

Черноусенко О.Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бутовський Л.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Грановська О.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мороз О.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Старченко О.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПУСКОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАБІЛІЗАТОРНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИСТРОЇВ ПРИ ПОДАЧІ ГАЗОВОГО ПАЛИВА В ЗОНУ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ

У статті наведено результати експериментальних досліджень щодо характеристик запалювання факела в мікродифузійних пальниках, які складаються з системи погано обтічних тіл – стабілізаторів, між якими протікає повітряний потік. Паливо на горіння подається в зону рециркуляції через систему отворів, які є у вихідній торцевій стінці стабілізатора вздовж його висоти. В експериментах запалювання факела здійснюється від авіаційної свічки з кільцевим поверхневим розрядним проміжком. Електрична свічка була розташована з торця одного зі стабілізаторів. У результаті проведення досліджень встановлено оптимальне місце розташування кільцевого розрядного проміжку свічки, за якого отримано надійне запалювання за мінімальної швидкості газових струменів, тобто мінімальної витрати палива, чому відповідає максимальний коефіцієнт надлишку повітря в пальнику. Отримано дані щодо впливу на характеристики запалювання факела таких параметрів, як ширина стабілізатора, діаметр газоподавальних отворів, коефіцієнт затінення пальника, швидкість повітряного потоку, температура повітря. Встановлено, що коефіцієнт надлишку повітря під час запалювання підвищується за збільшення ширини стабілізатора, діаметра газового отвору й температури повітря та зменшується за підвищення швидкості повітряного потоку, коефіцієнта затінення пальника. Експерименти показали, що підвищення інтенсивності турбулентності повітряного потоку негативно впливає на характеристики запалювання факелу й робить неможливим виконання надійних розрахунків характеристик запалювання.

Наведені експериментальні дані щодо характеристик запалювання факела від свічки поверхневого розряду й отримана експериментальна залежність дають змогу виконувати попередній розрахунок характеристик мікродифузійних стабілізаторних пальникових пристроїв з подачею газу в зону рециркуляції.

Ключові слова: стабілізаторний пальник, дифузійне горіння, запалювання факела, зона рециркуляції, швидкість повітря, температура.

Постановка проблеми. Газоподібне паливо, зокрема природний газ, широко використовується в багатьох галузях промисловості. Воно йде на потреби хімічної промисловості, використовується в об'єктах житлово-комунальної сфери, при виробництві сталі,

чавуну, цементу тощо. Значна частина природного газу спалюється в енергетичних і промислових котлах, печах, сушилах, підігрівачах різних типів.

Господарство України значною мірою залежить від імпорту цього коштовного продукту.

Так, у 2016 р. в Україні було спожито близько 32,3 млрд м³ газу, а видобуто – 19,9 млрд м³ [1, с. 92]. Найближчим часом використання газоподібного палива в енергетиці та промисловості України й світу буде продовжено. Підтвердженням тому є будівництво в європейських державах «Північного потоку-2» та «Південного потоку».

Тому одне з актуальних завдань під час використання коштовного природного газу, зокрема як палива, полягає в розробленні заходів щодо впровадження енергоефективних технологій спалювання за найбільш оптимальних схем організації топкового процесу.

Економічні й екологічні показники установки, у якій використовується природний газ як паливо, значною мірою визначаються характеристиками пального пристрою. Серед основних характеристик – висока повнота згоряння, низький вміст токсичних оксидів азоту, невеликий гідравлічний опір тощо. Однією з основних вимог є ефективна й надійна робота в широкому діапазоні режимів.

Так, відповідно до ГОСТу 21204-87 [2, с. 2] коефіцієнт робочого регулювання промислових пальників повинен бути $K_{pp} = 5$ ($K_{pp} = N_{ном} / N_{min}$, де $N_{ном}$, N_{min} – номінальна й мінімальна теплова потужність пальника). Водночас умови реальної експлуатації пальників вимагають значно ширшого діапазону запалювання факела й сталої роботи. Наприклад, коефіцієнт надлишку повітря в газотурбінній установці $\alpha = 2 \div 3$, а на режимі пуску $\alpha \approx 30$ [3, с. 4]; сушіння обмурівки стаціонарного парового котла для запобігання «термічного» удару відповідно до вимог РД 34.26.201 [4, с. 2] починається з температури $t_c = 150^\circ\text{C}$, що відповідає коефіцієнту надлишку повітря $\alpha \approx 20$; підігрівання газів у блоці допалювальних пристроїв, які встановлюються перед котлом-утилізатором парогазової установки, відбувається за температури $80 \div 210^\circ\text{C}$ [5, с. 155].

Таким чином, актуальність роботи обумовлена потребою в розробленні пального пристроїв широкого призначення, які забезпечують ефективну роботу у визначеному діапазоні режимів, а також надійне запалювання факела й стабілізацію горіння в широкому діапазоні навантажень палива.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В енергетиці та промисловості для організації робочого процесу спалювання палива традиційно використовуються реєстрові пального пристрої з подачею газових струменів у потік повітря, який закручується за допомогою лопаток-реєстрів, що повернуті під певним кутом до направлення

повітряного потоку. Закрутка повітряного потоку реєстром забезпечує високо інтенсивний процес сумішоутворення палива з повітрям, що дає змогу отримати відносно коротку довжину факела і високу теплову напругу топкового об'єму. До недоліків реєстрових пального пристроїв можна віднести значний гідравлічний опір, а також високу чутливість повноти згоряння до зміни коефіцієнта надлишку повітря. Так, за відхилення складу суміші від оптимального повнота згоряння різко погіршується, а за $\alpha > 2,0$ (для метану) горіння стає неможливим [6, с. 512].

У випадках, коли паливний пристрій за умовами експлуатації повинен працювати зі змінним α (камери згоряння газотурбінних установок, топки сушильних агрегатів тощо), необхідно встановлювати черговий паливний пристрій, що ускладнює конструкцію основного пального пристрою й регулювання процесу горіння.

Однією зі схем організації процесу горіння під час роботи зі змінним коефіцієнтом надлишку повітря в широкому діапазоні режимів є спалювання газу в системі погано обтічних тіл – стабілізаторів з різними схемами подачі газу й повітря. Такий метод спалювання реалізується за розроблення камер згоряння газотурбінних установок [7, с. 28], у прямокутних камерах згоряння повітряно-реактивних двигунів [8, с. 9; 9, с. 11; 10, с. 592], форсажних камерах згоряння [11, с. 341; 12, с. 36; 13, с. 217].

За однією зі схем пального пристроїв газове паливо подається в зону рециркуляції за стабілізаторами, що оббігаються повітряним потоком. Такий підхід використовується, наприклад, в камерах згоряння проміжного підігріву газів [14, с. 84; 15, с. 54; 16, с. 108; 17, с. 10], за розроблення когенераційно-утилізаційних технологій на базі газотурбінних установок (ГТУ) [18, с. 86; 5, с. 158].

У дифузійно-стабілізаторних пального пристроїв паливо подається в зону рециркуляції розподілено вздовж висоти стабілізатора з колектора (рис. 1) [14, с. 84] або з самого стабілізатора, якщо він порожнистий.

Процес горіння відбувається в умовах багатоструменевого сумішоутворення з накладанням на факел поля інтенсивної турбулентності, що генерується рециркуляційною зоною за погано обтічним тілом – стабілізатором.

Проведені дослідження показали, що завдяки високому рівню турбулентності в зоні зворотних потоків відбувається інтенсивне перемішування палива з повітрям. Газ розсіюється по всьому об'єму зони, утворюючи суміш, яка горить в

режимі, що є близьким до режиму горіння попередньо перемішаних сумішей. Але інтенсивність сумішоутворення є недостатньою, склад суміші відрізняється від гомогенного складу. Тому палинкові пристрої такого типу належать до проміжної групи, яка має загальні риси кінетичних і дифузійних палиників, а характеристики робочого процесу визначаються кінетичними та дифузійними параметрами, зокрема сталість горіння забезпечується за $\alpha > 2,0$ (для метану).

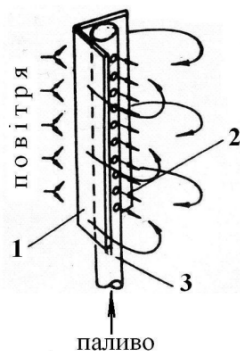


Рис. 1. Схема палинкового пристрою з розподіленою подачею газу в слід за стабілізатором: 1 – стабілізатор; 2 – газіві струмені; 3- газовий колектор

Як відомо, процес горіння суміші палива й окислювача може бути реалізований, перш за все, за умови, коли в палинику є зони, де суміш перебуває в концентраційних межах розповсюдження полум'я, швидкість потоку менше швидкості розповсюдження полум'я, а теплова потужність запального джерела є достатньою для ініціації хімічної реакції горіння – забезпечення необхідної енергії активації [13, с. 69].

В паливоспалювальних пристроях завжди використовується примусове запалювання горючої суміші, температура якої, як правило, значно менша від температури горіння. У цьому випадку від стороннього джерела запалюється невелика частка від загального об'єму суміші.

Запалювання факела в палинкових пристроях можна виконувати з використанням пілотного факела, розжареного тіла, електричної свічки, кільцевого факельного стабілізатора тощо [8, с. 262]. Завдяки зручності та високій надійності в стабілізаторних палиниках часто використовується електроіскрове запалювання факела [13, с. 226; 19, с. 380].

Електричну іскру, яка утворюється між електродами, можна розглядати як невелике розжарене тіло, температура якого доходить до 6000–20000 К [13, с. 47]. Чим вище температура й розміри іскро-

вого проміжку, тим ефективніше відбувається процес запалювання. Крім того, електричний розряд викликає іонізацію довколишнього середовища з утворенням великої кількості вільних атомів і радикалів, що поліпшує запалювання й підвищує швидкість реакції горіння.

Оглядовий матеріал щодо вимушеного запалювання потоку газоповітряної суміші від електричного розряду наведено в [10, с. 463, 469]. Під час іскрового запалювання є мінімальна потужність розряду, який потрібен для початку реакції, причому ця потужність залежить як від параметрів суміші (концентрації пального й окисника, густини, температури суміші, коефіцієнта надлишку повітря), так і від швидкості й турбулентності потоку суміші.

Загальна теплова енергія розряду, яка потрібна для запалювання суміші, що рухається, дорівнює [10, с. 474, 469]:

$$Q = Q_0 + A \cdot u^{1.5}, \quad (1)$$

$$Q_0 \sim \frac{\lambda_r^3 T_n^2 (T_r - T_n)}{u_n^3 \rho_n^2 C_p}, \quad (2)$$

де Q_0 – енергія запалювання нерухокої суміші, A – дослідний коефіцієнт, u – швидкість потоку, u_n – нормальна швидкість розповсюдження полум'я, T_n , ρ_n , C_p – температура, густина й теплоємність свіжої суміші, T_r – температура горіння, λ_r – коефіцієнт теплопровідності продуктів горіння.

З наведених даних видно, що необхідна для запалювання потоку суміші енергія іскри збільшується з підвищенням швидкості повітряного потоку й потрібного підігрівання суміші до температури займання.

Водночас огляд моделей запалювання свідчить, що наведені залежності є якісними характеристиками й за ними неможливо виконувати попередній розрахунок робочих параметрів під час іскрового запалювання факела в палинковому пристрої, тому перевага надається експериментальним дослідженням.

З точки зору практичного використання системи запалювання доцільно після одноразового запалювання суміші палива й повітря забезпечити безперервне запалювання горючої суміші, що надходить в палиник.

В дифузійно-стабілізаторних палиниках цей процес організовано завдяки використанню зони рециркуляції, що утворюється за стабілізатором.

Найвні моделі запалювання факела й стабілізації горіння під час спалювання попередньо

перемішаних сумішей й експериментальні дані розглянуто в роботах [8, с. 269; 9, с. 392; 10, с. 559; 11, с. 162]. В наведених роботах вказується, що теорія запалювання факела й стабілізації горіння з використанням зони рециркуляції розроблена недостатньо, а також що відсутня однакова система поглядів на механізм стабілізації.

Серед найбільш поширених напівемпіричних теорій запалювання паливо-повітряної суміші можна розглянути теплову теорію, що наведена, наприклад, в [9, с. 392].

За цією моделлю кількість тепла, яка необхідна для запалювання свіжої суміші дорівнює:

$$q_1 \sim w [\delta_i (\rho \cdot C_p) (T_i - T_0)], \quad (3)$$

де w – швидкість потоку, δ_i – товщина зони підготовки суміші; $(T_i - T_0)$ – різниця між температурою запалювання і температурою потоку; ρ – густина суміші, C_p – теплоємність суміші.

Якщо прийняти

$$\delta_i \sim \frac{a}{u_n}, \quad (4)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності, u_n – нормальна швидкість розповсюдження полум'я,

враховуючи, що

$$a = \frac{\lambda}{C_p \rho}, \quad (5)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності суміші, то

$$q_1 \sim w \frac{\lambda}{u_n} (T_i - T_0). \quad (6)$$

Кількість тепла, що передається із зони рециркуляції холодній суміші,

$$q_2 \sim \left\{ Re^c \frac{\lambda}{d} \right\} d (T_{n.3} - T_0) = \left\{ \left(\frac{dw}{v} \right)^c \frac{\lambda}{d} \right\} d (T_{n.3} - T_0), \quad (7)$$

де $(T_{n.3} - T_0)$ – різниця температури продуктів згорання та свіжої суміші; d – характерний розмір стабілізатора; v – коефіцієнт кінематичної в'язкості суміші; c – експериментальна величина.

Процес горіння є стабільним, якщо $q_1 > q_2$, критичні умови наступають за $q_2 = q_1$.

Після відповідних перетворень пропонується така залежність:

$$\frac{w_{зан}}{d^a} \sim \frac{1}{v^a} \left\{ \frac{u_n (T_{n.3} - T_0)}{(T_i - T_0)} \right\}^{1+a}, \quad (8)$$

де

$$a = \frac{1}{1 - C}.$$

Рівняння (8) враховує вплив розміру стабілізатора, тиску в пальнику (через v) і початкової температури суміші. Водночас не враховується зміна температури газів у зоні рециркуляції.

Під час розгляду питання сталості горіння за стабілізатором полум'я неоднорідних сумішей [20, с. 361] установлена можливість використання для визначення меж сталого горіння залежності вигляду:

$$\frac{W_{щ}}{\rho^m \cdot d^n} = \varphi (\alpha, T_0, c_k), \quad (9)$$

де d – характерний розмір стабілізатора; $\varphi (\alpha, T_0, c_k)$ – швидкість хімічної реакції за температури газу $T_{щ}$ в циркуляційній зоні за стабілізатором ($T_{щ} \approx 0,95 T_r$); c_k – концентрація кисню в суміші; T_r – температура горіння; $W_{щ}$ – швидкість суміші між стабілізаторами.

У граничні умови сталості горіння за стабілізатором під час подачі газу в зону рециркуляції з торця стабілізатора в роботі [21, с. 293] введені параметри, що використовуються для оброблення даних для дифузійних факелів:

$$\frac{W_{щ}}{B_{ст}} = f \left(\frac{B_{ст}^{1,75}}{d_r \cdot W_{щ}^{0,4} \cdot W_{r \min}^{0,54}} \right). \quad (10)$$

Таким чином, аналіз літературних даних [8–11] показує, що під час спалювання палива в повітрі за різними схемами сумішеутворення умови запалювання й стабілізації полум'я залежать практично від одних і тих самих параметрів. Різниця спостерігається тільки в значеннях емпіричних коефіцієнтів, що входять у відповідні формули. Під час подавання газу в зону рециркуляції за стабілізатором стабільність горіння залежить від режимних чинників – швидкості повітряного потоку, W_k ; температури повітря, T_n , а також конструктивних факторів – розміру стабілізатора $B_{ст}$, площі вихідного торця стабілізатора, $F_{ст}$, коефіцієнта затінення пальникового пристрою K_f ($K_f = B_{ст} / t_{ст}$, $t_{ст}$ – крок стабілізаторів в пальнику). В групу таких факторів можуть входити також параметри, які визначають структуру розподілення палива в зоні рециркуляції: діаметр газового отвору d_r , сумарна площа газових отворів у стабілізаторі F_r ; швидкість виходу газу з отворів W_r .

Постановка завдання. Метою досліджень було експериментальне дослідження особливостей

пускових характеристик паликових пристроїв стабілізаторного типу за струменевої подачі палива в зону рециркуляції з газоподавальних отворів, що розташовані у вихідній торцевій стінці стабілізатора й розподілені вздовж його висоти.

Виклад основного матеріалу дослідження. В роботі досліджувалися пускові характеристики палиників з такими геометричними параметрами: висота стабілізатора $H_{ст} = 100$ мм; ширина стабілізатора $B_{ст} = 15,5$ мм; 30 мм; 60 мм; коефіцієнт затінення паликового пристрою $K_f = 0,15$; 0,30; 0,45; 0,60; діаметр газоподавальних отворів $d_r = 2,1 \div 5,0$ мм; відносний крок розташування газових отворів $t_r / d_r = 1,8 \div 7,7$, де t_r – відстань між газовими отворами. Залежно від кількості газових отворів вони могли розташовуватись у декілька рядів. Розміри корпусу палиника в перерізі в місці встановлення стабілізаторів становили 100 мм × 200 мм.

В експериментах швидкість і температура повітряного потоку в корпусі палиника перед стабілізаторами змінювалась у діапазоні $W_k = 10 \div 100$ м/с; $t_n = 50 \div 80^\circ\text{C}$; 350°C ; 800°C .

Під час проведення досліджень щодо запалювання факела використовувалася свічка поверхневого розряду типу СПЕ-04-А й котушка запалювання КР-1 з живленням постійним током напругою 24 В.

Схема плоского порожнистого стабілізатора, а також подачі газу на горіння й розміщення кільцевого розрядного проміжку свічки наведено на рис. 2.

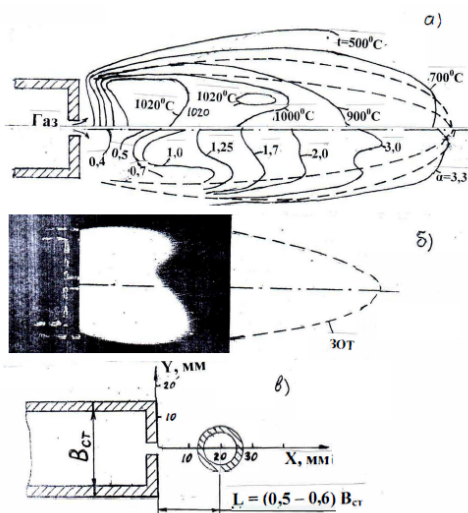


Рис. 2. Поля температур газів (t) і місцевого коефіцієнта надлишку повітря (α) за стабілізатором під час подачі газу в зону рециркуляції (а), вид факела на режимах запалювання (б) і схема розміщення кільцевого розрядного проміжку свічки (в)

У виборі місця розташування свічки враховувалися поля концентрацій і температур за стабілізатором під час подачі газу в зону рециркуляції. Як видно з рис. 2, а, під час подавання палива в зону рециркуляції відмічається нерівномірність концентрації палива й температури газів у зоні рециркуляції, причому значення місцевих коефіцієнтів надлишку повітря, які відповідають концентраційним межах горіння метану ($0,6 < \alpha < 2,0$), а також максимальні значення температури газів спостерігаються вздовж осьової лінії зони зворотних токів поблизу стабілізатора. Завдяки цьому на режимах зі зменшеною витратою палива факел може займати тільки частину зони рециркуляції (рис. 2, б). У зв'язку з цим іскровий проміжок свічки розташовувався вздовж осі сліду за стабілізатором на відстані $L = (0,5 - 0,6) \cdot B_{ст}$ (рис. 2, в).

Як показали випробування, за такого розташування свічки спостерігається найменша витрата газу, що необхідна для запалювання факела.

На рис. 3 наведено порівняльні дані щодо запалювання факела й бідного зриву залежно від швидкості повітряного потоку, що обтікає стабілізатор. У зв'язку з тим, що для ініціювання реакції горіння необхідно підвести до системи додаткову енергію активації, запалювання факела завжди відбувається за витрат палива приблизно на 20–30 % більше, ніж бідний зрив.

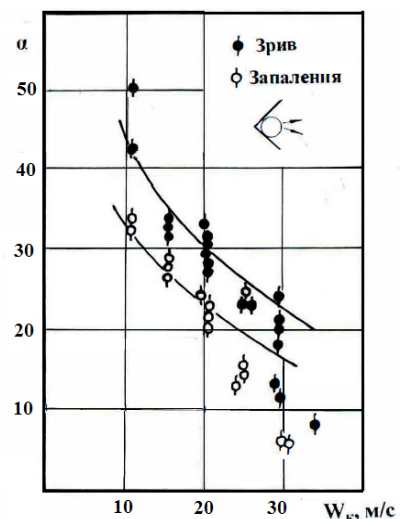


Рис. 3. Порівняння даних щодо запалювання й бідного зриву факела за стабілізаторами

Як видно з рис. 3, значення загального коефіцієнта надлишку повітря в палинику під час запалювання факела $\alpha_{зап}$ значно більше одиниці й виходить за концентраційні межі горіння. Це пов'язано з тим, що паливо виходить з газоподавальних отворів з порівняно невеликою

швидкістю й відповідно газові струмені мають обмежену далекобійність. У такому випадку в процесі сумішоутворення бере участь не все повітря, що обтікає стабілізатор, а тільки та його частина, що протікає в граничному шарі біля бокової поверхні стабілізатора. Як результат місцеві коефіцієнти надлишку повітря (рис. 2, а) значно менші, ніж загальний коефіцієнт надлишку повітря в пальнику.

Результати експериментальних даних щодо залежності характеристики запалювання факела від швидкості повітряного потоку й ширини стабілізатора за незмінного коефіцієнта затінення наведено на рис. 4.

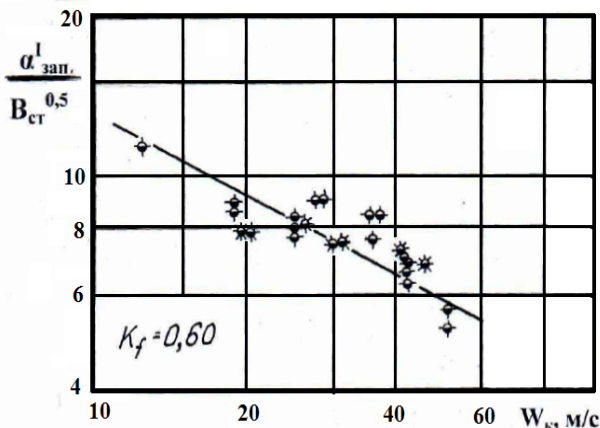


Рис. 4. Вплив на характеристики запалювання факела ширини стабілізатора B_{ct} і швидкості повітряного потоку W_k

Було встановлено, що під час запалювання (як і у випадку бідного зриву) факела можна використовувати залежність, отриману після оброблення результатів досліджень сталості горіння гомогенних сумішей виду:

$$\alpha_{zap} = const \cdot \frac{B_{cm}^n}{W_k^m} \quad (11)$$

На рис. 5 представлено результати експериментальних досліджень щодо запалювання факела за різних коефіцієнтів затінення пальника, де за відносну температуру повітря прийнято $\bar{T}_n = T_n / 273$.

Як витікає з наведених даних, за $B_{ct} = const$ і $W_k = const$, а також збільшення коефіцієнта затінення K_f характеристики запалювання факела погіршуються. Це пов'язано з тим, що через збільшення K_f (зменшення відстані між стабілізаторами) підвищується швидкість повітря між стабілізаторами й витрата його в зону рециркуляції, що спричинює підвищення коефіцієнта надлишку повітря в зоні $\alpha_{rec} \sim K_f \cdot (1 + K_f)$ [22, с. 6].

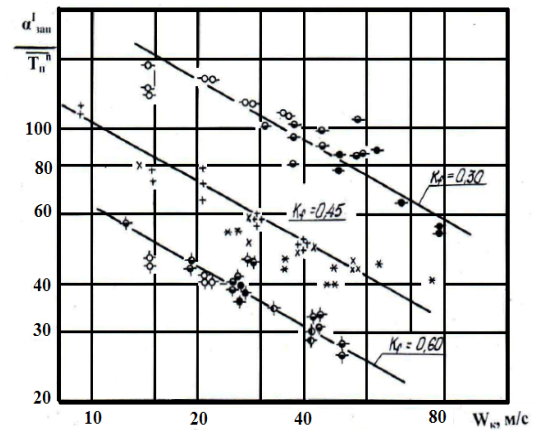


Рис. 5. Характеристики запалювання факела за різних коефіцієнтів затінення пальникового пристрою K_f

На рис. 6 наведено дані щодо запалювання факела за різної температури повітряного потоку.

Як показали дослідження в діапазоні температур повітря $t_n = 70 \div 800^\circ C$, характеристики запалювання зі зростанням t_n поліпшуються, тобто коефіцієнт надлишку повітря під час запалювання α_{zap} збільшується. Це пов'язано з тим, що за підвищення температури повітря збільшується нормальна й турбулентна швидкості полум'я, розширюються межі сталого горіння суміші, зменшуються величина енергії активації, яка необхідна для ініціювання реакції горіння, та кількість теплоти зони рециркуляції, що йде на підігрів суміші до температури запалювання. Також скорочується період затримки запалювання.

Водночас з рис. 6 видно, що зі збільшенням K_f від 0,3 до 0,6 ступінь впливу t_n на зниження α_{zap} зменшується.

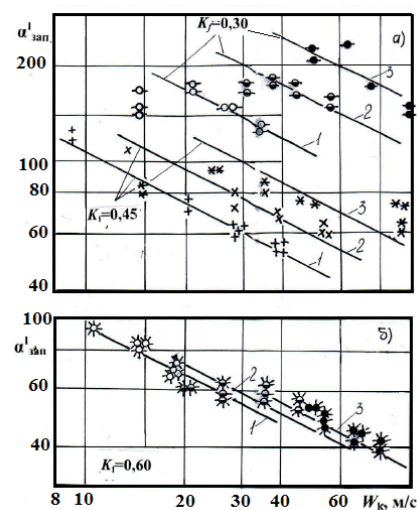


Рис. 6. Характеристики запалювання факела за різної температури повітряного потоку t_n і коефіцієнта затінення K_f

Це пов'язано з тим, що в разі незмінної витрати повітря $G_{п} = \text{const}$ і $W_{к} = \text{const}$ за збільшення коефіцієнта затінення K_f підвищується швидкість повітря між стабілізаторами й відповідно інтенсивність масообмінних процесів у зоні рециркуляції, а також витрата теплоти зони зворотних токів на підігрів свіжої суміші до температури запалювання факела.

Вплив температури повітряного потоку на характеристики запалювання факела за різних коефіцієнтів затінення можна представити у вигляді $\alpha_{зап} \sim (T_{п} / 273)^p$, де показник ступеня $p = (1,3 - 2 \cdot K_f)$.

В результаті аналізу експериментальних даних щодо впливу режимних і конструктивних факторів на характеристики запалювання факела від свічки поверхневого розряду в досліджених стабілізаторних пальникових пристроях з подачею газу в зону рециркуляції встановлена залежність виду

$$\alpha_{зап}^I = K_{зап} \frac{B_{cm}^m}{W_{к}^n \cdot d_z \cdot K_f (1 + K_f)} \left(\frac{T_{п}}{273} \right)^{1,3 - 2K_f} \quad (12)$$

Під час оброблення дослідних даних розмірність параметрів є такою: $W_{к}$, м/с; $B_{ст}$, мм; d_z , мм; $T_{п}$, К, $m = n = 0,5$.

Як встановлено, для систем стабілізаторів за інтенсивності турбулентності повітряного потоку $\epsilon = 1,5\%$ дослідний коефіцієнт $K_{зап} = 117$.

Отримані експериментальні дані для випробуваних систем стабілізаторів представлені на рис. 7 у вигляді залежності параметра запалювання $\Pi_{зап}$ від швидкості повітряного потоку:

$$\Pi_{зап} = \frac{\alpha_{зап}^I d_z K_f (1 + K_f)}{B_{cm}^m (\bar{T}_{п})^n} \quad (13)$$

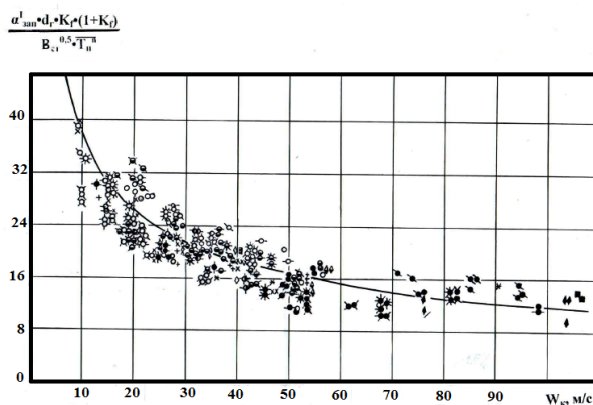


Рис. 7. Залежність параметра запалювання $\Pi_{зап}$ для досліджених варіантів стабілізаторних пальникових пристроїв з подачею газу в зону рециркуляції від швидкості повітряного потоку перед пристроєм

Проведені дослідження виявили вплив на характеристики запалювання факела турбулентності повітряного потоку.

Встановлено, що в разі підвищення інтенсивності турбулентності повітряного потоку ϵ перед пальниковим пристроєм характеристики запалювання факела погіршуються та за $\epsilon = 6\%$ значення $(K_{зап})_{6\%} = (0,4 \div 0,6) \cdot (K_{зап})_{1,5\%}$ і можна прийняти, що за $\epsilon = 6\%$ у формулі (12) $K_{зап} = 55$.

Також встановлено, що за $\epsilon = 6\%$ для стабілізаторів шириною $B_{ст} \leq 30$ мм в разі збільшення швидкості повітряного потоку $Re > 1 \cdot 10^4$ (де $Re = W_{ш} \cdot B_{ст} / \nu_{п}$) значення показника ступеня m за швидкості повітря значно збільшується ($m \gg 0,5$) і закономірності запалювання факела достовірно встановити практично неможливо в зв'язку з великим розкиданням експериментальних даних. Таким чином, у випадку розвиненої турбулентності повітря запалення факела в системі стабілізаторів необхідно виконувати за зменшеної швидкості повітряного потоку. В разі зміни потужності іскрового запальника змінюються кількісні границі запалювання, але водночас можуть також бути використані дані щодо впливу конструктивних і режимних факторів на характеристики запалювання факела в стабілізаторних пальникових пристроях [13, с. 47].

Висновки. В результаті проведення експериментальних досліджень щодо визначення характеристик запалювання факела в стабілізаторних пальникових пристроях з подачею газу в зону рециркуляції встановлено, що коефіцієнт надлишку повітря під час запалювання підвищується за збільшення ширини стабілізатора й температури повітряного потоку, зменшення швидкості повітря й коефіцієнта затінення пальника. Слід узяти до уваги, що за незмінних розмірів корпусу пальника збільшення розміру стабілізатора призводить до збільшення коефіцієнта надлишку повітря під час запалювання, але одночасно з цим збільшується коефіцієнт затінення пальника, що спричинює погіршення характеристик запалювання. В роботі запропоновано узагальнюючу залежність пускових характеристик пальників від геометричних і режимних параметрів системи. Встановлено значний вплив на характеристики запалювання факела інтенсивності турбулентності повітряного потоку. Для надійного запалювання факела рекомендовано зменшувати швидкість повітряного потоку в пальнику. Результати роботи щодо впливу конструктивних і режимних факторів на характеристики запалювання факела в стабілізаторних пальникових пристроях можуть бути використані для інших конструкцій іскрових запальників.

Список літератури:

1. Каверцев В.Л. Обзор проблем эффективного использования паливно-енергетических ресурсов в промышленном секторе Украины та можливості оптимального їх використання / В.Л. Каверцев, В.О. Дягілев. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». 2017. № 10 (1232). С. 92–96.
2. ГОСТ 21204-83. Горелки газовые промышленные. Классификация. Общие технические требования, маркировка. Москва : Изд-во стандартов, 1986. 11 с.
3. Христин В.А., Любчик Г.Н. Газогорелочные устройства для сжигания газа при высоких и переменных избытках воздуха : *Научно-технический обзор*. Серія «Использование газа в народном хозяйстве». Вып. 10. Москва : ВНИИ Эгазпром, 1978. 60 с.
4. РД 34.26.201. Временная инструкция по сушке обмуровок стационарных котлов ТЭС. Москва : СПО Союзтехэнерго, 1980. 6 с.
5. Постникова А.М. Принципы конструирования блока дожигающих устройств для высокоэффективной парогазовой установки на базе двигателя НК-37 / А.М. Постников и др. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2007. № 2. С. 155–160.
6. Христин В.А. Влияние дежурной горелки на устойчивость и полноту горения факела / В.А. Христин, Ю.Н. Башкатов. *Теория и практика сжигания газа*. Вып. II. Ленинград : Недра, 1964. С. 510–516.
7. Сударев А.В., Маев В.А. Камеры сгорания газотурбинных установок. Интенсификация горения. Ленинград : Недра, 1990. 274 с.
8. Ильяшенко С.М., Талантов А.В. Теория и расчет прямоточных камер сгорания. Москва : Машиностроение, 1964. 306 с.
9. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Б.В. Раушенбах и др. Москва : Машиностроение, 1964. 526 с.
10. Щетинков Е.С. Физика горения газов. Москва : Наука, 1965. 739 с.
11. Основы проектирования и характеристики газотурбинных двигателей / под ред. У.Р. Хауторна, У.Т. Олсона. Москва : Машиностроение, 1961. 648 с.
12. Чигрин В.С. Конструкция форсажных камер и выходных устройств авиационных ГТД / В.С. Чигрин, С.Е. Белова. Рыбинск : РГАТА, 2004. 38 с.
13. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Москва : Машиностроение, 1984. 280 с.
14. Цанев С.В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов. Москва : Изд-во МЭИ, 2002. 584 с.
15. Горелочное устройство для котла-утилизатора ПГУ-800 / А.Д. Горбатенко и др. *Теплоэнергетика*. 1989. № 5. С. 54–58.
16. Шатиль А.А. Расчетное исследование топочных устройств. Санкт-Петербург : НПО ЦКТИ, 2003. 150 с.
17. Хоменок Л.А. Создание горелочных устройств камер дожига котлов-утилизаторов ПГУ-ТЭЦ. *Теплоэнергетика*, 2007. С. 10–16.
18. Когенерационно-утилизационные технологии на базе газотурбинных установок / Г.Н. Любчик и др. Киев : Варта, 2008. 188 с.
19. Meherwan P. Boyce. *Gas Turbine Engineering Handbook*. Gulf Professional Publishing, USA, 2002. 816 p.
20. Лебедев Б.П. О стабилизации пламени неоднородных смесей / Б.П. Лебедев, И.Ю. Доктор. *Горение и взрыв* : материалы третьего всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. 5–10 июля 1971 г. Москва : Наука, 1972. С. 361–365.
21. Христин В.А. Некоторые особенности развития и горения газовой струи в циркуляционной зоне за стабилизатором / В.А. Христин, Г.Н. Любчик. *Теория и практика сжигания газа*. Вып. III. Ленинград : Недра, 1967. С. 283–295.
22. Бутовский Л.С. Влияние режимных и конструктивных факторов на диффузионное сжигание газа за стабилизаторами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.04.01 «Парогенераторостроение, гидротурбостроение и парогазотурбостроение» ; Киевский политехнический институт. Киев, 1983. 16 с.

Chernousenko O.Yu., Butovsky L.S., Hranovska O.O., Moroz O.S., Starchenko O.S.
STARTING CHARACTERISTICS OF STABILIZER BURNING DEVICES
WHEN FUEL GAS SUPPLY IN THE RECIRCULATION ZONE

The article presents the results of experimental studies of the characteristics of torch ignition in microdiffusion burners, consisting of a system of poorly streamlined bodies – stabilizers, between which there is an air flow.

The combustion fuel is fed into the recirculation zone through a system of openings made in the output face of the stabilizer along its height. In experiments, the ignition of the flame was carried out from an aviation candle with a circular surface discharge gap. An electric candle was located at the end of one of the stabilizers. As a result of the research, the optimal location of the annular discharge gap of the candle was established, which provided reliable ignition at the minimum velocity of gas jets, that is fuel consumption, which corresponds to the maximum coefficient of excess air in the burner. It is established that the coefficient of excess air during ignition increases with the width of the stabilizer, the diameter of the gas hole and the temperature of the air, and decreases with increasing of the air velocity and of the coefficient of shading of the burner. The experiments have shown that increasing of the intensity of air turbulence adversely affects the torch ignition characteristics and makes it impossible to perform reliable calculations. The experimental data on the characteristics of the torch ignition from a surface discharge candle and obtained the experimental dependence makes it possible to perform a preliminary calculation of the characteristics of microdiffusion stabilizer burners with gas supply to the recirculation zone.

Key words: *stabilizer burner, diffusion combustion, torch ignition, recirculation zone, air velocity, temperature.*