетичне) та ДГ (ДГ 0-100 енергетичне) дав можливість вивести осереднені характеристики вугілля які використовувалися для вдосконалення моделі горіння пакету прикладних програм [3]. Моделювання проводилось за

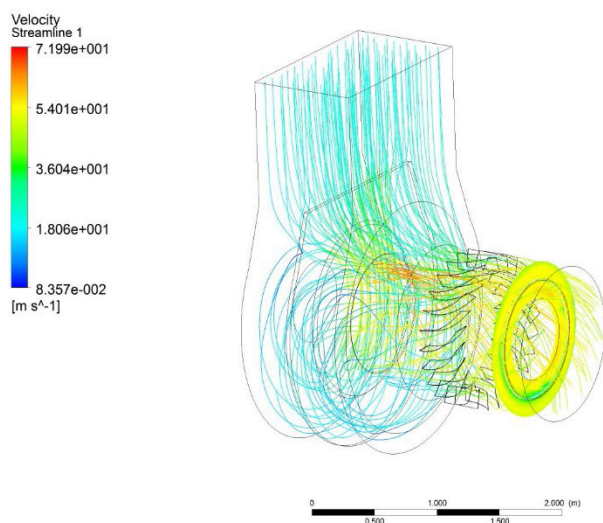


Рис. 1. Лінії швидкості в пальнику з 24 лопатками для завихрення периферійного вторинного повітря

Таблиця 1. Вплив навантаження котла ТПП 312 на структуру потоку на виході з пальника

Навантаження, МВт _е	Витрата вугілля, кг/пальник	Витрата вторинного повітря, кг/пальник	Коефіцієнт витрати, внутрішнього каналу, m_1	Коефіцієнт витрати, зовнішнього каналу, m_2	Співвідношення тангенційної швидкості до осьової на виході зі внутрішнього каналу, u/w_1	Співвідношення тангенційної швидкості до осьової на виході зі зовнішнього каналу, u/w_2
300	2,15	16,84	0,505	0,495	0,603	0,899
280	2,0054	15,53	0,51	0,49	0,59	0,903
260	1,8625	14,23	0,518	0,482	0,597	0,927
240	1,72	12,92	0,519	0,481	0,596	0,924

допомогою пакету прикладних програм ANSYS CFX. Осереднені характеристики суміші вугілля марок Г та ДГ, яке використовується на ДТЕК Ладижинська ТЕС наведені в табл. 2.

Для помелу вугілля використовуються кульові барабанні млини, які дають наступний розподіл Розіна-Раммера пилу за фракціями:

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

Модель горіння твердого палива. Для моделювання горіння частинок твердого палива використовувалася вбудована в пакет CFX стандартна модель. Згідно цієї моделі транспорт частинок моделювався шляхом розв'язання рівняння руху частинки в постановці Лагранжа. Зміну розміру діаметру частинки твердого палива прийнято пропорційною зміні її зовнішньої поверхні чи масі (у разі, коли частинка вважається непроникною для газів реагентів).

При потраплянні частинки твердого палива в топку котла з нею відбуваються наступні процеси: сушка; термічна деструкція; горіння вуглецю.

Термічна деструкція. В дослідженні було прийнято, що процес термічної деструкції твердого палива починається після досягнення температури виходу летких $T_{devel} = 700$ К для вугілля. Передбачалося, що тверде паливо під час термічної деструкції розкладається на коксовий залишок (CHAR) та леткі, склад яких був визначений виходячи зі складу горючої маси палива (Табл.2):



Зміна маси частинки залежить від матеріалу твердого палива, залишку летких у матеріалі та задовольняє закону Ареніуса з властивими конкретному матеріалу значеннями енергії активації E_{vol} та передекспонентним фактором k_{vol0} :

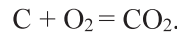
$$k_{vol} = k_{vol0} \exp\left(-\frac{E_{vol}}{RT_p}\right). \quad (2)$$

Кінетичні параметри у виразі (2) були взяті з [4], значення яких $k_{vol0} = 6,6 \times 10^4$ 1/с та $E_{vol} = 104,5$ кДж/моль.

Таблиця 2. Фізико-хімічні характеристики вугілля

Елементний склад на робочу масу (r), %							Вихід летких, %	Q _i ^r , МДж/кг
C ^r	H ^r	O ^r	N ^r	S ^r	A ^r	W ^r		
58,86	4,01	6,52	1,45	1,86	24,3	3	42	23,56

Горіння коксового залишку. Для моделювання гетерогенного горіння коксового залишку використовувалася стандартна дифузійно-кінетична модель горіння вуглецю. Прийнято, що горіння відбувається на зовнішній поверхні за сумарною (брутто) реакцією:



Горіння летких. Після виходу летких згідно виразу (1), їх горіння відбувається у гомогенному середовищі. Горіння відбувається за двостадійним механізмом :



Горіння в середині топки котла лімітується в першу чергу процесом змішування палива та окиснювача, тому середня швидкість хімічної реакції горіння газозфазних реакцій (3) та (4) визначалася за моделлю дисипації вихорів.

Швидкість реакції за моделлю дисипації вихорів Магнусена [5], визначається за формулою:

$$R_{EDC} = A_{EDC} \frac{\varepsilon}{k} \rho \cdot \min\left\{\bar{Y}_{fuel}, \frac{\bar{Y}_{ox}}{s}, B_{EDC} \frac{1}{1+s} \bar{Y}_{prod}\right\},$$

де \bar{Y}_{fuel} , \bar{Y}_{ox} – масова концентрація палива та окислювача, s – стехіометричне відношення реакції паливо/окислювач; A_{EDC} і B_{EDC} константи моделі. В моделі дисипації вихорів використовувалися стандартні значення констант $A_{EDC} = 4$ і $B_{EDC} = 0,5$.

Модель утворення оксидів азоту. Для розрахунку емісії оксидів азоту в атмосферу при спалюванні вугілля використовувалися термічний, швидкий та паливний механізми утворення оксидів азоту.

Концепція пальника. В основу створення концепції пальника зі зменшеною генерацією оксидів азоту для котла ТПП 312 було покладено умову затягування горіння, шляхом відокремлення зони високих температур від вільного кисню. Це було зроблено шляхом створення на периферії центрального каналу аеросуміші кільцевого каналу, куди подавались димові гази зі змістом кисню 6%. Площа кільцевого каналу для рециркуляції димових газів складала 0,1 від площі каналу аеросуміші. Зріз стандартного та модифікованого пальників показано на рис. 2.

При завданні граничних умов, а саме витрати вторинного повітря, враховувався кисень, що надходив з димовими газами. Корекція витрати вторинного повітря робилась таким чином, щоб підсумковий надлишок котлоагрегату становив 1,15. Витрата первинного повітря, яке використовується для транспорту вугільного пилу, залишалась сталою для всіх розрахунків. При відсутності

рециркуляції димових газів у кільцевий канал вся витрата аеросуміші подавалась рівномірно у внутрішній та зовнішній канали, тобто моделювалась робота стандартного пальника (рис.2, а). При моделюванні роботи модифікованого пальника, вся витрата аеросуміші подавалась в центральний канал, а гази рециркуляції у кільцевий.

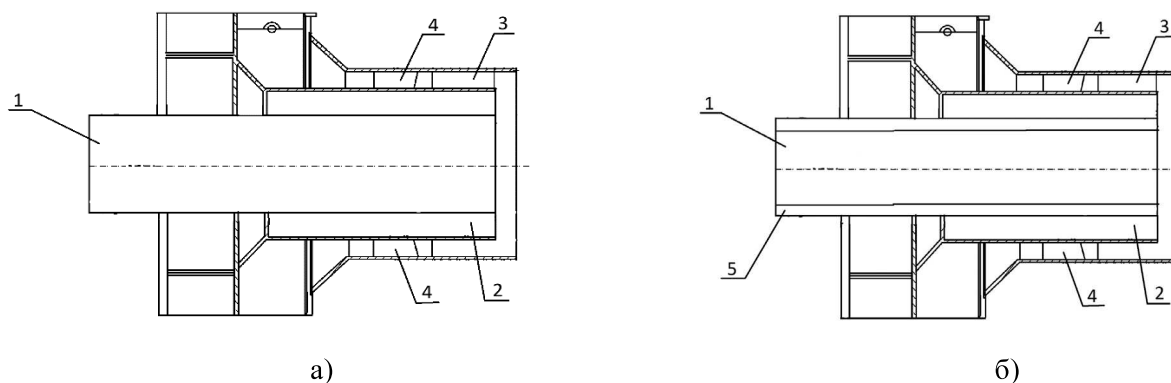


Рис. 2. Будова пальника котла ТПП 312: а) – стандартний; б) – концепція модифікованого:
1 – канал аеросуміші; 2 – канал первинного повітря; 3 – канал вторинного повітря;
4 – лопатки аксіального завихрювача; 5 – канал димових газів

Таблиця 3. Вплив рециркуляції на екологічні та технологічні показники котла ТПП 312

Рециркуляція,%	Емісія NO, кг/с	Вуглець, що не згорів, кг/с
Навантаження котла 300 МВт _е		
0	0,18	1,68
5	0,164	2,02
10	0,15	2,12
15	0,17	1,771
Навантаження котла 280 МВт _е		
0	0,174	1,045
5	0,158	1,45
10	0,146	1,07
15	0,16	1,72
Навантаження котла 260 МВт _е		
0	0,147	0,46
5	0,134	1,33
10	0,125	1,03
15	0,133	0,89
Навантаження котла 240 МВт _е		
0	0,138	0,236
5	0,12	0,801
10	0,115	1,12
15	0,123	1,25

Результати дослідження. Вплив на оксиди азоту та втрати вуглецю, що не згорів в залежності від проценту рециркуляції димових газів для різних режимів навантаження показані в таблиці показані в таблиці 3. Отримані результати показують, що при застосуванні рециркуляції у кільцевий канал, спостерігається зменшення оксидів азоту на виході з розрахункової області, при цьому зі зростанням рециркуляції спостерігається збільшення втрат з вуглецем, що не згорів.

Значення відносної зміни викидів оксиду азоту в залежності від проценту рециркуляції для різних навантажень показано на рис. 3. Отримані результати показують, що запропонована концепція пальника, яка основана на затягуванні горіння шляхом відокремлення зони високих температур від вільного кисню димовими газами, дозволяє отримати зниження оксидів азоту до 15%. Максимальне зниження оксидів азоту спостерігається при 10% рециркуляції димових газів.

Висновки

Створено концепцію пальника зі зменшеною генерацією оксидів азоту для котла ТПП 312 в принцип роботи якого покладено умову затягування горіння, шляхом відокремлення зони високих температур від вільного кисню димовими газами рециркуляції. Отримані результати показують, що запропонована концепція пальника, дозволяє отримати зниження оксидів азоту до 15%. Максимальне зниження оксидів азоту спостерігається при 10% рециркуляції димових газів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Frederick N, Agrawal R.K., Wood P.E., Wood S.C.* Induced Flue Gas Recirculation for NOx Control: Application on Boilers and Process Heaters// Energy Texas Industries press. - Report 03 ETEC.-2004.- p.24.
2. *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.
3. *Кобзар С.Г., Коваленко Г.В., Халатов А.А.* Комп’ютерне моделювання ерозії конвективних поверхонь нагріву котла ТПП 312 // Промышленная теплотехника. – 2017. – Т.39 – №.5. – С.78–83.
4. *H. Kobayashi, J.B. Howard, A.F. Sarofim.* Coal devolatilization at high temperatures/Symp. Combust., 16 (1977), pp. 411-425
5. *Magnussen B.F., Hjertager B.W.* On the structure of turbulence and a general is eddedy dissipati on concept for chemical reaction in turbulent flow // 19th AIAA Aerospace Meeting, 1981, USA: St. Louis.

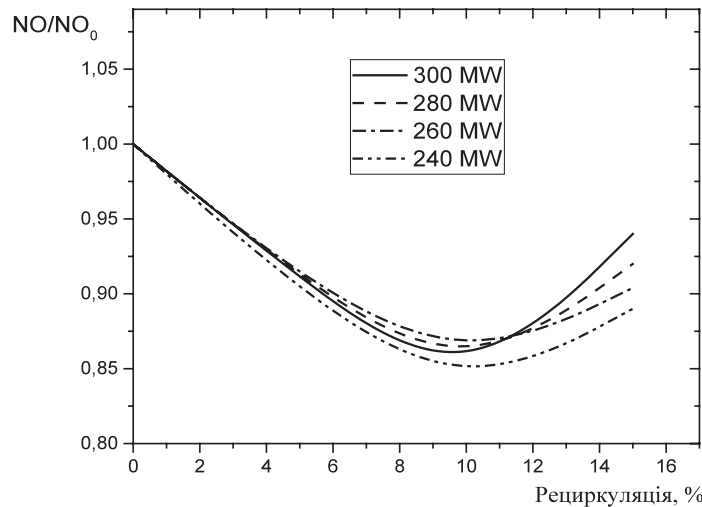


Рис. 3. Значення відносної зміни викидів оксиду азоту в залежності від проценту рециркуляції для різних навантажень

**THE INVESTIGATION OF THE
THERMOGASDYNAMICS OF A BURNER WITH
REDUCED GENERATION OF NITROGEN OXIDES
FOR A COAL DUST BOILER TPP 312**

Kobzar S.G.

*Institute of Engineering Thermophysics, NAS of Ukraine,
Marii Kapnist, 2a, Kiev, 03680, Ukraine,
PhD, skobzar@nas.gov.ua, ORCID: 0000-0002-8615-4400*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2024.13>

The paper was consider the influence of the flue gas recirculation in inner duct of coal dust burner. The concept of a burner with reduced generation of nitrogen oxides for the TPP 312 boiler was created. It was used the principle of prolonging combustion process by separating the high-temperature zone from free oxygen by flue gas. The obtained results are shown that the proposed concept of the burner allows reduce nitrogen oxides up to 15%. The maximum reduction of nitrogen oxides was observed at 10% recirculation of flue gases.

Bibliography 6, fig. 3, tabel 3.

Keywords: flue gas recirculation, coal combustion, nitrogen oxides.

1. *Frederick N, Agrawal R.K., Wood P.E., Wood S.C.* Induced Flue Gas Recirculation for NO_x Control: Application on Boilers and Process Heaters// Energy Texas Industries press. - Report 03 ETEC.-2004.- p.24.

2. *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.)

3. *Kobzar, S., Kovalenko, G., & Khalatov, A.* (2017). [Computer modeling of the erosion of the convection heat transfer surfaces of boiler TPP 312], Thermophysics and Thermal Power Engineering. 2017. 39(5), 78-83. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ihe.5.2017.13> (in Ukr.)

4. *H. Kobayashi, J.B. Howard, A.F. Sarofim.* Coal devolatilization at high temperatures/Symp. Combust., 16 (1977), pp. 411-425

5. *Magnussen B.F., Hjertager B.W.* On the structure of turbulence and a general is eddeddy dissipati on concept for chemical reaction in turbulent flow // 19th AIAA Aerospace Meeting, 1981, USA: St. Louis.

Отримано 19.09.2023

Received 19.09.2023

*Прийнято до друку 15.02.2024
Accepted for publication 15.02.2024*