

О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, Л. С. БУТОВСЬКИЙ, О. С. МОРОЗ, А. А. КУНИК, Д. І. ХІЛІМОНЧУК

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДИФУЗІЙНОСТАБІЛІЗАТОРНОГО ПАЛЬНИКА З НИШЕЮ

У статті наведено результати досліджень щодо розробки та натурних випробувань в стендових умовах мікродифузійного стабілізаторного пальникового пристрою прямокутного щілинного типу з нішовим поглибленням по всьому периметру пальника. Повітря проходить через прямокутну щілину, газове паливо на горіння подається в зону рециркуляції через систему отворів в торцевій стінці стабілізатора. З боку вихідного торця стабілізатора розташоване нішкове поглиблення. Як показали дослідження, нішкове поглиблення являється додатковим джерелом стабілізації і інтенсифікації горіння факелу. Отримані експериментальні дані та розрахункові залежності щодо стабілізації факелу на режимах «бідного» зриву. Показано, що стала робота пальника на бідній межі розширюється – коефіцієнт надлишку повітря підвищується при збільшенні ширини стабілізатора, діаметра газороздавальних отворів, коефіцієнту затінення пальника і температури повітря, а також при зменшенні швидкості повітряного потоку. Результати досліджень показали, що «багатий» зрив факелу – зрив полум'я при поступовому збільшенні витрати газу, має місце при коефіцієнтах надлишку повітря, які менше одиниці. Це забезпечує надійну роботу пальника при розрахункових режимах роботи щодо коефіцієнту надлишку повітря $\alpha = 1,15 - 6,0$ і швидкості повітряного потоку $W_p = 12,0$ м/с. Отримана залежність, яка визначає вплив режимних і конструктивних факторів на характеристики багатого зриву факелу. Сталість роботи пальника на багатій межі підвищується – коефіцієнт надлишку повітря зменшується, при збільшенні ширини стабілізатора, коефіцієнту затінення пальника, температури повітря і зменшенні швидкості повітря. Отримані експериментальні дані і розрахункові залежності щодо довжини зони горіння в пальниковому пристрої. Встановлено, що при розрахунковому коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 2,0$ і більших коефіцієнтах відбувається повне вигорання палива на довжині топкового простору $X = 1000$ мм. Відносна довжина факелу зменшується при підвищенні коефіцієнту затінення пальника і температури повітря. Заміри шкідливих оксидів азоту показали, що максимальний вміст оксидів спостерігається при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,0$ і складає 125 мг/м³, що менше граничних значень, які допускаються нормативними документами.

Ключові слова: стабілізатор, мікродифузійне горіння, повнота згоряння, сталість факелу, зона рециркуляції, оксиди азоту.

O. CHERNOUSENKO, L. BUTOVSKY, O. MOROZ, A. KUNYK, D. KHILIMONCHUK THE DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THE DIFFUSION-STABILIZING BURNER WITH THE NICHE

The article presents the results of researches of the development and field tests in bench conditions of the microdiffusion stabilizer burner device of a rectangular slot type with a niche deepening along the entire perimeter of the burner. The air passes through a rectangular slot, gaseous fuel for combustion is supplied to the recirculation zone through a system of holes in the end wall of the stabilizer. On the side of the output end of the stabilizer, there is a niche deepening. As studies have shown, the niche deepening is an additional source of stabilization and intensification of torch burning. The experimental data and calculated dependences on the stabilization of the torch in the modes of "poor" disruption are obtained. It is shown that the stable operation of the burner on the lean limit expands – the coefficient of excess air increases with an increase in the width of the stabilizer, the diameter of the gas distribution holes, the coefficient of shading of the burner and air temperature, as well as with a decrease in the speed of the air flow. The research results showed that "rich" flame failure – flame failure with a gradual increase in gas flow occurs at air excess ratios less than unity. This ensures the reliable operation of the burner at the calculated operating modes with respect to the coefficient of excess air $\alpha = 1.15 - 6.0$ and the air flow speed $W_p = 12.0$ m/s. A dependence was obtained that determines the influence of regime and design factors on the characteristics of a rich flare failure. The sustainability of the burner operation on the rich limit increases – the coefficient of excess air decreases, with an increase in the width of the stabilizer, the shading coefficient of the burner, air temperature and a decrease in air velocity. The experimental data and calculated dependences on the length of the combustion zone in the burner device are obtained. It was established that at the calculated coefficient of excess air $\alpha = 2.0$ and higher coefficients, complete combustion of fuel occurs on the length of the combustion space $X = 1000$ mm. The relative length of the flame decreases when the shading coefficient of the burner and the air temperature increases. Measurements of harmful nitrogen oxides showed that the maximum content of oxides is observed at the coefficient of excess air $\alpha = 1.0$ and is 125 mg/m³, which is less than the limit values which allowed by regulatory documents.

Key words: stabilizer, micro-diffusion burning, flame stability, recirculation zone, nitrogen oxide.

Вступ

У світі гостро відчувається нестача такого викопного палива, як природний газ, а також пов'язане з цим підвищення цін на це паливо. Особливо це відчутно позначається на економіці України, яка майже на 80 % залежить від імпортного постачання газу. Значна частина газоподібного палива йде на потреби промислових підприємств при виробництві металів, цементу, підігріванні теплоносіїв і інших цілей. Одним з таких технологічних процесів, для обслуговування якого пропонується розроблений пальник, являється термічна обробка керамічних матеріалів, які знахо-

дять використання в різних галузях, зокрема, радіо технічній промисловості. Як правило, при використанні газу як палива в технологічному процесі необхідно вирішувати задачу спалювання палива при змінних температурах теплоносія, зберігаючи при цьому високу ефективність процесу.

В свою чергу, ефективність робочого процесу горіння значною мірою визначається характеристиками пальникового пристрою.

Серед основних характеристик пальників слід виділити такі як необхідність забезпечення високої повноти згорання, низький гідравлічний опір, малий вміст токсичних оксидів азоту. Однією з основних вимог є також ефективна і надійна робота в

© О. Ю. Черноусенко, Л. С. Бутовський, О. С. Мороз, А. А. Куник, Д. І. Хілімончук, 2023

широкому діапазоні режимів.

Таким чином, актуальність виконаної роботи визначається вимогами забезпечення максимальної ефективності процесу термічної обробки матеріалу, економії паливо енергетичних ресурсів, а також виконання вимог забезпечення екологічної чистоти, яка визначається відповідними нормативними документами щодо охорони довкілля від забруднення шкідливими викидами.

Всі ці вимоги можуть бути виконані при впровадженні в народне господарство високоефективних технологій спалювання палив і відповідних паливкових пристроїв.

Аналіз стану питання

Аналіз характеристик паливних пристроїв, що застосовуються у зазначеній області, показує, що у ряді випадків їхні техніко-економічні та екологічні показники не відповідають сучасним вимогам, які пред'являються до паливників.

Одним із перспективних напрямків вирішення зазначеної задачі забезпечення ефективного горіння палива при зміні температури робочого тіла (коефіцієнта надлишку повітря) у широких межах є застосування паливкових пристроїв при спалюванні газоподібного або рідкого палива в стабілізаторах, що обтікаються повітряним потоком.

Такий метод використовується при розробці прямоточних камер згоряння повітряно-реактивних двигунів, форсажних камер згоряння [1, с. 341], [2, с. 81], [3, с. 217] тощо.

У випадку подачі палива в зону рециркуляції за стабілізатором реалізується так званий мікродифузійний механізм горіння (рис. 1) [4, с. 353]. Такий підхід використовується, наприклад, в камерах згоряння проміжного підігріву газів [5, с. 48].

За таким принципом працюють паливники, розроблені в КПІ ім. Ігоря Сікорського [6], [7, с. 324].

В дифузійно-стабілізаційному паливковому пристрої паливо подається в зону рециркуляції за стабілізатором через систему отворів розподілено по висоті стабілізатора (рис. 2) [7, с. 324]. Процес горіння відбувається шляхом багатоструменевого сумішоутворення в умовах інтенсивної турбулентності, якою характеризується зона рециркуляції за стабілізатором (рис. 3) [8, с. 89].

Дослідження робочого процесу таких паливкових пристроїв показало, що завдяки високій турбулентності в зоні зворотних токів відбувається інтенсивний масообмін палива та повітря. Це наближає процес горіння до характеристик горіння попередньо перемішаних сумішей з відповідними властивостями такого факелу. У той же самий час процес масообміну є недостатньо інтенсивним для отримання гомогенної суміші в зоні рециркуляції.

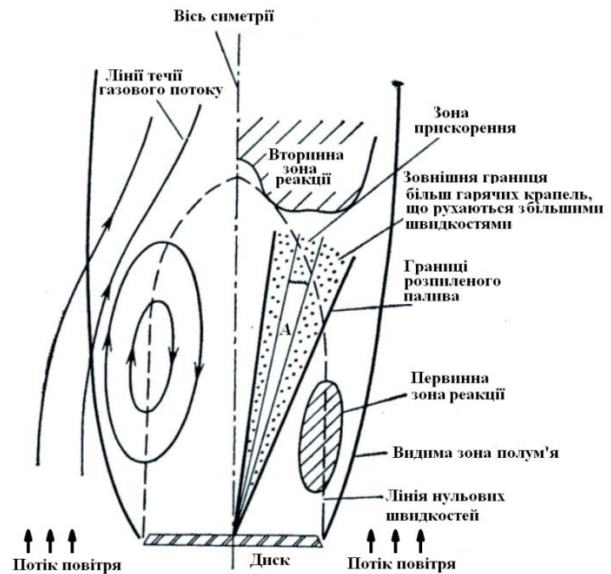


Рис. 1 – Схема масообміну компонентів за стабілізатором при струменевій подачі палива в зону рециркуляції [4]

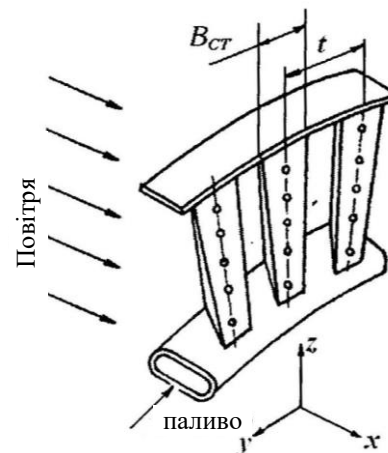


Рис. 2 – Схема розподілу газу в стабілізаторі: $B_{ст}$ – ширина стабілізатора; t – крок стабілізаторів

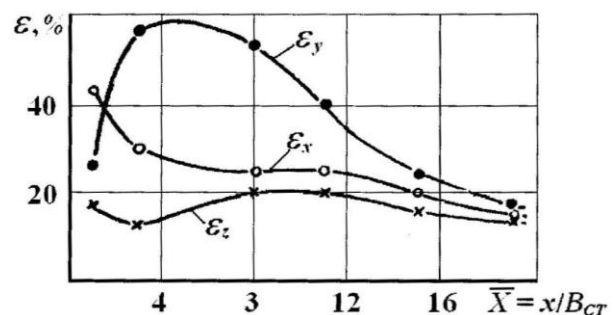


Рис. 3 – Зміна інтенсивності турбулентності потоку в сліду за стабілізатором:

ϵ_y – в поперечному напрямку (вісь Y); ϵ_z – в поперечному напрямку (вісь Z); ϵ_x – вздовж осі сліду за стабілізатором (вісь X)

Тому робочий процес у пальниках такого типу визначається і кінетичними і дифузійними параметрами, зокрема, за характеристиками стійкості факелу та інтенсивності вигорання палива.

При мікрофакельному спалюванні палива в системі пальників забезпечується можливість розробки пальникових пристроїв різної потужності за рахунок зміни кількості модульних елементів. Завдяки прямоточності окисника пальникові пристрої мають знижений аеродинамічний опір, що дозволяє зменшити потужність і використання енергії тягодутьовими пристроями.

Мета роботи

Завданням роботи було розробка та експериментальне дослідження особливостей робочого процесу пальникового пристрою при струменевій подачі палива в зону рециркуляції за стабілізатором з системи газоподаючих отворів, які розміщені в торцевій стінці розподілено вздовж стабіліза-

тора при наявності при торцевого нішового поглиблення.

Викладення основного матеріалу досліджень

Як правило, в промислових виробництвах, наприклад, при термічній обробці матеріалу технологічний процес вимагає зміни температури газів і, відповідно, коефіцієнта надлишку повітря в достатньо широкому діапазоні. Як наслідок, пальниковий пристрій, який встановлений на такому агрегаті повинен працювати, з одного боку, при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha \rightarrow 1,0$ на номінальному режимі, що відповідає кінетичному горінню, а, з другого боку, при помірних режимах $\alpha \gg 1,0$, що відповідає дифузійному горінню. Схема одного з таких агрегатів для теплової обробки керамічних матеріалів тепловою потужністю 200 кВт показана на рис. 4, взаємне розміщення пальників в печі – на рис. 5.

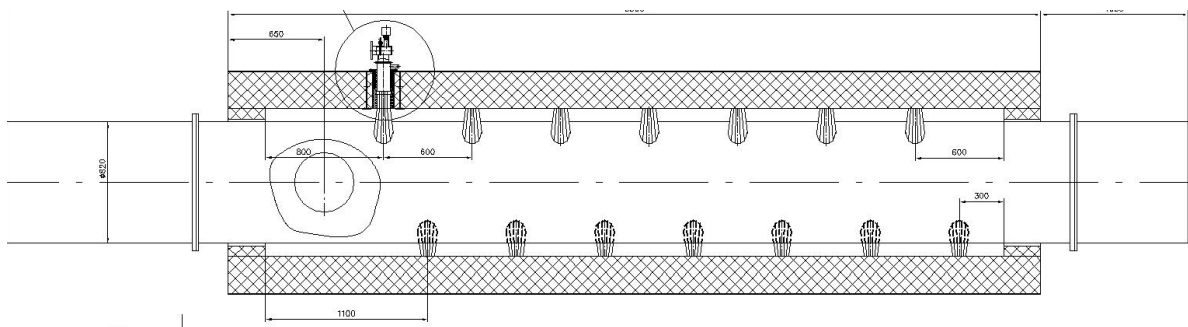


Рис. 4 – Схема печі для термічної обробки керамічних матеріалів

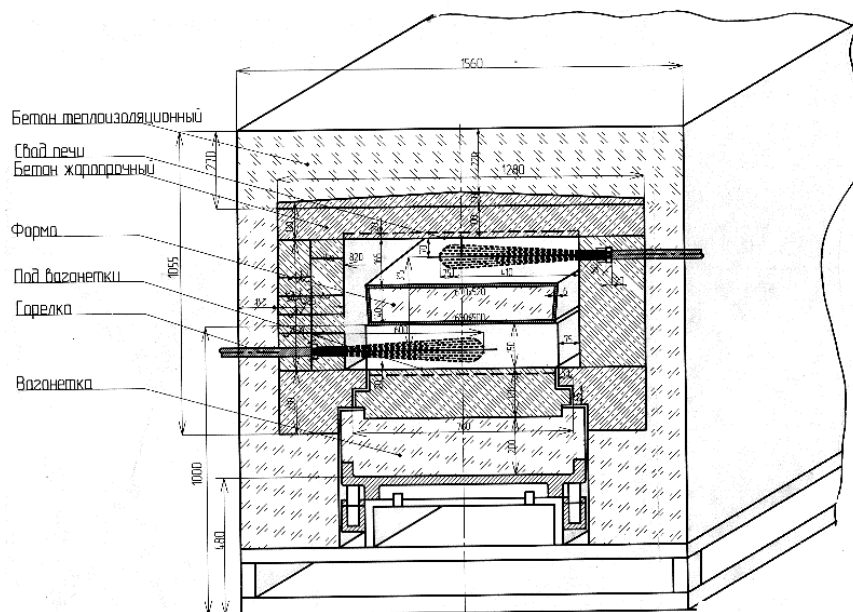


Рис. 5 – Взаємне розміщення пальників

Піч має довжину 5000 мм і переріз – 1000×1000 мм. Робочий простір печі з обох сторін розміщено 14 палинкових пристроїв, кожен тепловою потужністю в 16 кВт. У відповідності з вимогами технологічного процесу палинковий пристрій повинен мати подовжену зону тепловиділення (довжину зони горіння) до $X \approx 800$ мм. Температура продуктів згорання на номінальному режимі складає $t_{\text{пр}}^{\text{зр}} = 1200$ °С. Розрахунковий коефіцієнт надлишку повітря без попереднього підігріву повітря ($t_{\text{п}} = 20$ °С) складає $\alpha^{\text{ном}} = 2,0$.

На певних етапах технологічного процесу паличник повинен забезпечувати процес обробки матеріалу при температурі газів $t_{\text{пр}}^{\text{зр}} = 1800$ °С ($\alpha^{\text{min}} = 1,15$). На етапі пуску установки температура газів $t_{\text{пр}}^{\text{зр}} = 450$ °С ($\alpha^{\text{max}} = 6,0$). Дослідження палинкових пристроїв дифузійно-стабілізаторного типу з подачею газу в супутній слід за стабілізатором показали, що дана схема забезпечує ефективну і сталу роботу в широкому діапазоні режимів при $\alpha > 1,0$ [6].

В той же час при зменшенні коефіцієнту надлишку повітря $\alpha \rightarrow 1,0$ відбувається зменшення концентрації палива в зоні рециркуляції, її заохолодження, відрив факелу від стабілізатора, а потім, зрив факелу – так званий «багатий зрив».

Для інтенсифікації процесу масообміну в зоні рециркуляції за стабілізатором і підвищення її теплової потужності за зривом кромкою стабілізатора було виконано нішеве поглиблення в вогнетривкому насадку, який безпосередньо примикає до вихідного торця стабілізатора. Струменево-нішеві паличники знайшли широке використання в широкому колі вогнетехнічного обладнання промислового та енергетичного призначення: котли парові і водогрійні потужністю (0,5 – 125 МВт), печі, сушила тощо [9, с. 45], [10, с. 89] завдяки можливості роботи в широкому діапазоні режимів.

В результаті проведених досліджень різних варіантів палинкових пристроїв був розроблений і випробований палинковий пристрій дифузійно-стабілізаторного типу з нішею, який являє собою двопровідний паличник з роздільною подачею повітря і газу.

На рис. 6 приведена схема паличника з подачею газу в слід за стабілізатором з нішевим поглибленням, отримана за допомогою програмного комплексу *ANSYS Fluent*. Показані рух повітря в центральній частині паличника із швидкістю $W_{\text{п}} = 13,0$ м/с і бокові струмені газу із швидкістю $W_{\text{г}} = 10$ м/с, а також нішеві поглиблення на периферійній частині каналу. Як видно, в паличнику відбувається інтенсивне перемішування газу і повітря і в нішевому поглибленні утворюється зона рециркуляції, яка служить для додаткової стабілізації факелу і інтенсифікації процесу горіння.

Конструкція палиникапоказана на рис. 7, а зовнішній вигляд паличника без вогнетривкого насадку – на рис. 8.

Палинковий пристрій (рис. 7) включає корпус 1 довжиною 670 мм з зовнішнім кожухом 2 овальної форми з габаритними розмірами 30×90 мм (рис. 7). Газ подається у вогневий простір через 12 отворів 6 діаметром 3,0 мм в торцевій частині 7. Повітря на горіння подається через щілинний канал вздовж осі паличника. Для додаткової стабілізації факелу при $\alpha \rightarrow 1,0$ із сторони вихідної частини паличника встановлюється виконаний з вогнетривкого матеріалу насадка 10, довжиною 115 мм з внутрішнім розміром 92×32 мм і нішовим поглибленням, яке примикає до вихідного торця металевої частини паличника розміром 110×50 мм і довжиною вздовж потоку $l_{\text{н}} = 20$ мм. Коефіцієнт затінення палиркового пристрою без вогнетривкого насадку $K_f = 0,73$. Ширина стабілізатора $B_{\text{ст}} = 10$ мм, глибина нішевого поглиблення $B_{\text{н}} = 10$ мм.

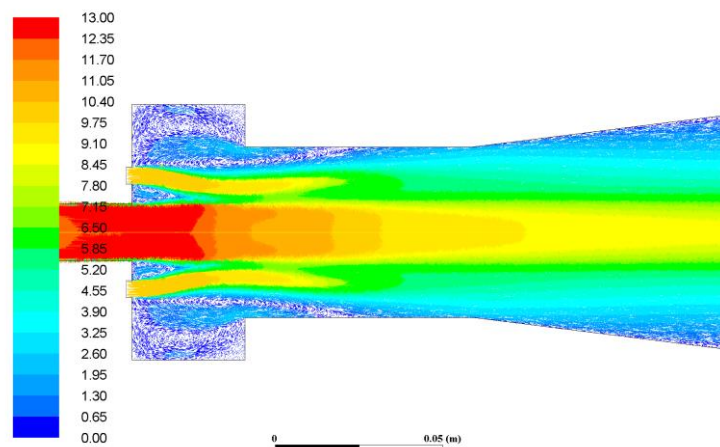


Рис. 6 – Схема руху потоків компонентів в дифузійно стабілізаторному палинковому пристрої з нішевим поглибленням ($W_{\text{п}} = 13,0$ м/с; $W_{\text{г}} = 10$ м/с)

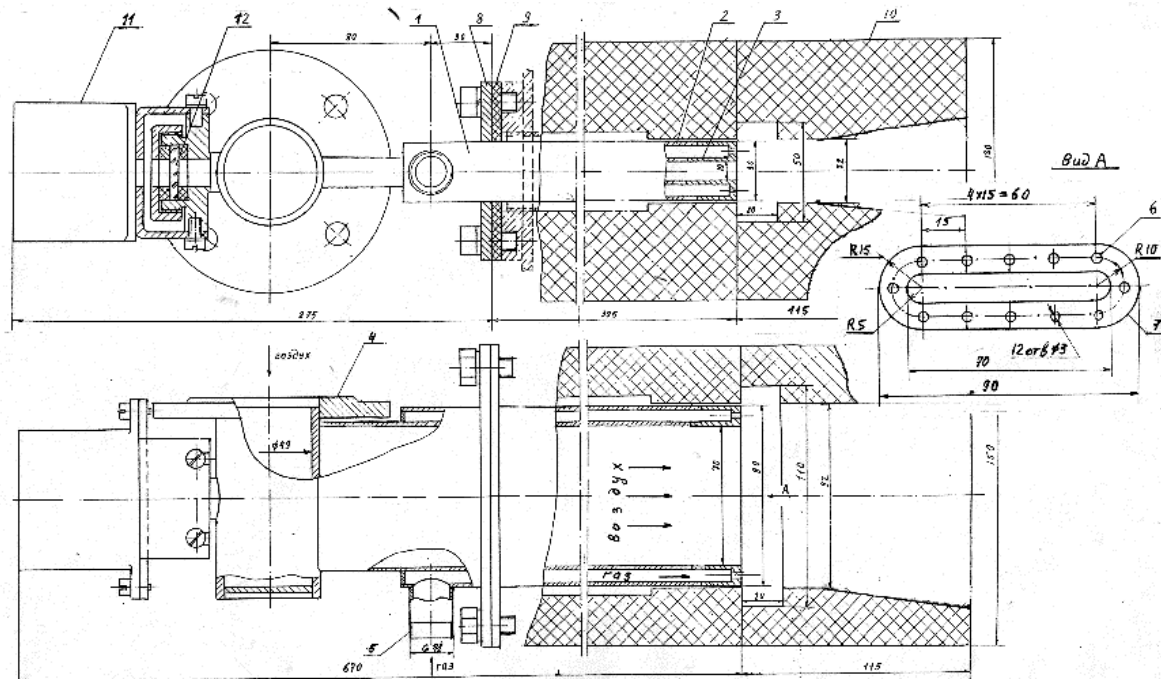


Рис. 7 – Дифузійно стабілізаторний паликовий пристрій з нішею:

- 1 – корпус; 2 – зовнішній кожух; 3 – внутрішня вставка; 4 – фланець підведення повітря;
5 – штуцер підведення газу; 6 – газоподаючі отвори; 7 – торцева частина; 8 – фланець кріплення на печі;
9 – прокладка; 10 – вогнетривкий насадок; 11 – пристрій контролю полум'я; 12 – окуляр



Рис. 8 – Зовнішній вигляд дифузійно стабілізаторного паликового пристрою (без вогнетривкового насадку)

Для визначення характеристик паликового пристрою в стендових умовах були проведені відповідні випробування.

На рис. 9 наведені дані щодо характеристик запалювання і бідного зриву факелу. Як показали випробування, бідний зрив факелу (рис. 9, крива 1) відбувається при коефіцієнтах надлишку повітря, які значно вищі, ніж при робочих режимах палика ($W_p = 12,0$ м/с, $\alpha = 1,15 - 6,0$). Характеристика запалювання факелу (крива 2 на рис. 9) також забезпечують можливість надійного запалювання при температурах, які вищі обумовлених завданням ($t_{прзг} = 450$ °С, $\alpha^{max} = 6,0$), що повністю усуває вірогідність «теплого удару» по обмурівці печі і матеріалу.

Як показують дослідження щодо сталості горіння в палику на бідній межі, коефіцієнт надлишку повітря в залежності від режимних і конструктивних факторів можливо розрахувати за такою залежністю

$$\alpha^{max} = K^{max} \frac{B_{ст}^{0,5} d_T^{0,35} \left(\frac{F_{ст}}{F_T} \right)^{0,2} \frac{T_p}{273}}{W_p^{1,5} K_f (1 + K_f)}, \quad (1)$$

- де $B_{ст}$ – ширина стабілізатора, мм;
 d_T – діаметр газоподаючого отвору, мм;
 $F_{ст}$ – площа стабілізатора – вихідного торця палика за винятком щілини подачі повітря, м²;
 F_T – площа газоподаючих отворів, м²;
 T_p – температура повітря, К;
 W_p – швидкість повітря, м/с;
 K_f – коефіцієнт затінення палика,
 $K_f = F_{ст}/F_{пальн}$;

$F_{пальн}$ – площа вихідного торця палика;
 K^{max} – дослідний коефіцієнт, для паликового пристрою $K^{max} = 128$.

Як видно з формули (1), при необхідності, сталість факелу на бідній межі можна поліпшити (α^{max} підвищити) шляхом збільшення ширини стабілізатора ($B_{ст}$) діаметра газових отворів (d_T), зменшення швидкості повітряного потоку (W_p), збільшення температури потоку, збільшення коефіцієнта затінення палика (K_f), але це призведе до збільшення опору палика.

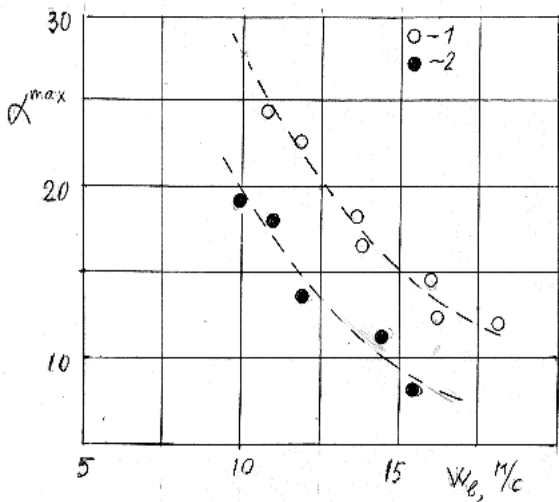


Рис. 9 – Залежність коефіцієнту надлишку повітря на режимах бідного зриву (α^{max}) і запалювання факелу (α^{zap}) від швидкості (W_n) повітря в пальниковому пристрої: 1 – бідний зрив; 2 – запалювання

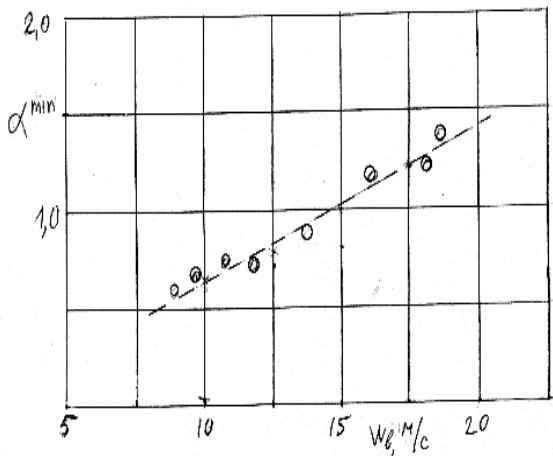


Рис. 10 – Залежність коефіцієнту надлишку повітря на режимах багатого зриву (α^{min}) від швидкості (W_n) повітря в пальниковому пристрої

З даних рис. 9 можна відмітити, що коефіцієнт надлишку повітря на режимі бідного зриву значно вищий, ніж при спалюванні гомогенних сумішей. Це пов'язане з тим, що при даному методі спалювання концентрація палива в зоні рециркуляції вище, тому що в зону попадає не все повітря з потоку, що обтікає стабілізатор, а тільки певна його частка.

На рис. 10 наведено залежності коефіцієнта надлишку повітря на режимах багатого зриву.

Як видно з рисунку, багатий зрив факелу в пальниковому пристрої відбувається при коефіцієнтах надлишку повітря значно менших, ніж мінімальне режимне значення ($W_n = 12,0$ м/с, $\alpha^{min} = 1,15$).

Залежності характеристик багатого α^{min} зриву від режимних і конструктивних параметрів можна розраховувати за такою формулою

$$\alpha^{min} = K^{min} \frac{W_n}{B_{ст}^{0.5}} \left(\frac{T_n}{273} \right)^{-0.6} \frac{e^{1.5K_f}}{K_f^{1.5}}, \quad (2)$$

де $K^{min} = 0,045$.

Таким чином, завдяки комбінованій системі стабілізації факелу за стабілізатором і в ніші при зміні коефіцієнтів надлишку повітря забезпечується стала робота пальникового пристрою за межами потрібного діапазону роботи – при $\alpha^{min} = 1,15$; $\alpha^n = 2,0$ і $\alpha^{max} = 6,0$.

З приведених даних видно, що поліпшити сталість факелу на багатій межі при подачі газу в зону рециркуляції при заданих режимних умовах щодо швидкості потоку (W_n) можна за рахунок збільшення ширини стабілізатора ($B_{ст}$) і коефіцієнту затінення (K_f).

На рис. 11 приведені результати випробувань щодо недопалу (q_3) палива на виході з стенду ($X = 1000$ мм) в залежності від коефіцієнту надлишку повітря, які виконані за допомогою газоаналізатора Testo 330. Як видно з отриманих даних, в діапазоні робочих коефіцієнтів надлишку повітря від номінального $\alpha^n = 2,0$ до мінімального $\alpha^{min} = 1,15$ повнота згоряння ($\eta_z = 1 - q_3$) практично дорівнює одиниці ($q_3 = 0$), тобто відбувається повне вигорання палива.

Значення довжини, на якій відбувається вигорання 99 % палива $(X/B_{ст})_{0,99}$ можна розрахувати таким чином

$$\left(\frac{X}{B_{ст}} \right)_{0,99} = \frac{21,21}{\alpha C_x K_f (1 + K_f)} \left(\frac{L_0}{\theta_n} \right)^{0,94}, \quad (3)$$

де C_x – коефіцієнт лобового опору пальника, $C_x = 1,95$;

L_0 – ваговий стехіометричний коефіцієнт, кг палива/кг окисника, для метану $L_0 = 16,8$; $\theta_n = T_n/273$.

Розрахунки показують, що для даної конструкції пальника довжина камери, яка потрібна для повного вигорання палива $((X/B_{ст})_{0,99})$ складає $X \approx 600$ мм, що вкладається в заявлену довжину ($X = 820$ мм).

Дані щодо залежності вмісту оксидів азоту, які приведені до коефіцієнту надлишку повітря, який дорівнює одиниці, $NO_{x \alpha=1,0}$, показані на рис. 12.

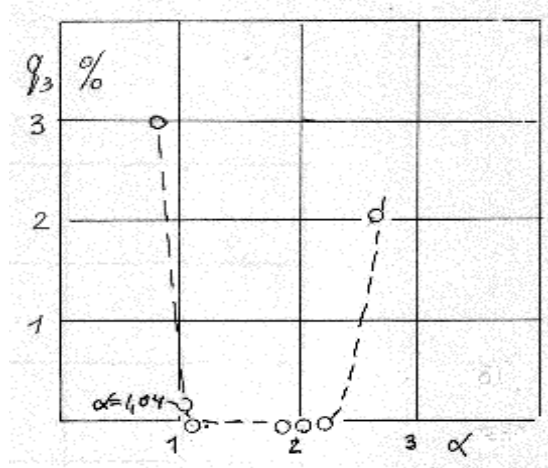


Рис. 11 – Залежність недопалу палива q_3 від коефіцієнту надлишку повітря α

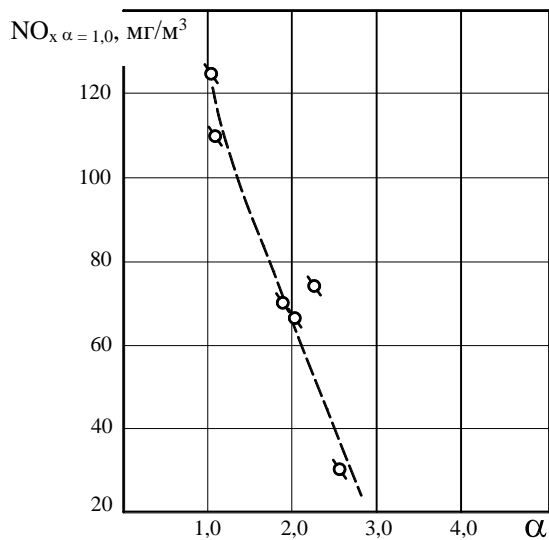


Рис. 12 – Залежність вмісту оксидів азоту, які приведені до коефіцієнту надлишку повітря, що дорівнює одиниці $\text{NO}_x \alpha = 1,0$ від коефіцієнту надлишку повітря

Як видно з даних, максимальний вміст оксидів азоту спостерігається при $\alpha \approx 1,0$ і його вміст складає $\text{NO}_x \alpha = 1,0 = 125 \text{ мг/м}^3$, що менше допустимих значень, які допускаються нормативними документами, $\text{NO}_x \alpha = 1,0 = 240 \text{ мг/м}^3$ [11]. При $\alpha^H = 2,0$ значення $\text{NO}_x = 70 \text{ мг/м}^3$, що теж значно менше граничних.

Висновки

Результати проведених досліджень показали, що в розробленій конструкції пального пристрою у вигляді стабілізатора з подачею газу в зону рециркуляції і додаткової стабілізації факелу за допомогою нішевого поглиблення було забезпечено стале запалювання і горіння факелу в робочому діапазоні коефіцієнтів надлишку повітря

$\alpha = 1,15 - 6,0$, при розрахунковій швидкості повітря. Повнота згорання на виході з пального тунелю ($X = 1000 \text{ мм}$) практично дорівнює одиниці в діапазоні коефіцієнтів надлишку повітря $\alpha = 1,03 - 2,3$ ($\alpha^H = 2,0$).

Максимальний вміст оксидів азоту спостерігається при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha \approx 1,0$ і його вміст складає $\text{NO}_x \alpha = 1,0 = 125 \text{ мг/м}^3$, що менше допустимих значень, які допускаються нормативними документами ($\text{NO}_x \alpha = 1,0 = 240 \text{ мг/м}^3$).

Проведені дослідження показали робото-спроможність і високу ефективність розробленого пального пристрою в розрахунковому діапазоні режимів роботи.

Список літератури

- Хауторн У. Р. Основы проектирования и характеристики газотурбинных двигателей / У. Р. Хауторн, У. Т. Олсон. – Машиностроение, 1964. – 648 с.
- Любчик Г. Н. Когенерационно-утилизационные технологии на базе газотурбинных установок / Г. Н. Любчик, Л. Б. Чабанович, Р. М. Говдяк, А. Реграги, Б. И. Шелковский – Киев : Варта, 2008. – 188 с.
- Пчелкин Ю. М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей / Ю. М. Пчелкин. – 3-е изд. – Машиностроение, 1984. – 280 с.
- Франк-Каменецкий, Д. А. Микродиффузионное турбулентное горение / Д. А. Франк-Каменецкий, Е. М. Минский // Докл. АН СССР. – 1950. – Т. 50. – С. 353–354.
- Акулов В. А. Испытание блока дожигających устройств ГТ-25-700 на Якутской ГРЭС / В. А. Акулов, Л. С. Бутовский, В. И. Жемчугов, В. А. Измайлов, А. Г. Тумановский, В. Ю. Фивейский, В. А. Христоч, Е. И. Чернин, И. К. Шубняков // Теплоэнергетика. – 1981. – № 6. – С. 48–51.
- Христоч В. А. Газогорелочные устройства для сжигания газа при высоких и переменных избытках воздуха / В. А. Христоч, Г. Н. Любчик // Научно-технический обзор. Серия: Использование газа в народном хозяйстве. – 1978. – Вып. 10. – 160 с.
- Бутовский Л. С. Исследование выгорания топлива за угловыми и плоскими стабилизаторами пламени / Л. С. Бутовский, Е. А. Грановская, Г. Н. Любчик, В. А. Христоч // Теория и практика сжигания газа. – 1975. – Вып. VI. – С. 324–338.
- Уханова Л. Н. Статистические характеристики плоского турбулентного следа на небольшом расстоянии от цилиндра / Л. Н. Уханова // Промышленная аэродинамика. Серия: Струйные течения. – 1966. – Вып. 27. – С. 83–95.
- Абдулін М. З. Комплексний підхід к підвищенню енерго-ефективності гидро-термохимических процессов / М. З. Абдулін, О. А. Сірій // XXIX конференція «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики». – 2019. – С. 45–48.
- Сірій О. А. Дослідження енергетичних показників струменево-нішевої системи спалювання палива / О. А. Сірій, М. З. Абдулін // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2018. – № 12(1288). – С. 89–94. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2018.12.16>.
- ДСТУ 3-59-68-95 Пристрої газопального для котлів та побутової техніки тепловою потужністю до 0,115 МВт. Загальні технічні умови. – Київ : Мінмашпром України, 1995. – 35 с. – (Національний стандарт України).

References (transliterated)

- Hawthorne, W. R., Olson W. T. (1964), *Osnovy proektirovaniya i harakteristiki gazoturbimnykh dvigatelej* [Design and performers of gas turbine power plants], Mashinostroenie, 648 p.
- Lyubchik G. N., Chabanovich L. B., Govdyak R. M. (2008), *Kogeneracionno-utilizacionnye tehnologii na baze gazoturbimnykh ustanovok* [Cogeneration and utilization technologies based on gas turbine units], Varta, Kiev, 188 p.
- Pchelkin Y. M. (1984), *Kamery sgoraniya gazoturbimnykh dvigatelej* [Combustion chambers of gas turbine engines], Mashinostroenie, 280 p.
- Frank-Kameneckij, D. A., Minskij E. M. (1950), "Mikrodiffuzionnoe turbulentnoe gorenie [Microdiffusing turbulent burning]", *Dokl. AN SSSR*, vol. 50, pp. 353–354.
- Akulov, V. A., Butovskij L. S., Zhemchugov V. I., Izmajlov V. A., Tumanovskij A. G., Fivejskij V. Ju., Hristich V. A., Chernin E. I., Shubnjakov I. K. (1981), "Ispytanie bloka dozhi-gajushhih ustrojstv GT-25-700 na Jakutskoj GRJeS [Testing of the afterburner unit GT-25-700 at the Yakutsk GRES]", *Teploenergetika*, no. 6, pp. 48–51.
- Hristich V. A., Lyubchik G. N. (1978), "Gazogorelochnye ustrojstva dlja szhiganiya gaza pri vysokih i peremennyh izbytkah vozduha [Gas burners for gas combustion at high and variable air excesses]", *Nauchno-tehnicheskij obzor. Serija: Ispolzovanie gaza v narodnom hozjajstve*, vyp. 10, 160 p.
- Butovsky L. S., Granovskaja E. A., Lyubchik G. N., Hristich V. A. (1975), "Issledovanie vygoraniya topliva za ugolkovymi i ploskimi stabilizatorami plameni [Study of fuel burning behind angular and flat flame stabilizers]", *Teorija i praktika szhiganiya gaza*, vyp. VI, pp. 324–338.
- Ukhanova L. N. (1966), "Statisticheskie harakteristiki ploskogo turbulentnogo sleda na nebol'shom rasstojanii ot cilindra [Statistical characteristics of a flat turbulent wake at a small distance from the cylinder]", *Promyshlennaja aerodinamika. Serija: Strujnye techenija*, vyp. 27, pp. 83–95.
- Abduln M. Z., Siryi A. (2019), "Kompleksnyj podhod k povysheniju jenergojeffektivnosti gidro-termohimicheskikh processov [An integrated approach to improving the energy efficiency of hydro-thermochemical processes]", *XXIX konferencija "Problemi ekologii ta eksploatacii ob'ektiv energetiki"*, pp. 45–48.
- Siryi A., Abduln M. (2018), "Analyzing Power Indices for the Jet-Niche Fuel Combustion System", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 12(1288), pp. 89–94, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2018.12.16>.
- Minmashprom Ukraïny (1995), *DSTU 3-59-68-95 Prystroj' gazopal'nykovi dlja kotliv ta pobutovoi' tehniki teplovoju potuzhnistju do 0,115 Mvt. Zagal'ni tehnichni umovy* [DSTU 3-59-68-95 Gas burner devices for boilers and household appliances with a thermal capacity of up to 0.115 MW. General technical conditions], Kiev, 35 p.

Надійшла (received) 18.05.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Черноусенко Ольга Юрійвна (Chernousenko Olga) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Теплової та альтернативної енергетики», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ; тел.: (050) 413–40–50; e-mail: chernousenko20a@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>. Scopus 6507954096.

Бутовський Леонід Сергійович (Butovsky Leonid) – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Теплової та альтернативної енергетики», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; e-mail: homet129@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8947-9887>.

Мороз Олег Сергійович (Moroz Oleh) – аспірант кафедри «Теплової та альтернативної енергетики», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; e-mail: morozoleg95@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3906-8913>.

Кунук Арсен Андрійович (Kunuk Arsen) – аспірант кафедри «Теплової та альтернативної енергетики», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; e-mail: coolarsen3@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8292-022X>.

Хілімончук Дмитро Ігоревич (Khilimonchuk Dmtro) – аспірант кафедри «Теплової та альтернативної енергетики», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; e-mail: dimaololo43@gmail.com.