

УДК 621.438 + 621.165

Г.М. ЛЮБЧИК, доктор техн. наук, Г.Б. ВАРЛАМОВ, канд. техн. наук, Г.О. МКУЛПН

*Національний технічний університет України “КПІ”*

Р.М. ГОВДЯК, канд. техн. наук, Л.Б. ЧАБАНОВИЧ,  
Б.І. ШЕЛКОВСЬКИЙ, канд. техн. наук

*Відкрите акціонерне товариство «Укргазпроект»*

## **РОЗВИТОК СИСТЕМ ДОПАЛЮВАННЯ НА ВИХЛОПІ УТИЛІЗАЦІЙНИХ ГТУ**

Рассмотрены направления развития эффективных технологий дожигания топлива на выхлопе утилизационных ГТУ. Определена неоднозначность требований, предъявляемых к горелочным устройствам в зависимости от схем форсированных систем утилизации энергии. Показано, что для схем с блоками дожигающих устройств и подогревателем сетевой воды наиболее эффективным является использование струйных горелок с линейной компоновкой элементов (СГЛ). Для схем с выносным подтопочным устройством и теплофикационным теплообменником наиболее эффективно использование горелок СГЛ, а также струйных горелок с конической компоновкой элементов (СГ). Для схем с блоками дожигающих устройств перед котлом наиболее целесообразным является использование горелочных систем на базе трубчатых элементов.

Форсовані системи утилізації теплоти вихлопних газів ГТУ, відтворюють додаткову генерацію енергії (теплову, механічну або електричну) [1] за рахунок використання теплового потенціалу димових газів і в результаті додаткового допалювання палива в газохіді ГТУ [2]. При цьому утилізація (одночасно з когенерацією) енергії може здійснюватися по трьом основним схемам: з використанням блоків допалюючих пристроїв (БДП), вбудованих у газохід газової турбіни (рис. 1-а); виносних підтопкових пристроїв (ВПП), що встановлюються за межею газоходу ГТУ (рис. 1-б); блоків пальникових пристроїв (БПП), що встановлюються перед котлом-утилізатором, який працює з допалюванням палива (рис. 1-в).

Ефективність форсованих систем утилізації енергії на вихлопі ГТУ у великій мірі залежить від вибору раціонального методу організації допалювання газового палива стосовно відповідних схем когенерації енергії (рис. 1).

Вибір ефективної технології допалювання визначається вимогами до топкових пристроїв відповідно до схем їх застосування (рис. 1), серед яких можна визначити:

1) Конструктивно-технологічні: необхідність застосування рампового, касетного або коміркового компонування, простота конструкції та технологічність виготовлення, легкість монтажу та проведення ремонтних робіт, мала металоємність;

2) Експлуатаційні:

- робота на забаластованому окиснику з концентрацією кисню  $O_{2(ок)} = 16\%$  та менше при високій його температурі (до  $500\text{ }^\circ\text{C}$  та більше) для БДП і БПП або робота на чистому і холодному повітрі для ВПП;

- легкий та безвідмовний запуск і ефективне спалювання палива при високих швидкостях потоку димових газів для БДП (до  $45\text{ м/с}$ );

- низький рівень підігріву окисника для БДП ( $\Delta t = 70\dots 150\text{ }^\circ\text{C}$ ), помірний підігрів повітря для ВПП ( $\Delta t = 200\dots 600\text{ }^\circ\text{C}$ ) і високій підігрів окисника для БПП ( $\Delta t = 1400\dots 2000\text{ }^\circ\text{C}$ );

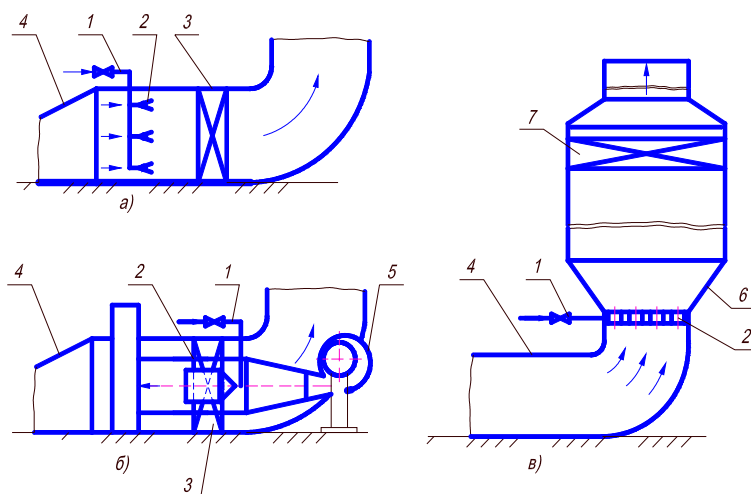


Рисунок 1 – Форсовані системи утилізації енергії на вихлопі ГТУ на основі блоків допалюючих пристроїв (БДП) з підігрівачем сільової води (а), виносних підтопкових пристроїв (ВПП) і утилізаційних теплообмінників (б), блоків палинкових пристроїв (БПП) перед паровим або водогрійним котлом (в): 1 – подача паливного газу; 2 – БДП, ВПП або БПП; 3 – підігрівач сільової води або інший теплообмінник; 4 – вихлоп ГТУ; 5 – вентилятор; 6 – топка котла; 7 – конвективні поверхні

- робота при високих та змінних надлишках забаластованого окисника (для БДП –  $\alpha = 10 \dots 40$ ); чистого і холодного повітря (для ВПП –  $\alpha = 4,5 \dots 13$ );
  - робота при низьких надлишках повітря БПП в аварійному режимі ( $\alpha \rightarrow 1,1$ ) та підвищених надлишках окисника ( $1,0 < \alpha < 2,0$ ) в основному режимі експлуатації;
  - автономність експлуатації та періодичність включення ВПП (резервне, аварійне і пікове теплопостачання);
  - необхідність ефективного спалювання великої кількості газового палива (від сотень до кількох тисяч кубічних метрів на годину);
- 3) Енергетичні – низький рівень втрат тиску і висока повнота згорання палива;
- 4) Екологічні – низька емісія токсичних оксидів азоту (NOx) і оксиду вуглецю (CO) для всіх схем допалювання;

Специфічність представлених вимог унеможливує застосування традиційних для камер згорання ГТУ і для топок котлів технологій спалювання газоподібного палива, що і зумовлює пошук і науково-технічне обґрунтування адекватних представленим вище вимогам технологій горіння. Для ГТУ з БДП (рис. 1-а) та з ВПП (рис. 1-б) основною вимогою є забезпечення ефективного горіння палива при високих та змінних надлишках повітря. Для таких умов в результаті досліджень, започаткованих В.А. Христинем у Київському політехнічному інституті, розроблені варіанти ефективних палинкових систем, які в залежності від особливостей організації робочого процесу отримали назви: струминних, струминно-стабілізаторних та дифузійно стабілізаторних [3, 4]. Як елементи БДП у складі форсованої системи утилізації енергії на вихлопі енергетичних газових турбін ГТ-25 – 700 ЛМЗ вперше на 4-х блоках Якутської ГРЕС були застосовані паливники дифузійно-стабілізаторного типу

(рис. 2), що стало результатом спільної розробки ЛМЗ, ЯГРЕС, ВТІ (Росія) та НТУУ “КПІ” (Україна) [3].

В подальшому після демонтажу агрегатів ГТ-25 – 700 ЛМЗ, які відпрацювали свій ресурс, така ж сама система була впроваджена на машинах ГТ-35 ХТЗ. Аналогічні пальникові системи застосовуються іноземними фірмами [5].

Організація робочого процесу в пальниках дифузійно-стабілізаторного типу (рис. 2) ґрунтується на дифузійному принципі згорання при повздовжній подачі паливних струменів у зону рециркуляції за V-подібними стабілізаторами. Як показали результати експериментальних досліджень [4] та результати доводочних робіт [3], такі пальники можуть ефективно працювати у потоці забаластованого підігрітого повітря при підігріві вихлопних газів ГТУ в діапазоні  $\Delta t_{\text{під}} = 30 \dots 150 \text{ } ^\circ\text{C}$  і мають наступні переваги: просту конструкцію, легкість виготовлення і монтажу; високу ремонтоздатність, низькі втрати тиску, можливість «тиражування» теплової потужності за рахунок застосування рампового компоновання у газоході ГТУ (рис. 1-а).

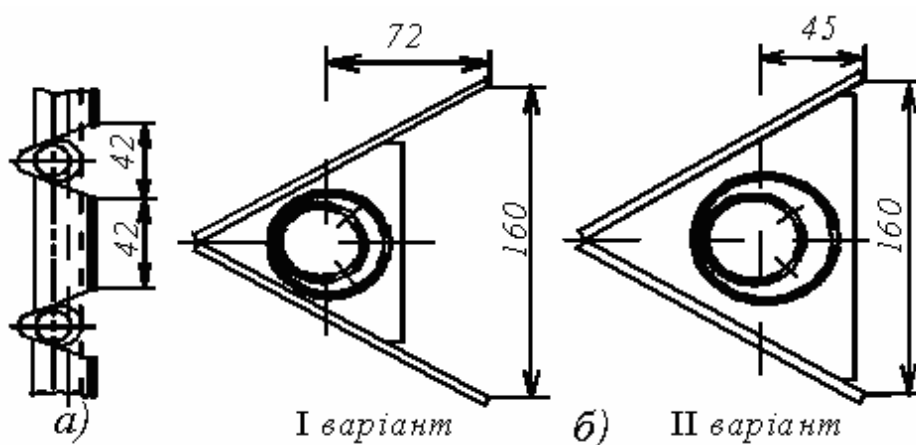


Рисунок 2 – Варіанти дифузійно-стабілізаторних пальників:  
а – маломасштабний пальник; б – великомасштабні пальники.

Поряд з названими перевагами дифузійно-стабілізаторним пальникам притаманні ряд недоліків, серед яких можна виділити термічну деформацію стінок стабілізаторів, ускладнення в період запуску (при багаторядному рамповому компонованні пальникової системи), підвищений рівень  $q_3$  та СО, що особливо притаманно для маломасштабних пальників (рис. 1-а). Цей “масштабний” ефект було виявлено під час доводочних робіт на ЯГРЕС [3], в результаті яких було визначено досить високий рівень хімічної неповноти згорання ( $q_3 > 5 \%$ ) у випадку застосування маломасштабних пальників і тільки після переходу на великомасштабні пальники (рис. 1-б) рівень хімічної неповноти згорання було значно знижено [3].

У випадку застосування виносних підтопкових пристроїв (рис. 1-б) в результаті спільних розробок НТУУ “КПІ” та ВАТ “Укргазпроект” були успішно впроваджені струминні пальники типу СГ [6, 7] (рис. 3), що добре зарекомендували себе у складі промислових теплогенераторів та термokatалітичних реакторів очистки шкідливих газових викидів. Основною конструктивною особливістю пальників типу СГ є кінцеве компоновання струминних елементів інтенсифікації та стабілізації горіння, а принцип

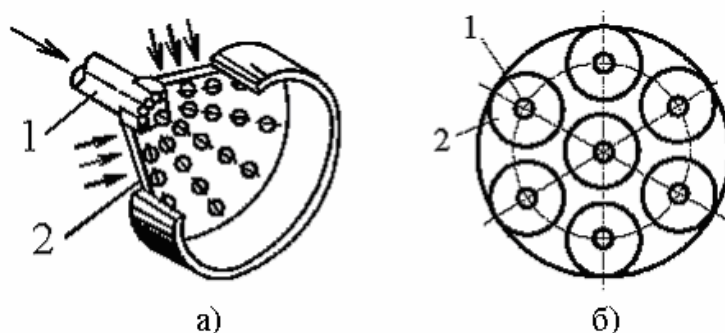


Рисунок 3 – Струминний пальник (а) та схема касетного компонування таких пальників (б):

1 – паливна багатосоплова форсунка; 2 – перфорований конус

організації робочого процесу є дифузійним з сумішоутворенням у зоні горіння на основі поперечної подачі палива між спареними рядами повітряних струменів до тіньової зони цього елемента. Такі пальникові системи ефективно працюють на холодному повітрі при підігріві його на  $\Delta t_{\text{під}} = 100 \dots 600 \text{ } ^\circ\text{C}$  та більше і мають просту конструкцію, яка характеризується легкістю виготовлення, монтажу та проведення ремонтних робіт. Їм притаманні: висока надійність роботи, мала металоємність, широкий діапазон стійкої роботи, високий рівень вигорання палива, незначний рівень емісії оксидів азоту та незначні втрати тиску по повітряному тракту. Серед недоліків робочого процесу слід відзначити проблеми “тиражування” теплової потужності, що розв’язується тільки за рахунок касетного компонування багатопальникових систем і, в свою чергу, створюють проблеми з запуском.

При проведенні випробувань пальників типу СГ-40 та СГ-100 (з номінальною витратою природного газу, відповідно 39 та 95 м<sup>3</sup>/г) на спеціалізованому стенді ГІЦ ГУ (м. Каменськ-Шахтинський, Росія) отримані наступні енерго-екологічні показники:  $q_3 \approx 0,1 \%$ ,  $\text{CO}^* = 0,01 \%$  об.,  $\text{NO}_x^* \approx 122 \text{ мг/м}^3$  (для пальника СГ-40) і  $q_3 \approx 0,12 \%$ ,  $\text{CO}^* = 0,04 \%$  об.,  $\text{NO}_x^* \approx 50 \text{ мг/м}^3$  (для пальника СГ-100).

Форсована система утилізації енергії у відповідності зі схемою (рис.1-б) була розроблена ВАТ “Укргазпроект” та випробувана в складі ГТК-10 НЗЛ. Деякі технічні характеристики такої системи представлені у табл. 1.

Використання виносного підтопкового пристрою для аварійного або резервного теплопостачання дозволяє скоротити у 4 рази капіталовкладення в порівнянні з котельною. На основі визначених особливостей робочого процесу дифузійно-стабілізаторних (рис. 2) і струминних пальників (рис. 3) та з метою усунення їх окремих недоліків НТУУ “КПІ” при участі Інституту газу НАН України були розроблені струминні пальники лінійного типу (СГЛ) [7-9], які уособлюють спільні риси організації робочого процесу з першими двома типами пальників, в результаті чого досягнуто суттєве покращення енерго-екологічних характеристик та усунуто цілий ряд недоліків, притаманних іншим пальникам. Як видно з рис.4, основним конструктивним елементом таких пальників є V-подібний стабілізатор, а в основу робочого процесу покладено дифузійне сумішоутворення шляхом поперечної подачі паливних струменів

\* Концентрації CO та NO<sub>x</sub> приведені у перерахунку на  $\alpha = 1,0$ .

Таблиця 1 – Технічна характеристика системи утилізації на вихлопі ГТК-10 НЗЛ з виносним підтопковим пристроєм (ВПП) на базі 7-ми пальників СГ-40

Параметр	При працюючому ГПА	При зупинці ГПА (працює ВПП)
Теплова потужність теплообмінника, Гкал/г	4,4	1,2
Темп. димових газів, °С	250	400
Аеродинамічний опір теплообмінника, кгс/м <sup>2</sup>	45	50
Витрата природного газу, м <sup>3</sup> /г.	відсутня	250
Витрата повітря, м <sup>3</sup> /г		15800
Теплообмінник		
• Габаритні розміри, м	6x3x0,57	
• Маса, т	4	
ВВП		
• габаритні розміри, м	відключений	підключений 7,33x1,66x2,14
• маса		1,56

у тіньову зону одиночного елемента між спареними рядами повітряних струменів. Такі пальники знайшли широке застосування в теплогенераторах різного промислового призначення і термokatалітичних реакторах очищення промислових газових викидів.

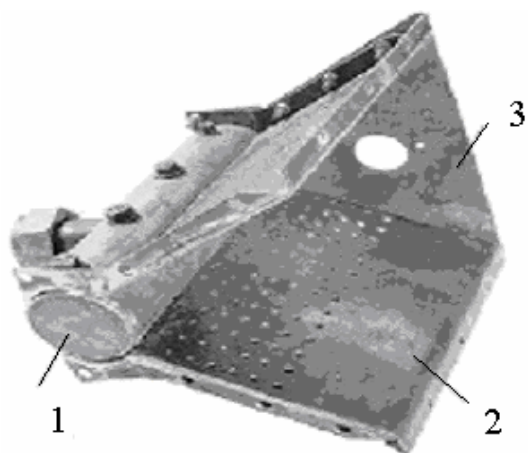


Рисунок 4 – Загальний вигляд модуля струминного пальника типу СГЛ:  
1 – паливний колектор; 2 – перфоровані пластини-стабілізатори; 3 – торцева стінка.

Характерною особливістю таких пальників є можливість їх виконання у модульному варіанті, що забезпечує широкий спектр конструвальних рішень, у тому числі застосування рампової схеми, найбільш доцільної для газоходу ГТУ, а також практично необмежене “тиражування” потужності пальникових систем, набраних на основі окремих модулів. В результаті виконаного циклу дослідно-конструкторських робіт встановлена можливість створення ефективних пальникових систем на основі двох типових модулів (СГЛ-15 та СГЛ-50). Основні режимні та конструктивні характеристики названих модулів, що пройшли в свій час атестацію в ГІЦ ГУ, приведені у табл. 2.

Таблица 2 – Характеристики струминных линейных пальников

Параметр	Типорозмір	
	СГЛ-50	СГЛ-15
Ном. тепл. потужн., МВт	0,7	0,17
Мін. тепл. потужн., МВт	0,1	0,025
Габаритні розміри, мм	330x330x330	215x215x215
Макс. вміст NOx*, мг/м <sup>3</sup>	90	40
Макс. вміст CO*, % об.	Відсутній	
Хім. неповнота згорання, % об.	Відсутня	

\* Концентрації приведені у перерахунку на  $\alpha = 1$ .

Представлені у табл. 2 енерго-екологічні показники отримані при роботі пальників на холодному чистому повітрі, а їх рівень обумовлює можливість ефективного використання пальників СГЛ у складі виносних підтопкових пристроїв (рис. 1-б).

Для визначення можливості застосування таких пальників як елементів блоку допалюючих пристроїв були проведені тестові випробування пальника СГЛ-50 на спеціалізованому лабораторному стенді (рис. 5) який складався з системи подачі повітря та палива, двох послідовно включених пальників (перший з них виконував функцію форкамери, а другий – дослідний зразок СГЛ-50), охолоджувача димових газів (розташованого між двома пальниками) та системи діагностики робочих та енерго-екологічних характеристик.

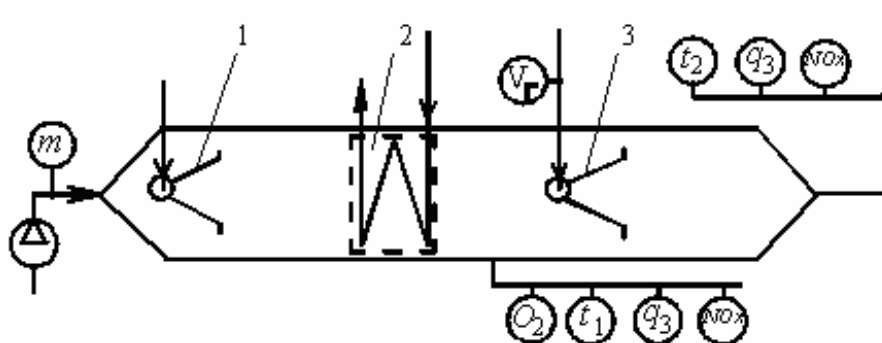


Рисунок 5 – Дослідна установка: 1 – форкамера; 2 – охолоджувач продуктів згорання; 3 – пальник СГЛ-50.

Представлений на рис. 5 стенд дозволив імітувати роботу пальника типу СГЛ-50 в умовах експлуатації БДП на підігрітому забаластованому окисника (стосується схеми рис. 1-а).

Фрагмент даних, що представлено у табл. 3, засвідчує суттєві переваги пальників типу СГЛ в порівнянні з іншими типами пальників, а разом з даними, наведеними у табл. 2, можна стверджувати про універсальні можливості застосування

пальників СГЛ, як по схемі рис. 1-а (в складі БДП), так і в по схемі рис. 1-б (в складі ВПП).

Таблиця 3 – Результати діагностики модуля СГЛ-50 при роботі на забаластованому підігрітому окиснику

Режимні параметри				Енерго-екологічні показники						
				Δр, Па	CO*, % об.		qз, %		NOx*, мг/м <sup>3</sup>	
V <sub>г</sub> , м <sup>3</sup> /Г	t <sub>1</sub> , °С	O <sub>2</sub> , % об.	Δt <sub>під</sub> , °С		перед пал.	за пал.	перед пал.	за пал.	перед пал.	за пал.
<b>57</b>	290	16.8	176	170	~ 0	~ 0,02	0,02	0,1	88	102
		16,85	140	280	~ 0,02	~ 0	0,05	0,03	100	115

\* Концентрації CO та NOx приведені у перерахунку на α = 1.0

Остаточо можна визначити область застосування пальників типу СГЛ – це пальники у потоці холодного чистого повітря або забаластованих підігрітих димових газів при Δt<sub>під</sub> = 30...200 °С та більше. Їхніми перевагами є простота конструкції, виготовлення і монтажу; висока ремонтоздатність та надійність роботи, незначні втрати тиску та широкий діапазон стійкої роботи; високий рівень вигорання палива та низький рівень емісії оксидів азоту и оксиду вуглецю, мала металоємність і можливість “тиражування” теплової потужності.

Характерною особливістю робочого процесу пальників: дифузійно-стабілізаторних (рис. 2) та струминних з конічним (рис. 3) і лінійним (рис. 4) компонуванням елементів є можливість їх ефективної експлуатації при високих і змінних надлишках повітря (окислювача), що не дозволяє застосувати такі пальники у складі БПП (рис. 1-в), які працюють при надлишках окислювача, близьких до одиниці. У цьому випадку найбільш ефективною технологією допалювання є трубчаста технологія, розроблена в останні роки спільно НТУУ «КПІ» і ІГ НАН України [10, 11]. Дана технологія не має аналогів у світовій практиці спалювання газу.

В основу організації робочого процесу пальників трубчастого типу (рис.6) покладено застосування аеродинамічних ефектів каналу з раптовим розширення з дифузійним (дотична подача струменів палива до повітряних струменів), попереднім (радіальна подача струменів палива в потік окисника) та комбінованим сумішоутворенням. Сукупність одиночних трубчастих елементів створює регулярну



а)

б)

Рисунок 6 – Загальний вигляд трубчастих пальників з дифузійним (а) та попереднім (б) сумішоутворенням

коміркову структуру, що дозволяє компонувати такі елементи в газоходах будь-якої форми. На рис. 7 представлені характеристики емісії оксидів азоту та оксиду вуглецю при спалюванні природного газу у пальнику, що створено на базі трубчастих елементів з дифузійним сумішоутворенням, які відображають високу ефективність застосування таких пальників в умовах роботи блоків пальникових пристроїв (рис. 1-в). Особливістю експлуатації енергетичних схем у вигляді “тандему = газова турбіна + котел” є те, що БПП у загальному випадку повинен працювати у двох основних режимах: основному при подачі вихлопних газів ГТУ в котел з додатковим допалюванням з підвищеним рівнем надлишку окисника  $\alpha \rightarrow 1,4 \dots 2,0$  та вище і аварійному (або резервному) при подачі холодного повітря (від автономного джерела) при надлишках повітря, що наближаються до 1,0.

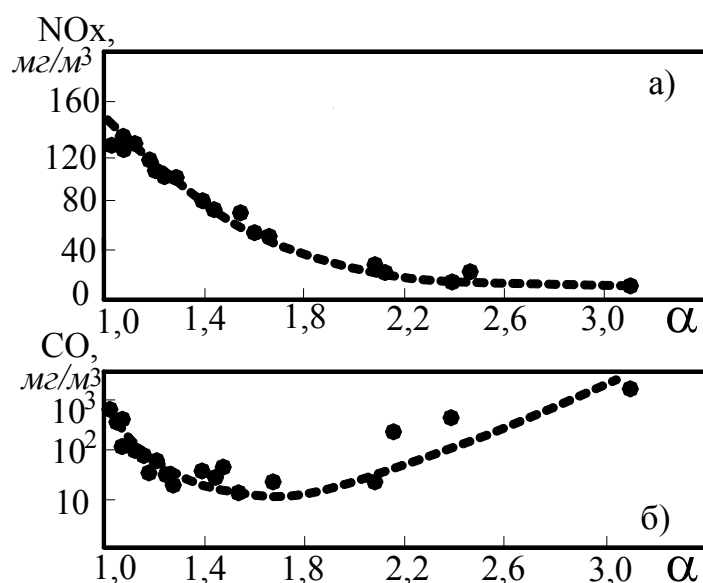


Рисунок 7 – Емісійні характеристики пальників на базі трубчастих елементів з дифузійним сумішоутворенням (NO<sub>x</sub> та CO – діючі концентрації)

Ефективність застосування трубчастої технології у названих умовах визначається найменшим рівнем втрат тиску, хімічної неповноти згорання та емісії токсичних NO<sub>x</sub> та CO, широким діапазоном стійкої роботи по коефіцієнту надлишку повітря, практично необмеженою можливістю «тиражування» теплової потужності при комірковому компонентуванні одиночних елементів у газоході будь-якої конфігурації.

### Висновки

При остаточному визначенні найбільш ефективної технології допалювання на вихлопі ГТУ (при однозначній відповідності іншим вимогам) на перше місце необхідно ставити дотримання вимог енергетичної ефективності (мінімум втрат тиску і хімічної неповноти спалювання палива) і екологічної безпеки (мінімум додаткової емісії NO<sub>x</sub> і CO).



Для умов роботи БДП переваги мають пальники типу СГЛ, які характеризуються мінімальними втратами тиску (що дуже важливо для пальників у потоці), високою повнотою згорання палива і мінімальною емісією NOx і CO.

Для умов роботи виносних підтопкових пристроїв переваги мають пальники типу СГ (помірні втрати тиску, висока повнота згорання і низькі емісійні характеристики). В складі ВПП досить ефективним може бути застосування пальників типу СГЛ.

Для умов роботи БПП безперечну перевагу має використання трубчастої технології допалювання (мінімальні втрати тиску, висока повнота допалювання і мінімальна емісія NOx і CO, можливість ефективної роботи як в основному, так і в аварійному або резервному режимах експлуатації).

#### Література

1. Любчик Г.Н., Говдяк Р.М., Варламов Г.Б., Шелковський Б.И. Когенерация и утилизация энергии на выхлопе ГТУ// Первая в Украине Международная конференция “Когенерация в промышленности и коммунальной энергетике”. – К., 2004. – С. 219-220.
2. Любчик Г.М., Варламов Г.Б., Говдяк Р.М., Чабанович Л.Б., Шелковський Б.И. Эффективні технології допалювання палива у форсованих системах утилізації теплової енергії на вихлопі ГТУ// Зб. “Нафта і газ України”. – К.: НАК України. – 2004. – С.159-160.
3. Акулов В.А., Бутовский Л.С., Жемчугов В.И. та ін. Испытание блока дожигающих устройств ГТ-25-700 на Якутской ГРЭС// Теплоэнергетика, № 6, 1981.– С. 48-51.
4. Бутовский Л.С., Грановская Е.А., Любчик Г.Н., Христин В.А. Исследование закономерностей выгорания топлива за уголковыми и плоскими стабилизаторами пламени// Теория и практика сжигания газа.- М.: Недра, 1975, вып. VI.– С. 324-338.
5. Морозов О.В. Горелочные устройства котлов-утилизаторов ПГУ// Энергохозяйство за рубежом, 1986, №5.– С. 13-15.
6. Макара Р.М., Шелковский Б.И., Любчик Г.Н., Христин В.А. Энергосбережение и теплоснабжение на объектах транспорта газа // Пром. Теплотехника, т. 14, № 1-3, 1992. – С. 51- 57.
7. Любчик Г.Н., Христин В.А., Иванникова Л.В. и др. Струйные горелки для сжигания жидкого и газообразного топлива// Науч. техн. достижения, Вып. 6, 1990. – С. 31-34.
8. Марковский А.В., Любчик Г.Н., Плюснина Л.В., Родичев О.Ю. Горелочное устройство модульного типа в установках термического и термokatалитического обезвреживания // Термическая и термokatалитическая очистка газовых выбросов в атмосфере.- К.: Наукова думка, 1984. – С. 123-127.
9. А.С. 877233 (СССР), Газовая горелка /Г.Н Любчик, В.А. Христин, Г.С. Марченко. – Б.И. – 1981, №40.
10. Пат. 34812 Укр., МПКF23D14/02, F23D14/22. Газовий пальник/ Г.М. Любчик, Г.С. Марченко. – опубл. 2001, бюл.№2.
11. Любчик Г.М., Марченко Г.С., Варламов Г.Б., Мікулін Г.О., Макаренко В.В., Левчук С.О. Емісійні характеристики пальників на базі трубчастих модулів// Екотехнології та ресурсозбереження, №1, 2004. – с.73 – 79.

© Любчик Г.М., Варламов Г.Б., Мікулін Г.О., Говдяк Р.М., Чабанович Л.Б., Шелковський Б.И., 2005