

**Кобзар С.Г.**

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

**Коваленко Г.В.**

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

## **ЗАВИХРЕННЯ ВТОРИННОГО ПОВІТРЯ В ПАЛЬНИКАХ КОТЛА ЯК СПОСІБ ВПЛИВУ НА ПРОЦЕС УТВОРЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ<sup>1</sup>**

*Вугілля є тим джерелом енергії, яке може забезпечити Україні енергетичну незалежність. Ставши членом Європейського енергетичного товариства, наша держава взяла на себе зобов'язання виконувати жорсткі європейські вимоги щодо захисту навколишнього середовища.*

*Метою роботи є комп'ютерне моделювання утворення оксидів азоту в зоні горіння котла ТПП 312 при різних закручуваннях вторинного повітря в пальниках котла. Організація вихрового потоку дає змогу знизити генерацію оксидів азоту шляхом утворення зворотної течії, яка баластує зону горіння продуктами окислення. Обмеженням такого прийому є зниження температури горіння, яке може привести до виникнення недопалу.*

*Завданням дослідження є визначення утворення оксидів азоту на основі комп'ютерного моделювання газодинаміки вогневого простору котла ТПП 312 ДТЕК Ладизинської ТЕС під час спалювання газового вугілля з використанням лопаток, що закручують вторинне повітря в каналах пальників.*

*Досліджувалися такі варіанти течії вторинного повітря в пальниках: 1) без закручування потоку, як у зовнішніх кільцевих каналах, так і у внутрішніх каналах пальників (варіант прийнятий за базовий для порівняння); 2) 8 лопаток у зовнішніх кільцевих каналах у разі їх відсутності у внутрішніх каналах; 3) 24 лопатки в зовнішніх кільцевих каналах при їх відсутності у внутрішніх каналах; 4) по 8 лопаток, як у зовнішніх кільцевих каналах, так і у внутрішніх каналах; 5) по 24 лопатки, як у зовнішніх кільцевих каналах, так і у внутрішніх каналах.*

*Зі збільшенням кількості лопаток збільшувався перепад тиску, необхідний для подолання їх опору. Найбільша ефективність застосування завихрювальних лопаток спостерігається в діапазоні їх сумарної кількості від 8 до 16.*

*Завихрення вторинного повітря дає змогу знизити утворення оксидів азоту на величину до 12%.*

**Ключові слова:** *спалювання вугілля, захист навколишнього середовища, оксиди азоту, пальники із завихренням потоку, елементи завихрювачів потоку.*

**Постановка проблеми.** Вугілля є тим джерелом енергії, яке може забезпечити Україні енергетичну незалежність. Ставши членом Європейського енергетичного товариства, наша держава взяла на себе зобов'язання виконувати жорсткі європейські вимоги щодо захисту навколишнього середовища.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із методів зменшення генерації оксидів азоту є зниження температури процесу спалювання, зменшення концентрації кисню в критичних зонах горіння.

Застосування завихрення окислювача в пальниках належить до первинних методів зниження оксидів азоту і широко застосовується в сучасних котлах для спалювання газоподібного, рідкого та твердого палива. Організація вихрового потоку дає

змогу знизити рівень генерації оксидів азоту шляхом утворення області зворотної течії, яка забезпечує баластування зони високої температури продуктами горіння, чим знижується концентрація кисню в зоні, що сприяє утворенню оксидів азоту за термічним механізмом [1, с. 4].

**Постановка завдання.** Сучасні потужні котли ТЕС обладнані багатьма пальниками, які розташовані в один – два ряди, часто ряди пальників розташовані навпроти. Актуальним залишається питання впливу завихрення повітря в системі пальників на рівень утворення оксидів азоту, тому що зменшення температури горіння обмежене небезпекою виникнення недопалу.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження впливу завихрення потоку повітря в системі пальників котла на газодинаміку вогневого простору топки котла та процес утворення оксидів азоту в активній зоні горіння.

<sup>1</sup> *Роботу підготовлено в межах виконання бюджетної теми 1.7.888 «Розвиток наукових засад термогазодинаміки енергетичних установок та моніторингу викидів забруднюючих речовин»*

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Комп'ютерне моделювання проводилося на прикладі енергетичного котла ТПП 312. Котлоагрегат ТПП 312 виробництва Таганрогського котельного заводу має П-подібну компоновку. Топка котла відкритого типу з рідким шлаковидаленням. Котел оснащений 16 пальниками, що розташовані у два яруси [2, с. 88] (рис. 1).

Котли ТПП 312 на ДТЕК Ладизинська ТЕС працюють на вугіллі марок Г та ДГ. Аналіз даних щодо якості вугілля, яке приходить на станцію згідно із сертифікатами на вугілля марок Г (Г0-100 енергетичне) та ДГ (ДГ 0-100 енергетичне), дав змогу вивести осереднені характеристики вугілля, які використовувалися з метою вдосконалення моделі горіння пакету прикладних програм [3, с. 64; 4, с. 371; 5, с. 81].

На рис. 2 наведено схему пальника, які застосовуються в котлі ТПП 312. Було побудовано комп'ютерну модель газового тракту котла ТПП 312. Проведено окреме дослідження гідродинаміки завихреного потоку в моделі пальника котла ТПП 312 із різною кількістю лопатей для завихрення вторинного повітря.

На рис. 3 показано поля температур у топці котла ТПП 312 за відсутності закрутки повітря в пальниках. Вони характеризуються значною нерівномірністю і порівняно високим значенням максимальних температур – більше 2000 К. Ці обставини сприяють утворенню оксидів азоту (NO=0,2939 кг/с). (Параметри процесу за відсутності закрутки повітря в пальниках для порівняння інших варіантів конструкцій прийняті як базові).

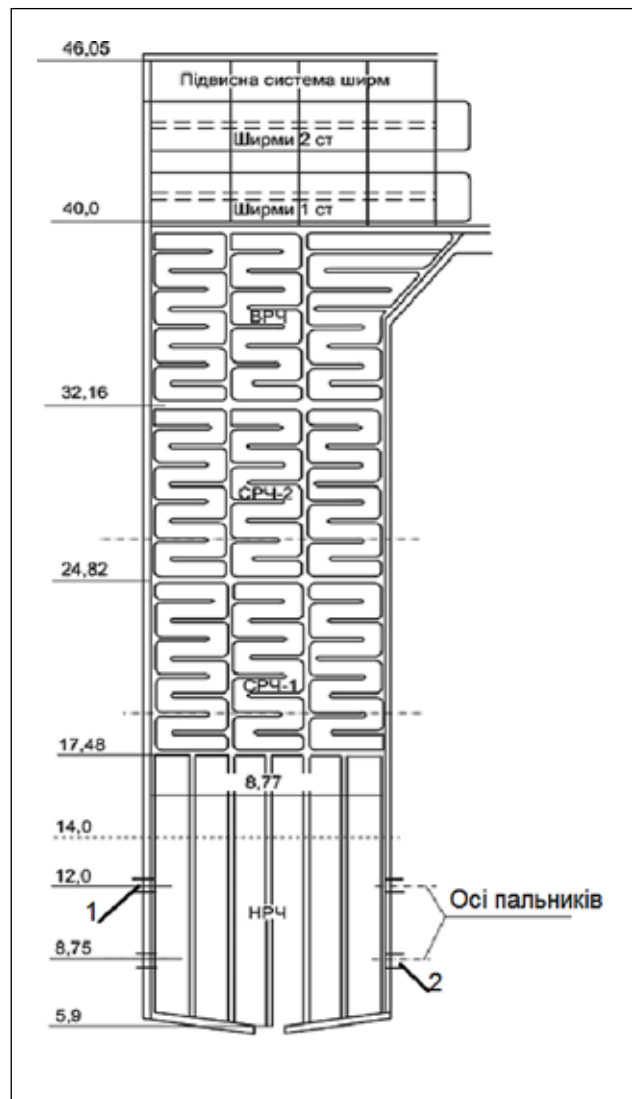
Епюра температур біля передньої і задньої стін топки на рівні другого ярусу пальників виявляється більш нерівномірною, ніж на рівні першого ярусу. Збільшена температура газів біля середини задньої стінки топки зберігається (як буде показано далі) аж до повороту в горизонтальну частину газоходу, де розміщені перегрівачі пари.

У моделі пальника використовувалися лопаті з кутом повороту потоку на 57 градусів. На рис. 4 наведено лінії швидкості для пальника з 24 лопатями для завихрення периферійного вторинного повітря (зовнішній кільцевий канал).

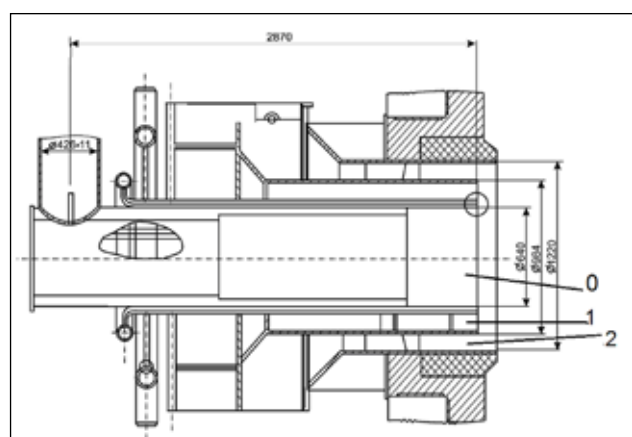
Число завихрення потоку визначалася на виході з кожного кільцевого каналу за формулою (1).

$$S = \frac{\int_{R_i}^{R_o} v \cdot w \cdot r \cdot dr}{\int_{R_i}^{R_o} v^2 r \cdot dr}, \quad (1)$$

де  $R_i$  – внутрішній радіус кільцевого каналу;  
 $R_o$  – зовнішній радіус кільцевого каналу;



**Рис. 1. Схема компоновки котла ТПП 312: 1 – пальники на фронтальній стіні котла; 2 – пальники на задній стіні котла**



**Рис. 2. Схема пальника котла ТПП 312: 0 – первинне повітря з вугільним пилом; 1 – вторинне повітря (внутрішній кільцевий канал; 2 – вторинне повітря (зовнішній кільцевий канал)**

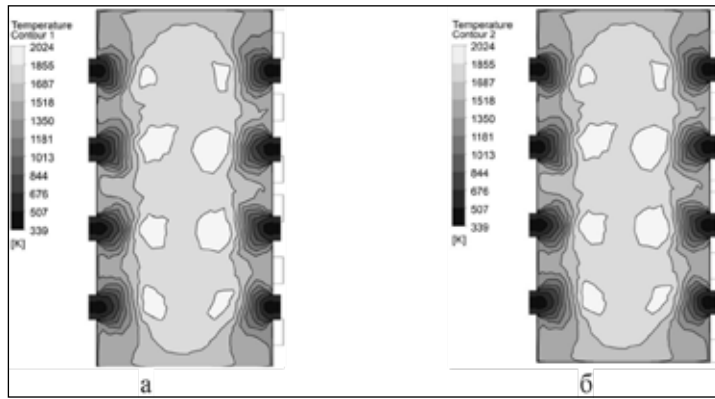


Рис. 3. Поля температур у топці котла ТПП 312 за відсутності закрутки повітря в пальниках на першому (а) і другому (б) ярусах

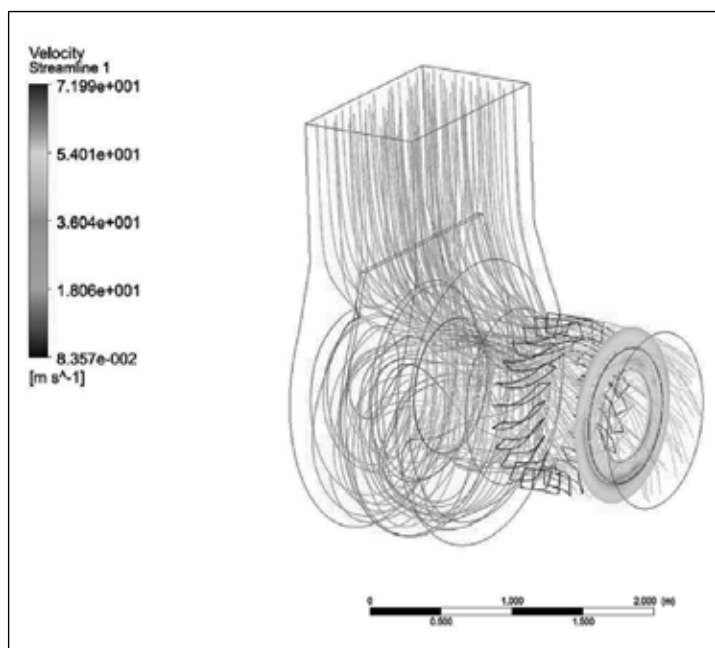


Рис. 4. Лінії швидкості в пальнику з 24 лопатями для завихрення периферійного вторинного повітря

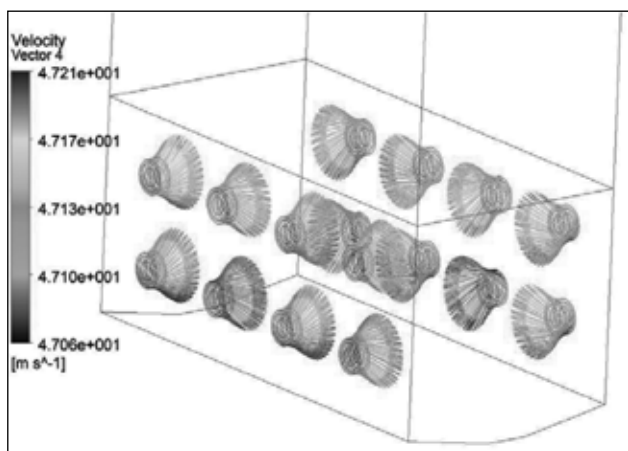


Рис. 5. Вектори швидкості на виході з пальників для випадку пальника із 8 лопатями завихрення вторинного повітря

$w$  – осьовий складник швидкості,  $v$  – тангенційний складник швидкості.

Коефіцієнти витрати визначалися на виході з кожного кільцевого каналу як відношення маси повітря, що проходить через канал, до загальної маси повітря, що подається в пальник. Індекс 1 відповідає внутрішньому каналу вторинного повітря, індекс 2 – зовнішньому. Надлишковий тиск, необхідний для проходу повітря через пальник, визначався на вході в пальник. Результати дослідження впливу кількості лопатей на структуру потоку на виході з пальника наведено в таблиці 1. Результати таблиці 1 використовували для задавання граничних умов на зрізі пальників під час розрахунку газодинаміки котла ТПП 312.

Було проведено чисельне моделювання процесу горіння вугілля в комп'ютерній моделі котла, визначено вплив ступеня завихрення та його напрямку на газодинаміку вогневого простору топки котла та процес утворення оксидів азоту в активній зоні горіння.

На рис. 5 представлені вектори швидкості на виході з пальників для випадку пальника з 8 лопатями завихрення вторинного повітря.

Напрямок завихрення вторинного повітря вибирався таким чином, щоб не заважати пальнику на протилежному боці котла (рис. 6). Коридорне розміщення пальників зумовлює більший підігрів у пальниках верхнього ярусу. Результати дослідження впливу завихрення потоку вторинного повітря на екологічні характеристики котла надано в таблиці 1.

Результати завихрення потоку вторинного повітря залежно від кількості лопатей показано на рис. 8.

Відносна зміна величини викидів оксидів азоту визначалась за формулою (2)

$$dNO = (NO_i - NO_o) \cdot 100 / NO_o \quad (2)$$

Збільшення кількості лопатей у пальнику робить закручування потоку більш досконалим, у результаті можна зазначити деяке зменшення викидів оксидів азоту. Найбільший ефект досягається в інтервалі кількості завихрювальних лопатей від 8 до 16. Максимальні температури залишаються практично на тому самому рівні, а перепади тиску ростуть майже вдвічі швидше, ніж концентрація оксидів азоту.

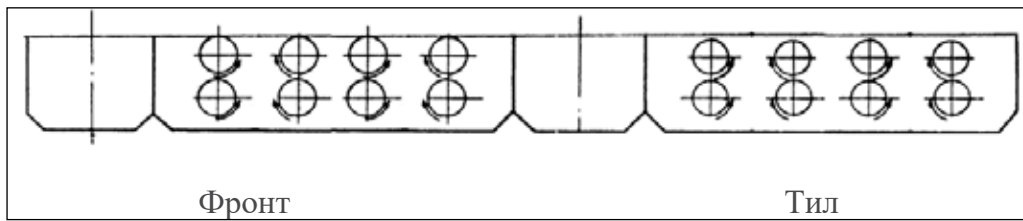


Рис. 6. Напрямок завихрення потоку в пальниках

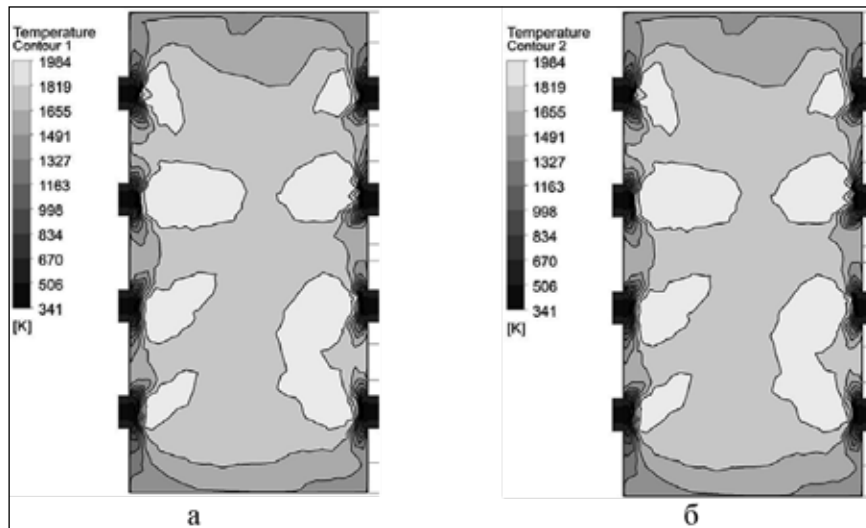


Рис. 7. Поля температур у топці котла ТПП 312 при закрутці вторинного повітря в пальниках із 24 лопатями на першому (а) і другому (б) ярусах

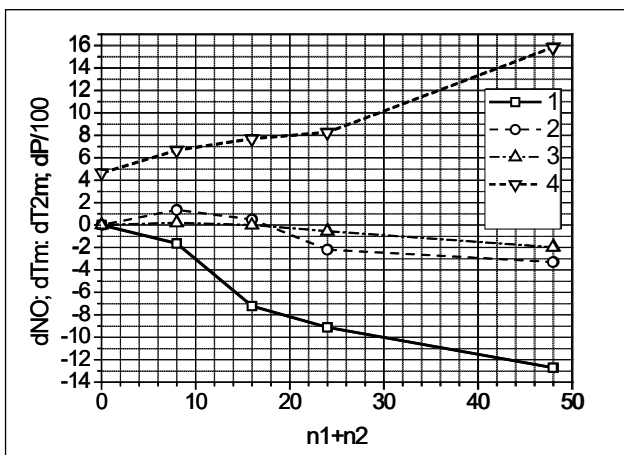


Рис. 8. Відносні зміни параметрів процесу горіння пилويدного вугілля при різних кількостях лопатей у каналах вторинного повітря: 1 – відносна швидкість утворення оксидів азоту, 2 – відносна максимальна температура на виході з першого і 3 – другого каналів вторинного повітря, 4 – перепад тиску в пальнику

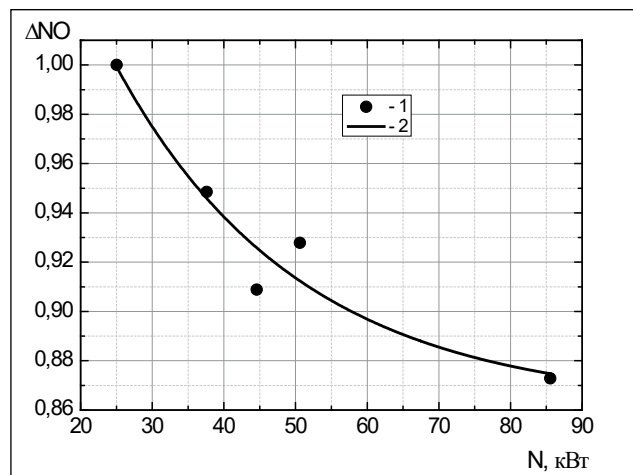


Рис. 9. Відносна зміна величини викидів оксидів азоту залежно від потужності вентилятора, який створює закручення вторинного повітря в пальниках котла: 1 – результати розрахунків; 2 – числа апроксимація

Детальніше вплив завихрювання вторинного повітря на генерацію оксидів азоту показаний на рис. 9.

Закручування вторинного повітря в зовнішньому кільцевому каналі (24 лопаті) виявилось

більш ефективним, ніж помірне закручування в двох каналах (8 лопатей у внутрішньому каналі і 8 лопатей у зовнішньому каналі).

На рис. 8 представлено результати дослідження у вигляді залежності кількості оксидів азоту, на

## Вплив кількості лопатей на енергетичну та екологічну характеристики котла ТПП 312 на номінальному навантаженні

Кількість лопатей тракту вторинного повітря		Перепад тиску на пальнику, Па	Коефіцієнт витрати		Число завихрення потоку		Середня осьова швидкість на виході з каналу, м/с		NO, кг/с	T <sub>max</sub> , К 1 ряд пальників	T <sub>max</sub> , К 2 ряд пальників
n1	n2		m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>2</sub>			
0	0	464	0,41	0,59	0,6	0,21	33,5	38,3	0,2950	2006	2024
0	8	697	0,48	0,52	0,56	0,83	39,9	33,3	0,2798	2033	2028
0	24	826	0,55	0,45	0,5	1,2	45,76	28,9	0,2681	2016	2024
8	8	938	0,45	0,55	0,96	0,82	37,0	35,6	0,2737	1962	2013
24	24	1585	0,45	0,55	1,32	1,24	37,3	34,8	0,2575	1940	1984

яку зменшено викиди від енергетичних витрат на прокачування пальників котла для навантаження 280 МВт. Потужність вентиляторів визначалась як добуток об'ємної витрати вторинного повітря на перепад тиску на тракті вторинного повітря в пальнику. Відносна кількість оксидів азоту визначалась за формулою (3).

$$\Delta NO = 1 - (NO_0 - NO_i) / NO_0, \quad (3)$$

Результати числової апроксимації результатів проведеного дослідження дали змогу отримати еколого-енергетичну характеристику котла ТПП 312 для номінального навантаження. Зниження утворення оксидів азоту, зумовлене завихреннями вторинного, залежить від потужності вентилято-

рів, що забезпечують прокачування необхідної для спалювання вугілля кількості повітря:

$$\Delta NO = 0,86 + 0,36 \exp(-3,9 \cdot 10^{-5} N), \quad (4)$$

де N – потужність вентиляторів, Вт.

**Висновки.** Результати проведеного дослідження показали, що під час спалювання газового вугілля в котлі ТПП 312:

– організація завихрення вторинного повітря дає змогу отримати зниження оксидів азоту на величину до 12%;

– застосування більше 16 лопатей для завихрення вторинного повітря нераціональне, тому що призводить не до суттєвого зниження оксидів азоту, а до збільшення гідравлічного опору пальника.

## Перелік умовних скорочень

m – коефіцієнт витрати  
n – кількість лопатей завихрювача  
NO<sub>x</sub> – витрата оксиду азоту  
r – радіус каналу  
R – радіус  
S – число завихрення потоку  
T – температура

v – тангенційний складник швидкості  
w – осьова швидкість  
Нижні індекси:  
o – зовнішній  
i – внутрішній  
max – максимальний  
1, 2 – номери каналу вторинного повітря

## Список літератури:

1. Окислы азота в продуктах сгорания топлив : Сборник науч. Трудов. Киев : Наукова думка, 1981. 204 с.
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 ХПИ. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2014. № 13(1056). С. 85–91.
3. Кобзарь С.Г., Халатов А.А. Аprobация упрощенной модели расчета горения и формирования оксидов азота при сжигании жидкого топлива. *Промышленная теплотехника*. 2006. Т. 28, № 3. С. 62–66.
4. Подовження ресурсу екранів топки котла ТПП 312 шляхом зменшення високотемпературної газової корозії за допомогою керування структурою течії в об'ємі топки при спалюванні вугілля / Кобзар С.Г., Халатов А.А. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин* : Збірник наукових статей. Київ : Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2015. 816 с. URL: <http://www.patonpublishinghouse.com/rus/compilations#winsresurs2015/>.
5. 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.

**Kobzar S.G., Kovalenko G.V. SWIRLING OF SECONDARY AIR IN BOILER COMBUSTORS AS A METHOD OF INFLUENCE ON THE PROCESS OF NITROGEN OXIDE PRODUCTION**

*The aim of the work is computer simulation of the formation of nitrogen oxides in the combustion zone of the boiler of the TPP 312 with different twists of secondary air in the boiler burners. The organization of the vortex flow allows reducing the generation of nitrogen oxides due to the formation of a return flow, which ballasts the combustion zone by oxidation products. The limitation of this technique is to reduce the combustion temperature, which can lead to underburning.*

*The objective of the study is to determine the formation of nitrogen oxides based on computer simulation of the gas dynamics of the firing space of the boiler TPP 312 DTEK Ladyzhinskaya TPP when burning gas coal using spinning blades in the secondary air channels of the burners.*

*The following variants of the secondary air flow in the burners were investigated: 1) without twisting the flow, both in the outer annular channels and in the internal channels of the burners (the variant is taken as the baseline for comparison); 2) 8 blades in the outer annular channels in their absence in the internal channels; 3) 24 blades in the outer annular channels in their absence in the internal channels; 4) 8 blades each, both in the outer annular canals and in the internal canals; 5) 24 blades, both in the outer annular canals, and in the internal canals.*

*With an increase in the number of blades, the pressure drop increased, which was necessary to overcome their resistance. The greatest effectiveness of the use of turbulent blades is observed in the range of their total number from 8 to 16.*

**Key words:** *pulverized coal boiler TPP 312, formation of nitrogen oxides, curling of the secondary air flow.*