

УДК 533.601:502.36
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/22>

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»

ВПЛИВ РІЗНОЙМЕННОЇ ЗАКРУТКИ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ НА МЕЖІ СТАЛОЇ РОБОТИ СТАБІЛІЗАТОРНОГО ПАЛЬНИКА ПРИ МІКРОДИФУЗІЙНОМУ СПАЛЮВАННІ ГАЗУ

У статті наведено результати експериментальних досліджень характеристик запалювання факела і бідного зриву в пальникових пристроях стабілізаторного типу, в яких стабілізатори обтікаються різномірно закрученими повітряними потоками при мікродифузійному спалюванні газу з подачею палива в зону рециркуляції через систему отворів, що розподілено розташовані вздовж стабілізатора. Дослідження проведені з випробуваннями лінійного стабілізатора шириною 45 мм при зміні кута різномірної закрутки повітряного потоку $\varphi = 0^\circ; \pm 30^\circ; \pm 45^\circ; \pm 60^\circ; \pm 70^\circ$, а також кільцевого стабілізатора шириною 40 мм при кутах $\varphi = 0^\circ; \pm 30^\circ; \pm 45^\circ$. Встановлено, що при цьому змінюються структура зони рециркуляції і ближнього сліду за стабілізатором. Дослідження показали, що при закрутці повітряного потоку з'являються складники швидкості потоку по всім осям координат, а при $\varphi > 60^\circ$ зона рециркуляції вироджується в систему вихорів уздовж стабілізатора. Зі збільшенням кута закрутки повітряного потоку інтенсифікуються процеси масообміну по всьому перерізу камери згоряння і за стабілізатором, що призводить до підвищення інтенсивності турбулентності повітря. Внаслідок інтенсифікації процесів масообміну при збільшенні кута закрутки повітря погіршуються характеристики запалення факела і бідного зриву полум'я. Була встановлена залежність характеристик сталості факела від кута різномірної закрутки повітря. Наведені експериментальні дані щодо характеристик запалювання факела і бідного зриву полум'я й отримані узагальнюючі залежності, які дають змогу виконувати попередній розрахунок характеристик мікродифузійних стабілізаторних пальникових пристроїв із подачею газу в зону рециркуляції при різномірній закрутці повітряних потоків, що оббігають стабілізатор.

Ключові слова: стабілізаторний пальник, дифузійне горіння, запалювання факела, бідний зрив, зона рециркуляції, швидкість повітря, різномірною закрутка повітря.

Постановка проблеми. Одним із найбільш ефективних методів підвищення економічності циклу газотурбінних (далі – ГТУ) і парогазових установок (далі – ПГУ) є підвищення тиску та температури газів перед турбіною. Так, збільшення температури робочого тіла до $1300 \div 1500$ °С дає змогу

підвищити термічний коефіцієнт корисної дії ГТУ до 40 % [1, с. 241], а ПГУ – до $58 \div 60$ % [1, с. 243]. Отримання високотемпературних газів відбувається в камері згоряння, від надійності роботи та економічності якої значною мірою залежать характеристики енергетичної установки загалом.

Так, необхідність підвищення робочого тіла до $1300 \div 1500$ °С зумовлює зменшення загального коефіцієнта надлишку повітря в циклі до $\alpha \approx 1,9 \div 2,5$ [2, с. 23]. Такі режими реалізуються при організації кінетичного режиму горіння попередньо перемішаної гомогенної суміші палива (газу) і повітря. При цьому варто брати до уваги, що горіння повністю перемішаної гомогенної суміші може відбуватись у доволі вузькому діапазоні зміни коефіцієнту надлишку повітря – для метану $\alpha = 0,65 \div 1,8$ [3, с. 69].

Водночас камера згорання має забезпечити надійну роботу установки в умовах значної зміни температури вихідних газів, а, значить, коефіцієнта надлишку повітря в широкому діапазоні режимів, наприклад, при пуску, останову та перехідних режимах при $\alpha = 3,0 \div 30$ в ГТУ та $\alpha = 1,0 \div 10$ – в ПГУ [4, с. 4]. Це вимагає використання у всій камері або в її окремих елементах дифузійного механізму спалювання, при якому є можливість роботи в широкому діапазоні режимів [5, с. 111]. Водночас при дифузійному механізмі спостерігається порівняне збільшення довжини факела і підвищений вихід оксидів азоту [3, с. 104].

Вирішення проблеми забезпечення можливості роботи камери згорання в широкому діапазоні режимів вимагає пошуків її раціональної конструкції, що своєю чергою пов'язане зі знанням фізико-хімічних проблем, які відбуваються в робочому просторі камери згорання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Необхідність покращення економічних і екологічних характеристик камери згорання, а також показників надійності вимагає інтенсифікації всіх процесів, які відбуваються в камері згорання. Підвищення інтенсивності робочого процесу в камері згорання являє собою комплексну проблему, під час вирішення якої враховуються основні стадії робочого процесу – подача палива і повітря в зону горіння, змішування компонентів, процес запалювання факела, стабілізація горіння, екологічні характеристики тощо.

Одним із поширених конструктивних підходів, які використовують відомі газотурбінні фірми, є збільшення поверхні фронту горіння шляхом зменшення розмірів характерних елементів паливкового пристрою і збільшення їх кількості, тобто перехід до багатопаливкових модульних камер згорання [6, с. 23]. Своєю чергою в модулях використовується кінетичний, дифузійний або комбінований механізм організації горіння палива [7, с. 27; 8, с. 511]. При

цьому варто брати до уваги, що зменшення розмірів характерних елементів модульного паливника є можливим до певної межі, після якої виникають ускладнення із забезпеченням повного вигорання палива, сталості факела, рівномірності роздачі палива і повітря між окремими модулями тощо.

Одним із підходів до створення модульної камери згорання, в якій реалізується високоінтенсивне горіння палива, є використання мікрофакельного дифузійного спалювання газу за стабілізаторами, що обтікаються різнойменно закрученими повітряними потоками повітря [9, с. 65; 10, с. 49]. Використання різнойменно закрутки повітряного потоку дало змогу значно підвищити інтенсивність масообмінних і хімічних процесів у зоні горіння, що дало змогу зменшити довжину камери згорання. Водночас відсутні систематизовані дані щодо впливу різнойменно закрутки на характеристики сталого горіння в прийнятій системі.

Постановка завдання. Метою досліджень було експериментальне дослідження особливостей запалювання факелу стабілізації горіння в процесі мікродифузійного спалювання газу за стабілізаторами, що обтікаються різнойменно закрученими повітряними потоками в умовах струменевої подачі газу в зону рециркуляції стабілізаторів із газоподаючих отворів, що розташовані у вихідній торцевій стінці стабілізатора розподілено вздовж його довжини.

Виклад основного матеріалу досліджень. У роботі досліджувались режими сталої роботи лінійного і кільцевого стабілізаторних паливкових пристроїв, схеми яких наведені на рис. 1.

Лінійний стабілізатор мав такі геометричні характеристики: довжина робочої ділянки $L_k = 1000$ мм, ширина каналу в ділянці розміщення стабілізатора $B_k = 150$ мм, ширина стабілізатора $B_{ct} = 45$ мм, коефіцієнт затінення каналу $K_f = B_{ct} / B_k = 0,30$. Газ подавався через систему отворів діаметром $d_r = 4,0$ мм, відношення площі вихідного торця стабілізатора до площі газоподаючих отворів $F_{ct} / F_r = 86,84$. Під час випробувань кут різнойменного закручування повітряних потоків, що обтікають стабілізатор з обох боків, змінювався в діапазоні $\varphi = 0^\circ; \pm 30^\circ; \pm 45^\circ; \pm 60^\circ; \pm 70^\circ$. Параметри кільцевого стабілізатора були такими: $B_k = 100$ мм, $B_{ct} = 40$ мм, $K_f = 0,4$; середній діаметр осі стабілізатора $D_{ct} = 400$ мм, кривизна кола за середнім діаметром $k = 1/R_{ct} = 5,0$ 1/м; $\varphi = 0^\circ; \pm 30^\circ; \pm 45^\circ$; $d_r = 3,0$ мм, $F_{ct} / F_r = 82,76$.

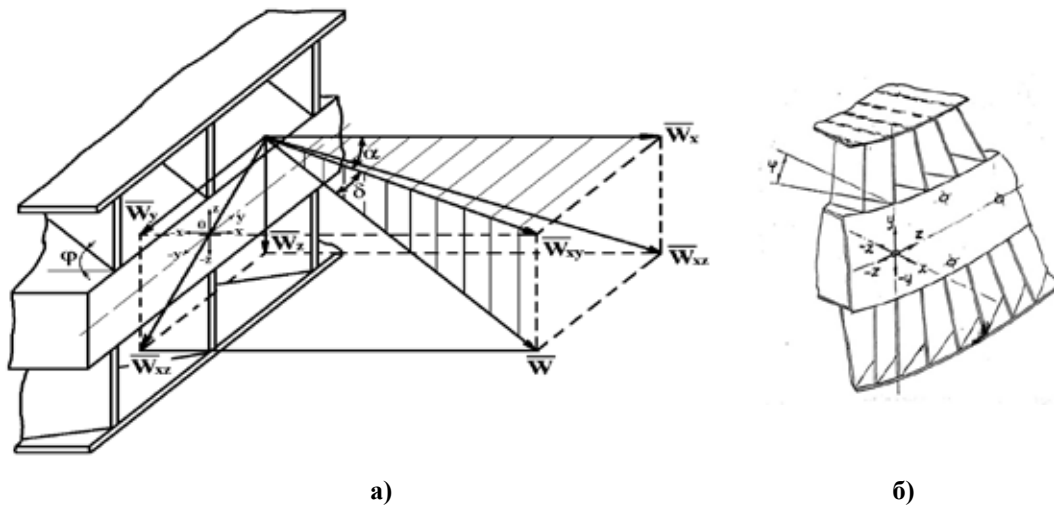


Рис. 1. Схема лінійного (а) і кільцевого (б) мікродифузійного стабілізаторного пристрою в разі обтікання стабілізатора різнойменно закрученими повітряними потоками

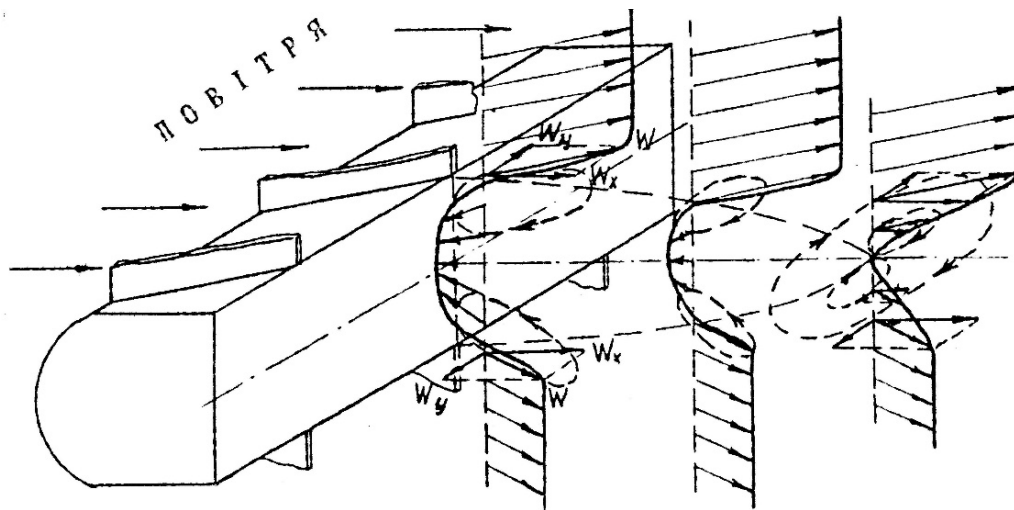


Рис. 2. Розподілення складників швидкості повітряних потоків за стабілізатором при різнойменній закрутці

На рис. 1,а для верхнього каналу показані складники вектора швидкості повітря W по осях x , y , z . За такими ж складниками розглядались турбулентні складники швидкості. Швидкість повітряного потоку в різних напрямках вимірювалась за допомогою сферичного зонду конструкції ЦКТП, турбулентні пульсації потоку – за допомогою термоанемометра СТБ.

На рис. 2 наведено розподілення векторів швидкості повітряних потоків у близькому сліді за стабілізатором. Експериментальні дослідження показали, що при закрутці повітряного потоку процеси масообміну в близькому сліді за стабілізатором характеризуються появою осереднених і пульсаційних складників швидкості вздовж всіх осей координат, а також утворенням додаткових вихорів вздовж стабілізатора. Із збільшенням кута різнойменної закрутки повітря

довжина зони рециркуляції зменшується, а при $\varphi > \pm 60^\circ$ зона практично вироджується в систему хаотичних вихорів за стабілізатором.

Аналіз результатів вимірювань інтенсивності турбулентності повітряного потоку за стабілізатором $\varepsilon_{xz} = \frac{\sqrt{(W')^2}}{W_i}$ вздовж перерізу каналу при різних кутах повороту повітряного потоку показано на рис. 3.

Заслуговує на увагу той факт, що з ростом кута $\pm \varphi$ рівень інтенсивності турбулентності підвищується по всьому перерізу з максимумом у сліді за стабілізатором (рис. 3, а). Крім того, з ростом $\pm \varphi$ максимум $\varepsilon_{xz} = \frac{\sqrt{(W')^2}}{W_i}$ наближається до торця стабілізатора (рис. 3, б).

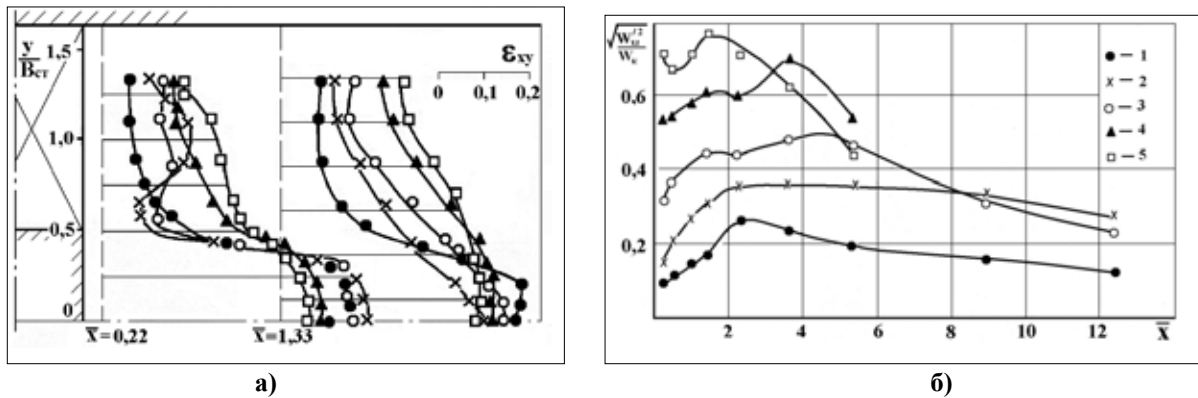


Рис. 3. Зміна інтенсивності турбулентності вздовж перерізу камери (а) та осі сліду за стабілізатором (б) при різних кутах закрутки потоку ($W_k = 15,3$ м/с); 1 – $\varphi = 0^\circ$; 2 – $\varphi = 30^\circ$; 3 – $\varphi = 45^\circ$; 4 – $\varphi = 60^\circ$; 5 – $\varphi = 70^\circ$

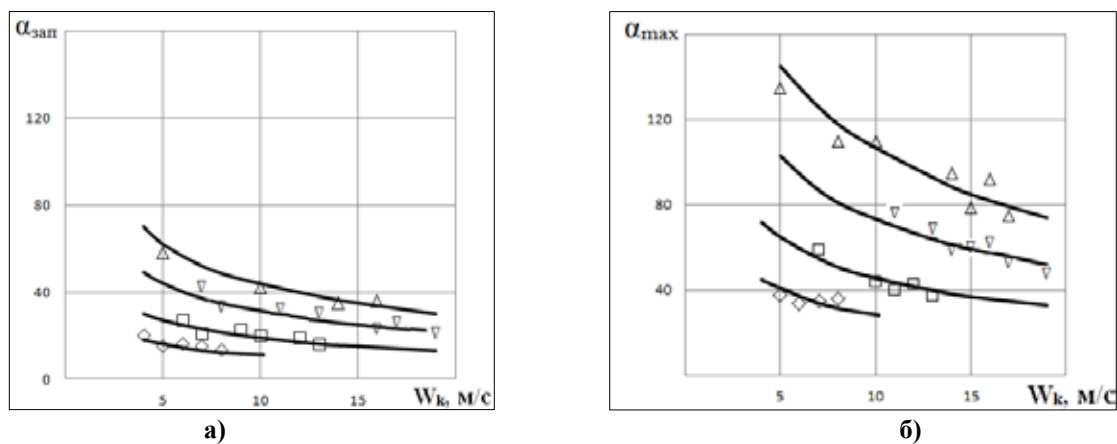


Рис. 4. Порівняння даних щодо запалення (а) і «бідного» зриву (б) факела за лінійним стабілізатором при різномірній закрутці повітряного потоку, що обтікає стабілізатор:
 Δ – $\varphi = \pm 30^\circ$; ∇ – $\varphi = \pm 45^\circ$; \square – $\varphi = \pm 60^\circ$; \diamond – $\varphi = \pm 70^\circ$

На рис. 4 для лінійного стабілізатора наведено порівняльні дані щодо запалення факела і бідного зриву залежно від швидкості повітряного потоку в камері перед стабілізаторами при різномірній закрутці повітряних потоків, що обтікають стабілізатор.

У зв'язку з тим, що для ініціювання реакції горіння необхідно підвести до газоповітряної суміші додаткову енергію активації, процес запалювання факела завжди відбувається при підвищених витратах палива щонайменше на 20–30% і більше, ніж бідний зрив. Аналогічні дані отримано і для кільцевого стабілізатора.

Як видно з рис. 4, спостерігається звичайна залежність падіння α_{zap} і α_{max} з ростом швидкості повітря. Варто зазначити також погіршення характеристик запалювання і бідного зриву факела при збільшенні кута різномірної закрутки повітряного потоку. З одного боку, це зумовлено збільшенням швидкості повітря на зрізі стабілізатора при незмінній витраті і швидкості повітря в камері

перед стабілізатором $G_n = const$ та $W_k = const$, а, з другого боку, додатковим погіршенням стабілізуючих можливостей зони рециркуляції, що пов'язано зі зменшенням її розмірів і теплової потужності, збільшенням пульсаційних складників швидкості і, як наслідок, інтенсифікацією масообмінних процесів, що протікають за стабілізатором, а також збільшенням витрати теплоти зони зворотних токів на підігрів свіжої суміші до температури запалення факела при збільшенні кута закрутки повітря.

Характеристики бідного зриву факела за стабілізатором визначались при поступовому зменшенні витрати газу після певного терміну сталої роботи. У результаті обробки експериментальних даних було знайдено, що залежність характеристик бідного зриву факела від кута різномірної закрутки повітряного потоку також можна визначити комплексом виду

$$\alpha_{max} \sim 1 / (1 + \text{tg}\varphi)^{1,5}$$

Після обробки і аналізу експериментальних даних щодо впливу режимних і конструктивних факторів на характеристики бідного зриву факела встановлено, що в стабілізаторних пальникових пристроях із подачею газу в зону рециркуляції розподілено вздовж стабілізатора можна використовувати залежність, наведену в [11] з урахуванням кута різнойменної закрутки повітряного потоку. Узагальнююча залежність має вигляд:

$$\alpha_{max} = K_{max} \frac{B_{cm}^{0,5} d_z^{0,35} \left(\frac{F_{cm}}{F_z} \right)^{0,2}}{W_k^m \cdot K_f (1 + K_f) (1 + tg\varphi)^{1,5}} \left(\frac{T_n}{273} \right)^{1,3-2K_f}, \quad (1)$$

На рис. 5 отримані експериментальні дані для випробуваних стабілізаторів представлені у вигляді залежності відношення α_{max} / Π_{max} від швидкості повітряного потоку перед стабілізатором:

$$\alpha_{max} / \Pi_{max} = f(W_k), \quad (2)$$

де Π_{max} – параметр бідного зриву,

$$\Pi_{max} = K_{max} \frac{B_{cm}^{0,5} d_z^{0,35} \left(\frac{F_{cm}}{F_z} \right)^{0,2}}{K_f (1 + K_f) (1 + tg\varphi)^{1,5}} \left(\frac{T_n}{273} \right)^{1,3-2K_f}, \quad (3)$$

При обробці дослідних даних розмірність параметрів є такою: W_k , м/с;

B_{cm} , мм; d_z , мм; T_n , К, $m = n = 0,5$.

Як встановлено, для досліджених стабілізаторів за інтенсивності турбулентності повітряного потоку $\varepsilon > 3,5\%$ дослідний коефіцієнт $K_{max} = 8,2$.

Під час досліджень щодо запалювання факела використовувались свічка поверхневого розряду типу СПЕ-04-А і котушка запалювання КР-1 з живленням постійним током напругою 24 В. Відповідно до рекомендацій [12] іскровий проміжок свічки при запалюванні факела встановлювався на відстані $L = (0,5 - 0,6) \cdot B_{cm}$.

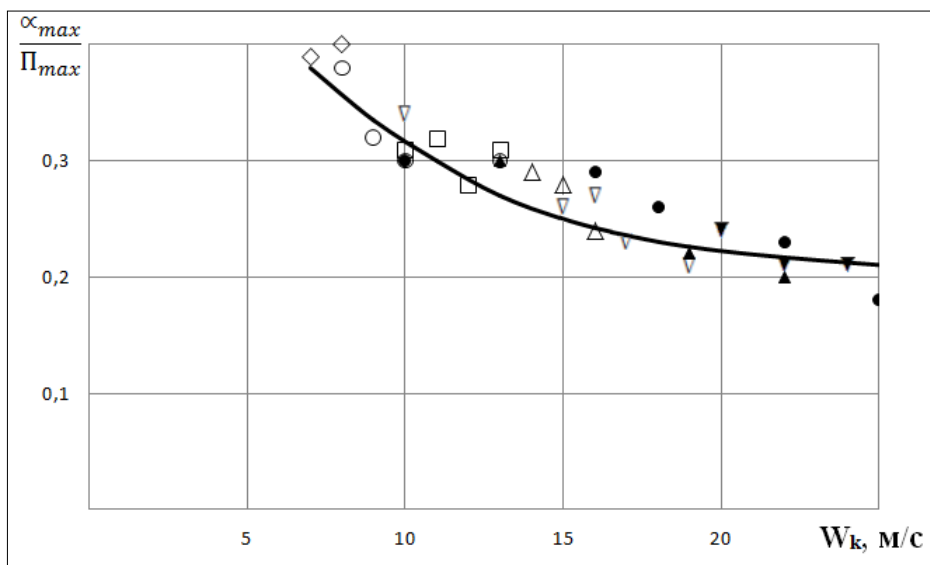
При обробці результатів досліджень із закрутою повітряного потоку знайдено, що залежність характеристики запалювання факела від кута різнойменної закрутки повітряного потоку можна визначити комплексом виду $\alpha_{зан} \sim 1 / (1 + tg\varphi)^{1,5}$.

У результаті аналізу експериментальних даних щодо впливу режимних і конструктивних факторів на характеристики запалювання факела від свічки поверхневого розряду встановлено, що в стабілізаторних пальникових пристроях із подачею газу в зону рециркуляції розподілено вздовж стабілізатора можна використовувати залежність, наведену в [12] з урахуванням кута різнойменної закрутки повітряного потоку. Узагальнююча залежність має вигляд:

$$\alpha_{зан} = K_{зан} \frac{B_{cm}^m}{W_k^n \cdot d_z \cdot K_f (1 + K_f) (1 + tg\varphi)^{1,5}} \left(\frac{T_n}{273} \right)^{1,3-2K_f}, \quad (4)$$

При обробці дослідних даних розмірність параметрів є такою: W_k , м/с;

B_{cm} , мм; d_z , мм; T_n , К, $m = n = 0,5$.



Означення варіантів стабілізаторів: φ , град. $0 \pm 30^\circ \pm 45^\circ \pm 60^\circ \pm 70^\circ$; лінійний стаб. $\circ \Delta \nabla \square \diamond$; кільцевий стаб. $\bullet \blacktriangle \blacktriangledown$

Рис. 5. Залежність відношення α_{max} / Π_{max} для стабілізаторних пальників із подачею газу в зону рециркуляції при різнойменній закрутці повітряного потоку, що обтікає стабілізатор, від швидкості повітря перед стабілізатором

Для досліджених у роботі стабілізаторів шириною $B_{ст} = 40 \div 45$ мм при інтенсивності турбулентності повітряного потоку $\varepsilon > 3,5\%$ дослідний коефіцієнт $K_{зап} = 55$.

Наведені залежності (1) та (4) з порівняною похибкою у $\pm 15\%$ узагальнюють отримані експериментальні дані і можуть бути використані для попереднього розрахунку стабілізаторних пальників із розподіленою роздачею газу вздовж стабілізатора і різнойменною закруткою повітряного потоку, що обтікає стабілізатор, у межах $\varphi = 0^\circ \div \pm 70^\circ$.

Висновки. Після аналізу проведених експериментальних досліджень щодо визначення впливу різнойменної закрутки повітряного потоку, що обтікає стабілізатор, на характеристики запалювання та бідного зриву факелу в стабілізаторних пальниках із подачею газу в зону рециркуляції встановлено, що в разі збільшення кута різнойменної закрутки підвищуються пульсаційні складники швидкості повітряного потоку, що призводить до інтенсифікації масообмінних процесів у перерізі камери і в ближньому сліді за стабілі-

затором. Величини значень коефіцієнта надлишку повітря при запалюванні факела і бідному зриві зменшуються зі збільшенням кута різнойменної закрутки повітряного потоку.

Результати роботи свідчать, що величини коефіцієнта надлишку повітря при запаленні факела є більшими, чим при бідному зриві.

Загалом із наведених даних випробувань стабілізаторних пальників можна зробити висновок, що коефіцієнти надлишку повітря при запалюванні факела і бідному зриві підвищуються в разі збільшення ширини стабілізатора, зменшення коефіцієнту затінення пальника, а також зменшення швидкості повітря. Для підвищення надійності запалювання факела і сталості горіння на бідному зриві рекомендується зменшувати швидкість повітряного потоку в пальнику.

Результати роботи щодо впливу конструктивних і режимних факторів на характеристики запалювання і бідного зриву факела в стабілізаторних пальникових пристроях можуть бути використані в попередніх розрахунках таких пальників.

Список літератури:

1. Халатов А.А. Парогазовые установки в электроэнергетике: современное состояние и перспективы развития в Украине. *Тепловая энергетика – новые вызовы времени* / Под общ. ред. П. Омеляновского и И. Мысака. Львов : НВФ «Українські технології», 2010. С. 238–247.
2. Тумановский А.Г., Гутник М.Н., Артеменко А.А. Перспективы создания высокотемпературных малотоксичных камер сгорания стационарных ГТУ. *Теплоэнергетика*. 2000. № 10. С. 23–26.
3. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива. Справочное пособие. Ленинград : Недра, 1987. 336 с.
4. Христин В.А., Любчик Г.Н. Газогорелочные устройства для сжигания газа при высоких и переменных избытках воздуха : Научно-технический обзор. Серия: Использование газа в народном хозяйстве. Выпуск 10. Москва : ВНИИЭгазпром, 1978. 60 с.
5. Спейшер В.А. Сжигание газа на электростанциях и в промышленности. Москва : Энергтя, 1967. 251 с.
6. Тумановский А.Г., Гутник М.Н., Васильев В.Д., Булысова Л.В., Гутник М.М. Проблема и пути создания малотоксичных камер сгорания для перспективных стационарных ГТУ. *Теплоэнергетика*. 2006. № 7. С. 22–29.
7. Булысова Л.А., Васильев В.Д., Гутник М.Н., Гутник М.М., Ермолаев В.В., Русецкий Ю.А. Исследование горелочного модуля низкоэмиссионной камеры сгорания энергетической газотурбинной установки ГТЭ-45. *Теплоэнергетика*. 2009. № 4. С. 26–31.
8. 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.
9. Сударев А.В., Маев В.А. Камеры сгорания газотурбинных установок. Интенсификация горения. Ленинград : Недра, 1990. 274 с.
10. Тумановский А.Г., Гутник М.Н., Соколов К.Ю. Малотоксичные камеры сгорания для энергетических ГТУ. *Теплоэнергетика*. 1997. № 3. С. 48–52.
11. Черноусенко О.Ю. Сталість процесу горіння на «бідному зриві» при мікродифузійному спалюванні газу за стабілізатором / О.Ю. Черноусенко, Л.С. Бутовський, О.О. Грановська, О.С. Мороз, О.С. Старченко. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Том 31 (70). № 2.
12. Черноусенко О.Ю. Пускові характеристики стабілізаторних пальникових пристроїв при подачі газового палива в зону рециркуляції / О.Ю. Черноусенко, Л.С. Бутовський, О.О. Грановська, О.С. Мороз, О.С. Старченко. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Том 31 (70). № 3.

**Chernousenko O.Yu., Butovsky L.S., Hranovska O.O., Moroz O.S., Starchenko O.S.
THE INFLUENCE OF DIFFERENTLY TWISTED AIR FLOWS ON THE BOUNDARYS
OF THE OPERATION OF A STABILIZER BURNER DURING
MICRODIFFUSION GAS COMBUSTION**

The article presents the results of experimental studies of the characteristics of torch ignition and poor failure in burner devices of the stabilizer type, in which the stabilizers are flown around by differently twisted air flows during microdiffusion combustion of gas and with fuel supply to the recirculation zone through a system of holes distributed along the stabilizer. Researches are carried out at tests of the linear stabilizer of 45 mm wide at changing of an angle of a different twist of an air stream $\varphi = 0^\circ; \pm 30^\circ; \pm 45^\circ; \pm 60^\circ; \pm 70^\circ$, as well as a ring stabilizer with a width of 40 mm at angles $\varphi = 0^\circ; \pm 30^\circ; \pm 45^\circ$. It is established that in such conditions the structure of the recirculation zone and the near trace of the stabilizer change. Studies have shown that when the air flow is twisted, the components of the flow velocity along all coordinates axes appear, and when $\varphi > 60$, the recirculation zone degenerates into a system of vortices along the stabilizer. With an increase of the angle of the rotation of the air flow the processes of mass transfer intensifies throughout the cross section of the combustion chamber and of the stabilizer, which leads to an increase in the intensity of the air turbulence. As a result of the intensification of mass transfer processes, the characteristics of torch ignition and poor flame failure deteriorate with increasing air swirling angle. The dependences of the characteristics of the torch ignition and of the poor failure from the angle of different swirls of air are established. The receiving experimental datas on the characteristics of flame ignition and poor flame failure and the obtained generalized dependences allow to perform a preliminary calculation of the characteristics of microdiffusion stabilizer burners with gas supply to the recirculation zone at different twists of air flows around the stabilizer.

Key words: stabilizer burner, diffusion combustion, torch ignition, recirculation zone, air velocity, different twists of air flows.