

## ОСОБЛИВОСТІ ГОРІННЯ ДИФУЗІЙНОГО ГАЗОВОГО ФАКЕЛА В ОДИНИЧНОМУ ТРУБЧАТОМУ ПАЛИВОСПАЛЮВАЛЬНОМУ МОДУЛІ

© Любчик Г.М., Фіалко Н.М., Реграгі А., Майсон М.В., 2013

Наведено результати експериментальних досліджень характеристик процесів горіння дифузійного факела в одиничному трубчастому паливоспалювальному модулі. Встановлено зв'язок між виявленими режимами горіння та відповідними енерго-екологічними характеристиками.

**Ключові слова:** трубчастий паливоспалювальний модуль, дифузійний факел, емісія оксидів азоту, емісія оксидів вуглецю.

The results of the diffusion flame characteristics experimental study at the single piped fuelburn module are presented. The correlation between burning conditions and respective energy and ecology characteristics are established.

**Key words:** piped fuelburn module, diffusion flame, nitrogen oxides emission, carbon oxides emission.

### Вступ та постановка задач досліджень

Серед різноманіття існуючих технологій спалювання газоподібного палива останніми роками широкий розвиток отримала трубчаста технологія, створена в результаті розробок Національного технічного університету України «КПІ» [1, 2].

Характерною особливістю цієї технології є використання як основних елементів паливоспалювальних систем трубчастих інтенсифікаторів сумішоутворення і стабілізації горіння (рис. 1), які виконані у вигляді послідовно скомпонованих циліндричних аеродинамічних каналів різного діаметра з раптовим розширенням (у вигляді насадки Борда).

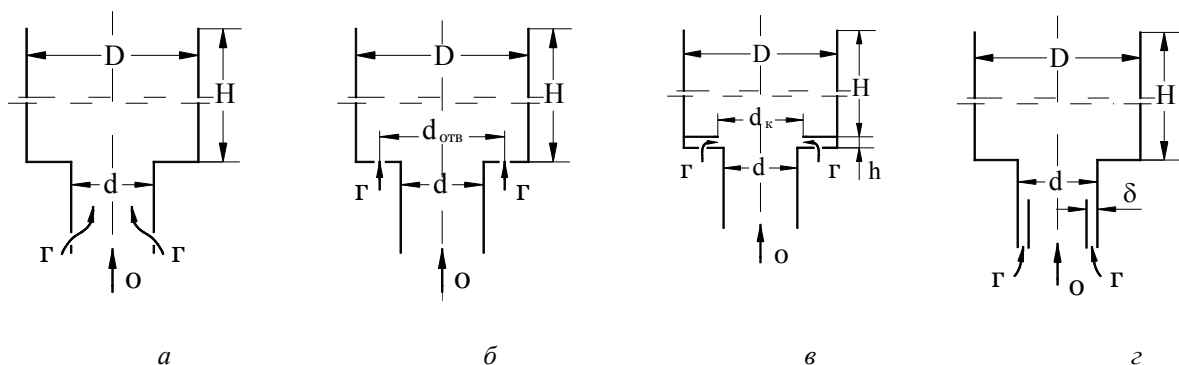


Рис. 1. Схеми одиничних трубчастих модулів з попереднім (а) і дифузійним (б, в, з) сумішоутворенням

У каналі меншого діаметра ( $d$ , на рис.1) до зони горіння підводиться потік окисника (атмосферне повітря, збагачене киснем або забаластоване продуктами згорання повітря), який у зоні раптового розширення ( $D$ , на рис. 1) генерує течію складної структури [3], у центральній частині якої формується струмина окисника з потенційним ядром на початковій ділянці та пограничним шаром на периферії.

Така струмина характеризується високими тепломасообмінними властивостями та високими рівнями інтенсивності турбулентності при горінні палива. Вона може подаватися до зони горіння різними способами, зокрема:

- попереднє сумішоутворення (тип трубчастого модуля – ТМП) за рахунок струменевої подачі паливного газу у потік окисника в каналі насадки Борда (рис. 1а);
- дифузійне сумішоутворення (тип трубчастого модуля – ТМД) за рахунок роздільного введення у зону горіння потоку окисника, що рухається у каналі насадки Борда, та паливного газу у зоні раптового розширення насадки Борда (рис. 1 а, б, в);
- комбіноване сумішоутворення (тип трубчастого модуля – ТМК) за рахунок комбінованої подачі паливного газу у потік окисника до зони раптового розширення насадки Борда.

При реалізації дифузійного сумішоутворення можливі різні варіанти подачі паливного газу у зону горіння, зокрема:

- варіант ТМДсс (рис. 1,б), особливістю якого є супутно-струменева подача до зони горіння струменя окисника, що витікає з повітряного каналу діаметром  $d$  та струменів паливного газу через систему отворів у тіньовій стінці насадки Борда, радіус розташування яких становить  $r_{отв} = d_{отв}/2$ ;
- варіант ТМДрк (рис. 1,в), особливістю якого є радіально-кільцева подача струменя паливного газу (до поверхні струменя окисника) через кільцеву щілину діаметром  $d_{отв}$  і висотою  $h$ , що розташована на початковій ділянці зони раптового розширення насадки Борда;
- варіант ТМДск (рис. 1,г), особливістю якого є супутньо-кільцева подача струменя паливного газу (до поверхні струменя окисника) через кільцеву щілину шириною  $\delta$ , що розміщується у каналі меншого діаметра насадки Борда.

Однією з важливих особливостей реалізації трубчастої технології горіння газового палива є досягнення практично необмеженого діапазону зміни теплових потужностей трубчастих паливоспалювальних пристроїв завдяки застосуванню як одиничних пальників ( $z_{тм} = 1$ ), так і пальників з будь-якою кількістю трубчастих модулів ( $z_{тм} > 1$ ).

На основі експериментальних досліджень одиничних трубчастих модулів спрощується моделювання режимних, енергетичних та екологічних характеристик горіння, зокрема структури факела та умов його розвитку.

Вперше це показано в роботах [1, 3–10], де наведено результати експериментальних досліджень впливу на структуру та розміри первинної зони горіння змінної подачі палива в одиничний трубчастий модуль з дифузійним сумішоутворенням за сталої витрати окисника. Подачу паливного газу було реалізовано відповідно до схеми, яку наведено на рис. 1,б.

Для фізичного моделювання використовували трубчастий модуль з внутрішнім діаметром трубки  $d = 36$  мм, ділянкою раптового розширення насадки Борда з діаметром  $D = 110$  мм, а також висотою каналу раптового розширення  $L = 41,5$  мм. Роздільну подачу паливного газу у первинну зону горіння було реалізовано системою з шести газових отворів ( $z_{отв} = 6$ ) діаметром  $d_r = 3$  мм, що розташовані на торцевій стінці насадки Борда навколо осі повітряного струменя на діаметрі  $d_{отв} = 52$  мм. У результаті виконаних досліджень встановлено унікальні властивості первинної зони горіння при розвитку затопленого дифузійного факелу у атмосферному повітрі:

1) виникнення при дифузійному сумішоутворенні ефекту «прилипання» паливних струменів до центрального повітряного каналу (ефект Коанда), в результаті чого вони обволікають останній, і утворюється факельна система полої структури з високою однорідністю структури на основній ділянці розвитку;

2) стабільне існування дифузійного факелу для дифузійних модулів при турбулентному режимі потоку окисника ( $Re_o \approx 4,6 \cdot 10^5$ ) у широкому діапазоні чисел Рейнольдса газових струменів  $Re_r = (2,15 \dots 18,2) \cdot 10^3$ ;

*Примітка.* Дослідження проведено при подачі в первинну зону горіння природного газу та холодного повітря (температура  $t_0 = 16 \dots 20$  0С) при швидкості окисника ( $W_0 \approx 30$  м/с);

3) незалежно від режиму витікання газових струменів (ламінарного, перехідного, турбулентного) наявність турбулентної структури дифузійного факела при турбулентному режимі витікання струменя окисника;

4) зростання довжини факела ( $l_{\phi}$ ) за сталої швидкості окисника ( $W_0 = \text{const}$ ) збільшується зі збільшенням швидкості витікання газових струменів;

5) частковий відрив факела від трубної дошки, що обумовлений зовнішньою «аерацією» початкової ділянки факела та є причиною зменшення діапазону бідної границі стабільного існування факела;

6) виникнення на початковій ділянці раптового розширення насадки Борда тороїдальної вихрової структури, що зменшує ефект «аерації» і сприяє розширенню діапазону стабільного існування факела.

Дослідження дифузійного факела [6] проведено за низької швидкості струменя окисника ( $W_0 \approx 30$  м/с) і недостатньої висоти ділянки розширення насадки Борда ( $h = 41.5$  мм), що відтворює умови розвитку факела, що не відповідають реальним. Крім того, існує проблема можливості реалізації трубчастої технології горіння газового палива при застосуванні модулів середнього чи малого розміру (при внутрішньому діаметрі повітряної трубки  $d < 36$  мм), що обумовлено необхідністю реалізації ефекту «мікродифузійного» горіння у напрямку позитивного впливу цього ефекту на рівень емісії токсичних оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ).

Уявлення щодо структури факела і можливостей застосування трубчастих модулів середнього розміру в умовах, максимально наближених до реальних, суттєво розширюються в результаті виконаних досліджень дифузійного факела [5, 9], за таких геометричних розмірів модуля: внутрішній діаметр повітряної трубки  $d = 16,5$  мм і ділянки раптового розширення насадки Борда  $D = 45$  мм, а також висотою каналу раптового розширення)  $L = 410$  мм. На відміну від описаних вище досліджень великорозмірного модуля, роздільну подачу паливного газу до первинної зони горіння було реалізовано за схемою, наведеною на рис. 1, в, з радіально-кільцевим (до поверхні центрального струменя окисника) струменем паливного газу через щілину заввишки  $h = 1,5$  мм і діаметром  $d_k = 17$  мм.

Результати виконаних досліджень на трубчастому модулі середнього масштабу не заперечують висновків, отриманих на модулі великого розміру [2], зокрема існування ефекту Коанда і наявність куполоподібної форми факела, турбулентної структури факела при турбулентному режимі витікання струменя окисника (незалежно від режиму течії кільцевого струменя паливного газу), збільшення довжини дифузійного факела (рис. 2) при підвищенні подачі паливного газу ( $m_f$ , г/с) у зону горіння.

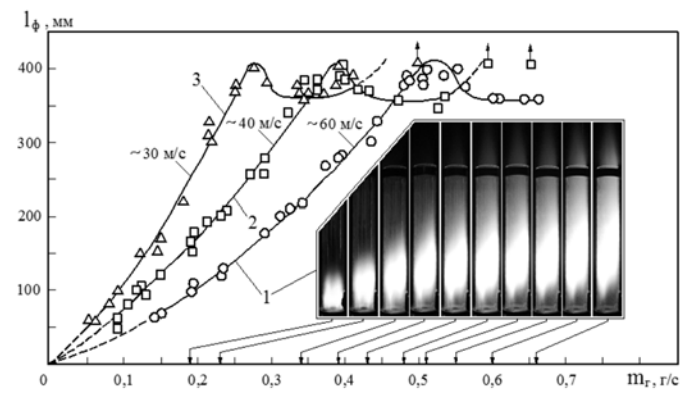


Рис. 2. Вплив витрати палива ( $m_f$ , г/с) крізь радіально-кільцеву щілину (див. рис. 1, в) при різних рівнях швидкості окисника ( $W_0$ ) в повітряному каналі модуля на структуру і візуальну довжину дифузійного факела: 1 –  $W_0 = 60$  м/с; 2 –  $W_0 = 40$  м/с; 3 –  $W_0 = 30$  м/с [2]

Примітки. 1. З метою візуалізації структури дифузійного факела канал раптового розширення насадки Борда виконано з прозорої кварцової трубки. 2. Дослідження проведено при подачі в

первинну зону горіння природного газу та холодного повітря (температура  $t_0 = 16...20$  °C) у діапазоні зміни швидкості окисника  $W_0 \approx 30...60$  м/с.

Головним результатом виконаних досліджень є встановлення різних режимів розвитку дифузійного факела у трубчастому модулі, зокрема двох регулярних, ознакою яких є збільшення довжини факела ( $l_{\phi}$ ) із збільшенням подачі паливного газу ( $m_f$ ). Вибір радіально-кільцевої подачі паливного газу обумовлений необхідністю підвищення однорідності структури бокової поверхні дифузійного факела. На рис. 2 наведено фотографії факела, отримані за відсутності природного та штучного освітлення.

У роботі [2] на основі відомого визначення коефіцієнта надлишку повітря у вигляді співвідношення  $\alpha = m_o / L_o \cdot m_f$ , де  $m_o$  – масова витрата окисника (кг/с) та  $L_o = 16,8$  кг/кг – стехіометричний коефіцієнт паливного газу, виявлено узагальнену форму залежності висоти дифузійного факела  $l_{\phi} = f(\alpha)$  від величини  $\alpha$  у практично значимому діапазоні зміни швидкості повітря (окисника)  $W_0 \approx 30...60$  м/с, а також неоднорідність інтенсивності світимості візуальної довжини факела при різних умовах його візуалізації: у затемненому середовищі (за відсутності зовнішнього природного або штучного джерела освітлення) або у середовищі зі штучним зовнішнім освітленням. За відсутності зовнішнього освітлення висота дифузійного факела ( $l_{\phi 2}$ ) перевищує висоту факела ( $l_{\phi 1}$ ), яка спостерігається за наявності зовнішнього освітлення, тобто  $l_{\phi 2} > l_{\phi 1}$ .

Отримані закономірності, що характеризують структуру дифузійного факела у модулі середнього розміру [2, 11], дають важливу інформацію стосовно природи виникнення первинної зони горіння – зони максимальної світимості факела – і не дозволяють скласти необхідні уявлення стосовно енергетичних та екологічних характеристик зони догорання такого факела, які визначають рівень ефективності вигорання та емісію токсичних компонентів: оксидів азоту ( $NO_x$ ) та оксиду вуглецю (CO) залежно від режимних характеристик: коефіцієнта надлишку повітря та швидкості окисника.

Цим дослідженням встановлено закономірності формування дифузійного факела в одиночному трубчастому паливоспалювальному модулі і зв'язку умов розвитку факела з енерго-екологічними характеристиками.

### Експериментальний стенд та методика досліджень

Експериментальні дослідження структури дифузійного факела та його енергетичної ( $q_3 = f(\alpha)$ ) і емісійних характеристик ( $NO_x = f(\alpha)$  і  $CO = f(\alpha)$ ) виконано на спеціальному експериментальному стенді, принципову схему якого наведено на рис. 3,а.

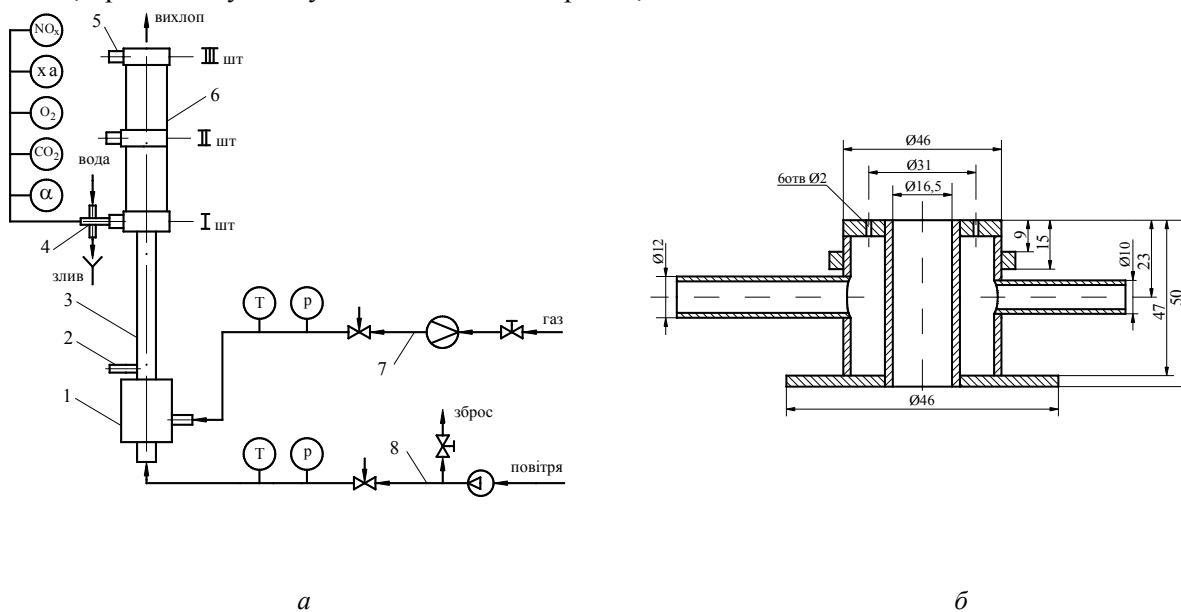


Рис. 3. Принципова схема експериментального стенду (а) та розріз блоку подачі палива і повітря трубчастого модуля (б): 1 – блок трубчастого модуля; 2 – штуцер для введення електроіскрового запальника; 3 – кварцова трубка; 4 – газовідбірник; 5 – штуцер для введення газовідбірника; 6 – ділянка опалювання; 7 – колектор паливного газу; 8 – колектор для подачі повітря

До складу експериментального стенду входить: блок трубчастого модуля (1), паливний (7) та повітряний (8) колектори, кварцова (прозора) трубка (3) з внутрішнім діаметром каналу 45 мм і довжиною 410 мм, та ділянка допалювання з внутрішнім діаметром 83 мм та довжиною каналу 400 мм.

Займання дифузійного факела здійснювалося за допомогою електроіскрового запальника, який вводився в затінену зону модуля через патрубок (4), показаний на рис. 3,а. Після займання факела і виведення запальника з патрубка (4) і герметизації бічного роз'єму встановлювалася необхідна витрата повітря у внутрішньому каналі трубчастого модуля (7) і при змінній подачі паливного газу здійснювався візуальний аналіз структури дифузійного факела і фіксація його структури за допомогою цифрової фотокамери.

Паливний та повітряні колектори оснащені необхідною запірною та регулюючою арматурою, а також приладами для фіксації умов подачі робочих компонент до одиночного трубчастого модуля (рис. 3,б): тиску та температури. Подача палива в зону сумішоутворення і горіння здійснювалися за допомогою системи газових паливних отворів (6 отворів діаметром  $d_f = 2$  мм), розташованих на торцевій стінці трубчастого модуля (на радіусі 15,5 мм).

Експериментальний стенд оснащений відповідною контрольно-вимірювальною апаратурою, що дає змогу фіксувати температуру повітря ( $T_{\text{п}}$ , К) і паливного газу ( $T_{\text{г}}$ , К), а також інші параметри 1, необхідні для визначення витрати повітря ( $m_{\text{п}}$ , г/с) і палива ( $m_{\text{г}}$ , г/с).

При цьому витрата паливного газу ( $m_{\text{г}}$ , г/с) визначалася методом діафрагми за допомогою співвідношення

$$m_{\text{г}} = 10^3 \cdot F_{\text{д}} \cdot \rho_{\text{г}}^{1/2} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p_{\text{д}}}, \quad (1)$$

де  $F_{\text{д}}$  – переріз діафрагми (м<sup>3</sup>);  $\rho_{\text{г}}$  – густина паливного газу (кг/м<sup>3</sup>);  $\Delta p_{\text{д}} = p_{1\text{д}} - p_{2\text{д}}$  – різниця статичного тиску повітря перед та за діафрагмою (Па).

Витрата повітря ( $m_{\text{п}}$ , г/с) визначалася за співвідношенням

$$m_{\text{п}} = \alpha \cdot L_0 \cdot m_{\text{г}}, \quad (2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря, величина якого оцінювалася за результатами газового аналізу;  $L_0 \approx 16,8$  кг/кг – стехометричний коефіцієнт, величина якого приймалася як стандартне значення для природного газу.

За стаціонарними режимами горіння газового факела відбирали продукти згорання охолоджувальною проточною водою газовідбірника (4) у трьох перерізах зони догорання (штуцери I, II та III), і газову пробу подавали до газоаналізаторів типу TESTO 30 та «Газохром».

У першому випадку діагностували склад продуктів згорання, в результаті чого визначали коефіцієнт надлишку повітря ( $\alpha$ ), концентрацію оксиду вуглецю (CO) та оксидів азоту (NO<sub>x</sub>). У другому випадку визначалася концентрація продуктів хімічної неповноти згорання: водню (H<sub>2</sub>), оксиду вуглецю (CO) та метану (CH<sub>4</sub>).

За результатами газового аналізу також визнавали коефіцієнт надлишку повітря ( $\alpha$ ) та хімічну неповноту згорання ( $q_3$ ).

### Результати досліджень

Експериментальні дослідження умов формування і розвитку дифузійного факела природного газу в одиночному трубчастому модулі вказують на існування чотирьох характерних режимів розвитку факела (рис. 4), серед яких можна назвати:

**стехіометричний режим**, який виникає при  $\alpha \rightarrow 1,0$  і переходить за подальшого зниження надлишку повітря в режим горіння збагаченого факела, де поняття далекобійності факела втрачає фізичний сенс;

Примітка. Експериментальні дослідження проведені на холодному повітрі за незначного діапазона зміни його температури  $T_{\text{п}} = 285\text{-}302$  К ( $t_{\text{п}} = 12 - 29$  °С), при тиску, близькому до атмосферного ( $p_{\text{п}} \approx 10^5$  Па), у широкому діапазоні зміни швидкості повітря в повітряному каналі паливоспалювального модуля ( $W_{\text{п}} \approx 30, 40$  та  $60$  м/с).

**автомодельний режим**, реалізується в діапазоні  $1,0 < \alpha \leq 1,8$ , в якому далекобійність факела ( $\bar{l}_\phi$ ) практично залишається постійною і для дослідженого типорозміру трубчастого модуля становить величину  $\bar{l}_\phi \approx 21,8$ ;

**перехідний режим**, який характеризується появою кризи далекобійності факела за умови  $\alpha \approx 2,0$ ;

**регулярний режим**, який реалізується в діапазоні високих значень надлишків повітря ( $2 < \alpha < 8,0$ ), характеризується зменшенням далекобійності факела зі збільшенням коефіцієнта надлишку повітря.

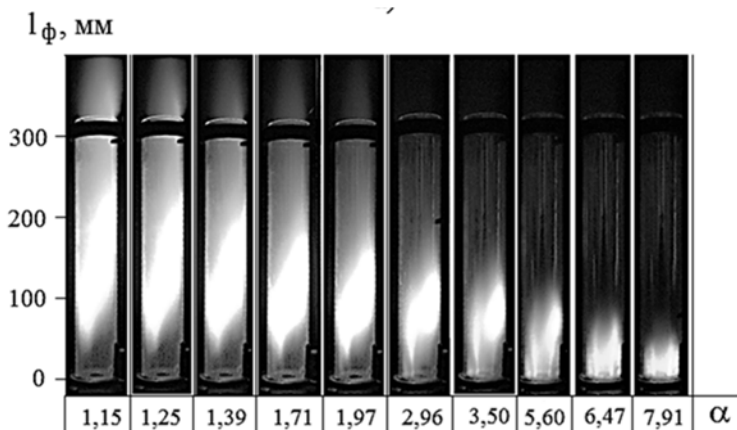


Рис. 4. Вигляд дифузійного факела, що утворюється за трубчастим модулем середнього розміру ( $d = 16,5$  мм), з супутно-струменевою подачею паливного газу у первинну зону горіння при швидкості окиснювача (повітря)  $60$  м/с і різних значеннях коефіцієнтах надлишку повітря  $\alpha$

Як видно з результатів діагностики складу продуктів згорання, існує зв'язок між рівнями емісії CO і хімічним недопалом палива ( $q_3$ ) з режимами розвитку дифузійного факела в одиничному трубчастому модулі (рис. 5, 6).

Спостерігається зменшення рівнів CO і  $q_3$  у разі наближення до стехіометричного режиму горіння, в області автомодельного режиму зафіксовані мінімальні значення оксидів вуглецю та хімічної неповноти згорання. З подальшим ростом  $\alpha$  (перехідний режим) ці значення різко підвищуються. В регулярному режимі  $q_3$  поступово збільшується, а рівень CO зменшується з підвищенням  $\alpha$ .

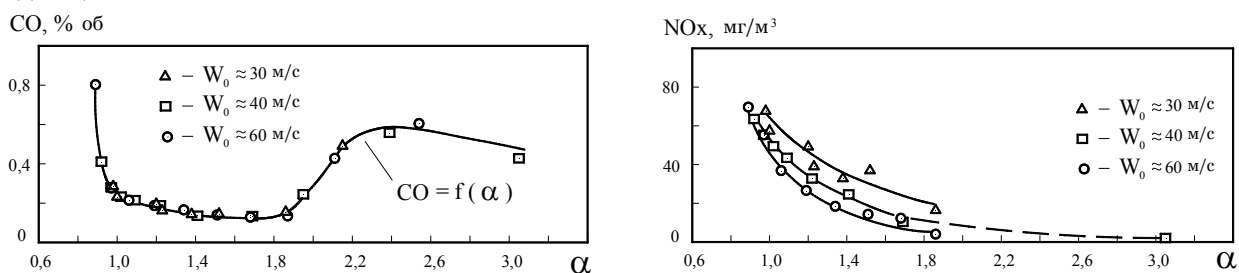


Рис. 5. Узагальнена характеристика впливу надлишку повітря на емісію оксиду вуглецю  $CO = f(\alpha)$  і  $NO_x = f(\alpha)$  у зоні догорання дифузійного факела (III шт. на рис.2), що утворюється за трубчастим модулем середнього розміру ( $d = 16,5$  мм) із супутно-струменевою подачею паливного газу у первинну зону горіння у діапазоні швидкостей окиснювача  $\sim 30 \dots 60$  м/с

Що стосується емісії оксидів азоту  $NO_x$ , то її значення монотонно зменшується при розвитку дифузійного факела в одиничному трубчастому модулі з ростом  $\alpha$  при переході зі стехіометричного до регулярного режиму горіння (рис. 6).

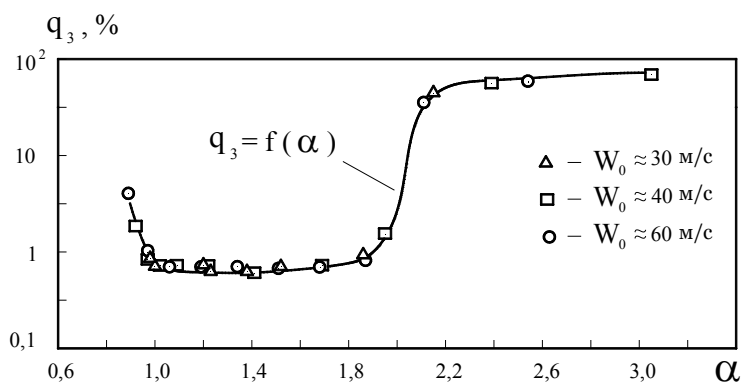


Рис. 6. Узагальнена характеристика впливу надлишку повітря на хімічну неповноту згорання  $q_3 = f(\alpha)$  дифузійного факела, що утворюється за трубчастим модулем середнього масштабу ( $d = 16,5$  мм), з супутньо-струменевою подачею паливного газу до первинної зони горіння у діапазоні швидкостей окиснювача (повітря)  $\sim 30 \dots 60$  м/с

### Висновки

Встановлено закономірності формування дифузійного факела і зв'язок умов його розвитку з енерго-екологічними характеристиками при спалюванні газу в одиничному трубчастому паливоспалювальному модулі. Виявлено наявність факту формування автомобільного режиму горіння, що відповідає значенням коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  від 1,0 до 1,8, за якого спостерігаються порівняно низькі значення концентрації СО та хімічної неповноти згорання палива та монотонне зменшення оксидів азоту  $\text{NO}_x$  з ростом  $\alpha$ .

1. Любчик Г.Н. Разработки НИО проблем горения НГУУ «КПИ» в направлении создания передовых технологий сжигания топлив // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2006. – № 1. – С. 83–92. 2. Г.Н. Любчик и др. Когенерационно-утилизационные технологии на базе газотурбинных установок / под ред. Г.Н. Любчика и Л.Б. Чабановича. – К.: Варта, 2008. – 185 с. 3. Любчик Г.Н. и др. Использование конструктивных особенностей и аэродинамических эффектов насадка Борда при создании малотоксичных топливосжигающих модулей // Технологические системы. – 2002. – Вып. 1. – №2 (13). – С. 130–133. 4. Мікулін Г.С. Трубчаста технологія спалювання газу і основи її ефективного застосування у теплових енергоустановках: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – К.: Капрі, 2007. – 24 с. 5. Любчик Г.Н., Варламов Г.Б., Говдяк Р.М., Шелковский Б.И., Микулин Г.А., Левчук С.А. Создание малотоксичных камер сгорания ГТУ // Экологические технологии и ресурсосбережение. – 2003. – №2. – С. 65–74. 6. Говдяк Р.М., Любчик Г.Н., Чабанович Л.Б., Гринник О.Г., Шелковский Б.И. Резерви енерго-ресурсозбереження і нові технології для використання на компресорних станціях магістральних газопроводів // Нафтогазова енергетика. – 2007. – № 2 (3). – С. 35 – 45. 7. Бутовский Л.С., Грановская Е.А., Любчик Г.Н., Христинич В.А. Исследование закономерностей выгорания топлива за уголковыми и плоскими стабилизаторами пламени / В сб. Теория и практика сжигания газа. – Л.: Недра, 1975. – С.324–338. 8. Основы горения углеводородных топлив / Под ред. Л.Н. Хитрина и В.А. Попова. – М.: И.-Л. – 1960. – 663 с. 9. Микулин Г.А. Трубчатая технология сжигания топлива и основы ее эффективного применения в тепловых энергоустановках: дис. ... канд. техн. наук. – К.: НГУУ «КПИ», 2006. – 183 с. 10. Равич М.Б. Топливо и эффективность его использования. – М.: Наука, 1971. – 357 с. 11. Реграги А., Любчик Г.Н., Зарицкий А.А. Структура и особенности развития диффузионного факела в трубчатом топливосжигающем модуле // Энергетика: економіка, технологія, екологія. – 2007. – №2. – С. 97–105.