

Визначення основних характеристик стабілізаторних мікрофакельних пальникових пристроїв при спалюванні забаластованих паливних газів

О. Ю. Черноусенко, Л. С. Бутовський, О. О. Грановська, О. С. Мороз,
О. С. Старченко

Були проведені експериментальні дослідження щодо спалювання альтернативних газів у вигляді суміші пропан-бутану з повітрям і двоокисом вуглецю за стабілізаторним плоским модулем, який обтікався з обох боків повітряним потоком. Забаластоване паливо подавалось струменями в повітряний потік із отворів, що розміщувались на бокових стінках стабілізатора. При цьому відбувалось часткове попереднє перемішування палива і повітря. Встановлено, що при баластуванні палива інертними домішками довжина факелу і максимальна температура поступово зменшуються, а викиди оксидів азоту знижуються. При збільшенні вмісту баласту в паливі відбувається зрив горіння. Встановлена залежність стійкості факелу від відносної витрати баласту. Для стабілізації горіння в зону рециркуляції за стабілізатором з окремого колектора подається високо реакційне паливо. Забаластоване паливо проходить через чергові факели високотемпературного палива і відбувається процес горіння всього палива. Комбінована схема сумішеутворення дозволяє регулювати витрату палива по зонах і таким чином підтримувати стабільну потужність пальника. У разі подачі всього палива в зону рециркуляції за стабілізатором можлива поява так званого «багатого» зриву, при якому відбувається відрив факелу від стабілізатора. При роботі на таких режимах високо реакційне паливо подається з отворів на бокових стінках стабілізатора, які розміщуються ближче до його зривних кромek, ніж отвори подачі забаластованого палива. При цьому струмені забаластованого палива також проходять між факелами високо реакційного палива і відбувається сумісне горіння всього палива.

Ключові слова: пальниковий пристрій, сталість горіння, забаластований паливний газ, довжина факелу, стабілізатор, баластування, паливний газ, характеристики горіння.

1. Вступ

В світі спостерігається карколомне підвищення цін на природний газ. Оскільки рівень споживання в енергетиці та промисловості викопних палив, зокрема, природного газу, в значній мірі впливає на розвиток народного господарства промислово розвинених країн, ця подія ставить під загрозу економічну стабільність цих держав. Такий факт підсилює інтерес до проведення досліджень щодо широкого використання інших палив, що можуть замінити природний газ. Сюди відносяться таке високо реакційне паливо, як скраплений газ (пропан-бутан), а також так звані альтернативні газові палива природного та штучного походження.

Озвучений стан речей має особливе значення для держав, в народному господарстві яких відмічається дефіцит енергоносіїв, в першу чергу, природного газу. Враховуючи високу ціну імпортного природного газу для них є актуальним заміщення витрат висококалорійного природного газу середньо та низько калорійними газовими паливами природного та штучного походження [1].

Наприклад, за даними Агенства з охорони оточуючого середовища США обсяг викидів метану в діючих та закритих вугільних шахтах склав у 2020 р. 1742 Мт у еквіваленті двоокису вуглецю [2].

Використання альтернативних палив дозволить скоротити витрату коштовних та дефіцитних викопних водне-вуглецевих палив. Включення в паливний баланс відходів сільськогосподарського та промислового виробництва також дозволить зменшити викиди двоокису вуглецю у навколишнє середовище.

Таким чином, питання використання альтернативних газових палив, в тому числі, в енергетиці і промисловості, та пошук засобів для їх ефективного спалювання є дуже актуальним і повинно бути одною зі складових політики раціонального та ощадливого використання відновлювальних джерел енергії.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [3] викладені основи біогазових технологій, виконано аналіз властивості біомаси як енергетичного палива, а також ефективності використання біоенергетичного палива.

Альтернативні палива в переважній більшості являють собою гази, що містять у своєму складі метан в різних пропорціях, розбавлений вуглекислотою, азотом, повітрям і різними домішками. Якщо вважати баластні домішки інертними, то їх присутність, фактично, зводиться переважно до зменшення частки метану, що виділяє тепло, і збільшенні баластної маси газів, що тепло поглинає. Це призводить до зниження температури полум'я, звуження концентраційних меж горіння палива і зниження стійкості горіння в повітряному потоці.

Кінетика механізму горіння різних забаластованих газів вивчалась в [4]. Показано, що принципово механізми горіння метану і біогазу мають однаковий характер.

В Інституті Газу НАН України виконуються дослідження та впровадження в промислових котлах та установках різного призначення біогазу різного складу [5]. Встановлено зменшення довжини факелу при збільшенні вмісту двоокису вуглецю, зниження швидкості розповсюдження полум'я, а також зменшення виходу оксидів азоту. В той же час відмічається небезпека відриву полум'я.

При дослідженні сумішей природного газу та диоксиду вуглецю (імітація біогазу) [6] був зроблений висновок, що така суміш може імітувати в певних межах біогаз і має з ним схожі характеристики. При збільшенні вмісту домішки зменшується довжина факелу, знижуються викиди оксидів азоту, а також погіршується сталість факелу у порівнянні з метаном.

В [7] досліджувався вплив сумішей метан-повітря та біогаз-повітря на характеристики горіння ламінарного факелу. Були визначені швидкості горіння сумішей і зроблені висновки, що присутність інгібіторів (двоокис вуглецю і

азот) має більший вплив на зниження нормальної швидкості розповсюдження полум'я в багатій суміші.

Роботи [8] виконувались із спалювання газів з різним складом суміші, що імітувала різні гази: з воднем, двоокисом вуглецю та метаном. Встановлено, що на даний час відсутня універсальна модель турбулентного горіння газів. Найбільш придатною є К-ε модель. Експериментальні дослідження показали, що добавка водню покращує стабільність горіння завдяки збільшенню нормальної швидкості розповсюдження полум'я.

В промисловості з метою економії коштів часто при спалюванні низько реакційних використовують ті ж самі пальники, що призначені для спалювання високо реакційних палив. Але відмінності у властивостях цих газів призводять до звуження можливого діапазону горіння, зриву факелу і появи значного недопалу [9].

Одним з підходів щодо інтенсифікації процесу спалювання низько калорійних газів при одночасному укороченні факелу може бути попереднє перемішування газу з повітрям в змішувачі, а також багатоструменева подача газу в прямоточний або закручений потік повітря [10]. Однак в обох випадках залишається проблема забезпечення сталості горіння при зміні вмісту баласту у газі.

У разі зміни концентрації домішок необхідні додаткові засоби для стабілізації полум'я. Таким засобом може бути використання додаткового джерела з високою температурою – стабілізуючого (чергового) факелу.

Такий спосіб спалювання газу із змінними характеристиками запропоновано в [11]. В розробленому пальнику подача природного і генераторного газу передбачається по окремих каналах. Утворення суміші газів та їх перемішування з повітрям здійснюється в тунелі пальника та в самій топці, що призводить до зменшення інтенсивності процесу горіння і збільшення довжини факелу.

Останнім часом питанню використання забаластованих газів приділяється значна увага в енергетиці, зокрема, стосовно газових турбін.

В Європейському Союзі виконується проєкт «Високоєфективна газова турбіна з використанням синтетичного газу» [12]. В рамках проєкту передбачено використання сучасних технологій газифікації та переробки біомаси для отримання біогазу (суміш 40÷75 % метану з вуглекислим газом і різними домішками) і синтетичного газу (синтез-газу – суміші водню і оксиду вуглецю плюс різні домішки).

Відповідні дослідження [13] виконано при роботі на синтез-газі газотурбінної установки типу V94.2K компаній Siemens та Ansaldo. Вказано, що при розробці пальникових пристроїв даного типу довелося вирішувати задачу, пов'язану з високою швидкістю розповсюдження полум'я завдяки присутності водню. В модернізованому пальниковому пристрої для турбіни SGTS-4000F передбачено дві лінії подачі газу – пілотна і основна. Використання в якості пілотного палива синтез-газу дозволяє зменшити втрати природного газу. В зоні змішування спосіб спалювання наближений до спалювання попередньо підготовленої суміші. Звертається увага на можливість «проскоку» полум'я в змішуючу частину пальника.

В роботі [14] для турбіни потужністю 2,5 МВт передбачено проведення досліджень на природному, попутному нафтовому і піролізному газі, дизельному паливі. Дослідження виконувались з використанням технології RQL (Rich-Burn, Quick-Mix, Lean-Burn Combustor), тобто горіння багаті суміші, швидке перемішування і горіння бідної суміші. Встановлено, що при роботі на синтетичному паливі з'являється вірогідність збільшення NO_x , що потребує додаткових досліджень.

В [15] визначались характеристики газової турбіни при використанні біогазу, етанолу і синтез-газу у порівнянні з роботою на природному газі. Встановлена можливість роботи з використанням біопалив, але потрібна відповідна перебудова конструкції камери згоряння.

При використанні іскрового запалювання факелу були проведені випробування на трьох видах біопалива у суміші з метаном [16]. Встановлено, що оптимальним варіантом є суміш біогазу з добавкою 50 % метану. При тих же умовах був досягнутий найвищий рівень ефективності і зниженні оксиду вуглецю і оксидів азоту.

Проведені дослідження показали, що для стабілізації і ефективного горіння низькокалорійного газу важливу роль має не тільки наявність чергового факелу, а і спосіб організації комбінованого горіння. Схема подачі газів залежить, як правило, від конструкції даного пальникового пристрою і не може бути розповсюджена на пальники іншого виконання.

В енергетиці та промисловості для організації робочого процесу спалювання палива, в тому числі низько реакційного, традиційно використовуються реєстрові пальникові пристрої. До недоліків реєстрових пальникових пристроїв можна віднести значний гідравлічний опір, а також високу чутливість повноти згоряння до зміни коефіцієнту надлишку повітря (α) [17].

Таким чином, проблема спалювання альтернативних газових палив вирішується конкретним виробником в залежності від прийнятого способу організації робочого процесу і конструктивного виконання пальникового пристрою.

Одним з можливих перспективних напрямків забезпечення ефективного спалювання альтернативних паливних газів може бути використання технології мікрофакельного спалювання палива в модульних пальниках стабілізаторного типу. Робочий процес в таких пальниках при спалюванні висококалорійних газів досліджено в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут (НТУУ «КПІ»» [18, 19].

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є визначення основних характеристик стабілізаторних модульних пальникових пристроїв в умовах спалювання забаластованих газових палив при різних схемах сумішоутворення. Досягнення мети дозволить розробити рекомендації щодо вибору конструктивних параметрів пальника в залежності від умов роботи, розширити номенклатуру низько реакційних палив і сферу застосування модульних пальників.

Реалізація поставленої мети передбачає розв'язання наступних завдань:

- визначити характеристики горіння палива за стабілізатором при подачі газу за різними схемами сумішеутворення;
- визначити вплив на характеристики горіння додавання домішок у вигляді повітря і двоокису вуглецю на попереднє перемішування з газовим паливом;
- розробити способи розширення діапазону сталого горіння забаластованого низько реакційного газу шляхом використання комбінованої системи сумішеутворення;
- виробити рекомендації щодо організації сталого спалювання забаластованих палив в стабілізаторних пальниках.

4. Матеріали та методи досліджень

Експериментальні дослідження виконувались на дослідному стенді із змінними робочими ділянками за існуючими методиками з використанням відповідних приладів та обладнання. Робоча ділянка стенду показана на рис. 1. Повітря від компресора через спрямляючу ділянку 1, дросельну решітку 2 подається в перехідну ділянку 3 і потім в робочу ділянку 4. Стінки робочої ділянки покриті вогнетривкою футеровкою 7 і додатково охолоджуються водою, яка подається через патрубок 9 в охолоджуючий канал 8 і виходить через патрубок 10. Для виконання замірів температури газів в топковому просторі і відбору проб для хімічного аналізу передбачена система штуцерів 6.

В стенді встановлюється система плоских колекторів-стабілізаторів 5, через які подається паливо (газ) на горіння.

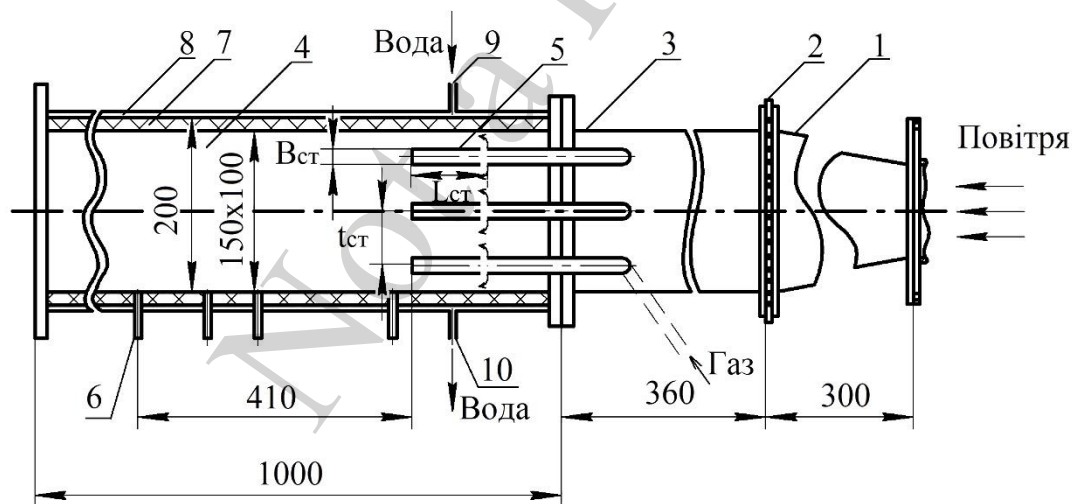


Рис. 1. Дослідний стенд: 1 – спрямляюча ділянка; 2 – дросельна решітка; 3 – перехідна ділянка; 4 – робоча ділянка; 5 – колектор-стабілізатор; 6 – штуцер; 7 – вогнетривка футеровка; 8 – охолоджуючий канал; 9 – підведення охолоджуючої води; 10 – відведення охолоджуючої води

Конструкція стенду дозволяє вимірювати і контролювати температуру газів, поле швидкості повітря, концентрацію газу при ізотермічних продувках і склад продуктів реакції при горінні.

Проведення експериментальних досліджень сумісного спалювання високо реакційного та альтернативних газових палив різного складу виконувалось на модулях пальникових пристроїв.

Під час досліджень були випробувані пальникові пристрої на базі плоских стабілізаторів порівняно невеликого розміру, які встановлюються в повітряному потоці (рис. 2).

В окремому модулі пальника за рис. 2, а в корпусі 1 передбачено дві роздільних камери і окреме підведення палива до кожної з них. По патрубку 2 паливо поступає в камеру 3 і далі через отвори 4 подається в аеродинамічний слід за стабілізатором (умовно – I схема газороздачі).

За другою схемою газороздачі (умовно – II схема), паливо по патрубку 5 поступає в окрему порожнину стабілізатора і через отвори 6 струменями впровадження подається в повітряний потік, що обтікає стабілізатор. На рис. 2, б показано розміщення модулів в пальниковому пристрої.

Під час досліджень для варіанта з подачею газу за I схемою прийняте таке умовне позначення стабілізатора, наприклад: 15,5-0,155-8Ø3-I. Перша цифра означає ширину стабілізатора, $B_{ст}$, мм; друга – коефіцієнт затінення камери згоряння, $K_f = B_{ст}/t_{ст}$, де $t_{ст}$ – крок розміщення стабілізаторів; третя цифра – кількість і діаметр газових отворів, d_r , мм; четверта – прийнята умовна схема газороздачі.

При подачі газу за II схемою прийняте таке умовне позначення, наприклад: 15,5-0,155-12Ø2-60-II. Перша цифра означає $B_{ст}$, мм; друга – K_f ; третя цифра – кількість і діаметр газових отворів, d_r , мм; четверта – відстань L_1^{II} , мм, від осі газових отворів до зривної кромки стабілізатора; остання цифра – умовна схема газороздачі.

На дослідній ділянці виконувались випробування одного або системи модулів при зміні параметрів в такому діапазоні: $B_{ст} = 15 \div 40$ мм, $K_f = 0,15 \div 0,45$, діаметр газових отворів $d_r = 1,5 \div 3,0$ мм.

В якості високоенергетичного палива використовувався балонний природний газ з вмістом метану до 98–99 % і балонна суміш пропан-бутану (50 % на 50 %). В якості баластових домішок використовувались двоокис вуглецю (CO_2) і повітря.

Розроблений пальниковий пристрій відповідає сучасному підходу до створення пальників, а саме принципу модульності і мікрофакельності, який реалізовано в конструкціях пальникових пристроїв і камер згоряння сучасних провідних фірм [20–24].

Кожен елемент пальникового пристрою (у даному випадку стабілізатор) з відповідною системою організації процесу сумішоутворення та горіння являє собою окремих самостійно працюючий пальник, в якому процес горіння особливо на початковій ділянці відбувається індивідуально (рис. 3).

Запропонований підхід дозволяє в процесі розробки пальника виконувати дослідження і доводку окремого модульного елемента. Якщо пальниковий пристрій складається з N модулів, то при загальній витраті газу на пальник G_r на один модуль припадає G_r/N доля витрати палива. При розробці пальникового

пристрою для конкретного об'єкту можна змінювати кількість модулів і, таким чином, загальну потужність пальника.

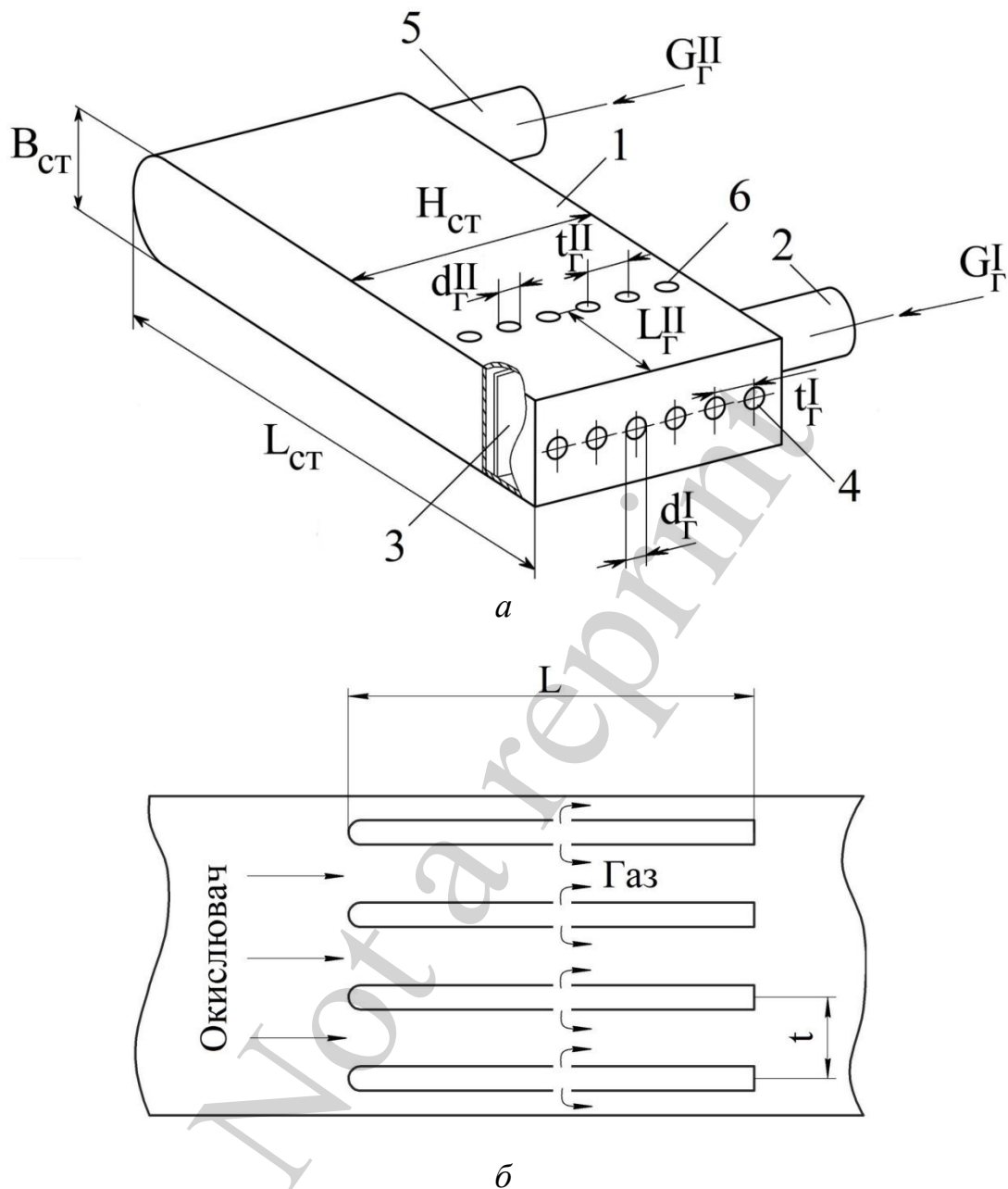


Рис. 2. Пальниковий пристрій для спалювання газу: *a* – модульний стабілізатор для комбінованого спалювання газів; *б* – стабілізаторний мікрофакельний пальниковий пристрій; 1 – корпус; 2, 3, 4 – патрубок, камера і отвори подачі газу в зону рециркуляції (I схема); 5, 6 – патрубок і отвори подачі газу в обтічний повітряний потік (II схема)

Зменшуючи розмір модульного елемента, можна отримати мікрофакельне горіння із зменшеною довжиною зони горіння і топкового простору в цілому. При цьому також знижуються викиди оксидів азоту, вміст яких залежить від часу перебування продуктів реакції в зоні високих температур.

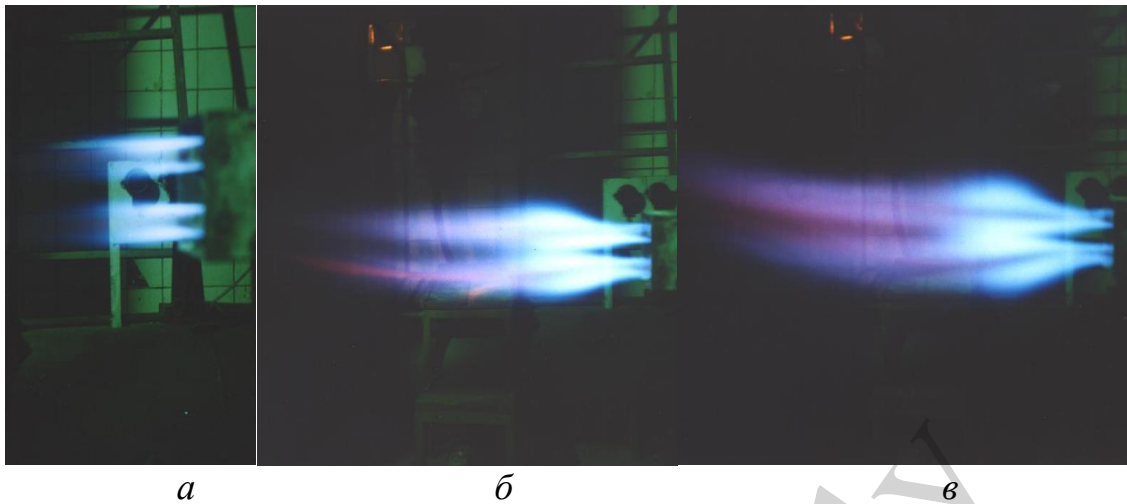


Рис. 3. Розвиток факелу за стабілізаторами при зміні коефіцієнту надлишку повітря ($B_{ст}=15$ мм, $K_f=0,4$): *a* – $\alpha=10$; *б* – $\alpha=1,94$; *в* – $\alpha=1,01$

При реалізації запропонованого методу спалювання палива використовуються характерні особливості аеродинамічної структури потоку в кормовому сліді за погано обтічним тілом. При цьому виникає рециркуляційна течія в кормовій області стабілізатора і утворюється граничний шар з підвищеною інтенсивністю турбулентності потоку за його зривною кромкою. Це забезпечує високі масообмінні характеристики зони рециркуляції, що значною мірою впливає на стабільність горіння і характер вигорання в сліді за стабілізатором [25–27].

При струменевій подачі палива за I схемою – назустріч зворотньому току зони рециркуляції за стабілізатором, відбувається інтенсивне перемішування палива з високотемпературними газами цієї зони, паливо розсіюється і утворюється суміш, яка за своїм складом наближається до гомогенної. В той же час інтенсивність масообміну в зоні рециркуляції не достатня для утворення повністю гомогенної суміші. Крім того, в зону рециркуляції поступає тільки частина окислювача із граничного шару повітря, що обтікає стабілізатор.

Таким чином, процес спалювання газу за I схемою має риси, які притаманні дифузійному факелу, тобто можливістю сталої роботи пальника на режимах запалювання і «бідного» зриву при загальному коефіцієнті надлишку повітря в топковому просторі $\alpha \gg 1,0$. Дифузійний факел характеризується широким діапазоном роботи з високою ефективністю горіння, а також збільшенням довжини факелу при підвищенні витрати (швидкості газових струменів) палива.

При поступовому збільшенні витрати палива далекобійність газових струменів підвищується, основна маса палива перестає розсіюватись в зоні рециркуляції, а виходить в прямий потік за межі зони зворотних струменів. В результаті процес горіння відбувається у супутньому повітряному потоці поза межами зони, що може призвести до так званого «багатого» зриву і обмежує можливість використання такої схеми при $\alpha \rightarrow 1,0$.

При необхідності роботи із зменшеною довжиною факелу на режимах з $\alpha \rightarrow 1,0$ із збереженням високої інтенсивністю процесу горіння слід використовувати подачу палива за II схемою.

При роботі за такою схемою відбувається часткове попереднє перемішування газу з повітрям і в перерізі вихідної кромки стабілізатора на горіння поступає суміш з більш високим ступенем гомогенності, ніж при подачі палива за I схемою. Ступінь попереднього перемішування повітря і газу, який подається за II схемою, залежить від далекобійності газових струменів у повітряний потік та відстані L_1^{II} (рис. 2, а) від зривної кромки стабілізатора до газових отворів. У випадку значного переміщення газових отворів від зривної кромки стабілізатора назустріч повітряному потоку (збільшення L_1^{II}) в зону горіння може поступати практично гомогенна суміш газу з повітрям. подача газу за II схемою дозволяє забезпечити інтенсивне горіння і зменшити довжину факелу при $\alpha^{\text{II}} \rightarrow 1,0$. В зв'язку з тим, що при подачі газу за другою схемою суміш газу з повітрям наближається до гомогенної, сталість факелу на режимах запалювання та «бідного» зриву зменшується. В той же час слід враховувати, що при роботі на часткових навантаженнях в пальнику може спостерігатись зменшення повноти згоряння палива і поява недопалу.

Таким чином, в стабілізаторних пальникових пристроях з мікрофакельним горінням палива забезпечується високий рівень ефективності спалювання палива в широкому діапазоні зміни потужності і коефіцієнту надлишку повітря. Такі пристрої характеризуються легким та надійним запуском при знижених витратах палива, надійністю і простотою регулювання потужності при зменшеній емісії токсичних оксидів азоту і вуглецю.

Модульні стабілізаторні пальникові пристрої різного конструктивного виконання і потужності знайшли широке використання в народному господарстві країни при спалюванні газоподібного палива [19, 28].

Для забезпечення сталої і високоефективної роботи пальникового пристрою при зміні режимів в широкому діапазоні режимів передбачена можливість одночасної подачі газу за обома схемами. подача газу за другою основною схемою забезпечує ефективне згоряння палива при $\alpha \rightarrow 1,0$. При необхідності розширити діапазон сталої роботи при збільшених коефіцієнтах надлишку повітря $\alpha \gg 1,0$. підключається подача газу за першою схемою.

5. Результати досліджень характеристик пальникового пристрою при спалюванні забаластованих газових палив

5. 1. Характеристики горіння при подачі газу за II схемою – в обтічний потік повітря

На рис. 4, а–з наведено фотографії факелів за стабілізатором ($B_{\text{ст}}=15,5$ мм) при однакових коефіцієнтах надлишку повітря для двох схем подачі газу: перша – стабілізатор 15,5-0,4-8Ø3-I при подачі газу в зону рециркуляції (режими а, в, д, ж), друга – стабілізатор 15,5-0,4-32ØI,5-85-II з подачею газу зануренням в обтічний повітряний потік (режими б, г, е, з). При II схемі подачі газу відстань від зривної кромки стабілізатора назустріч повітряному потоку складала $L_1=85$ мм.

Як видно з рис. 4, а–з, подача газу на часткове попереднє перемішування з повітрям дає можливість, при необхідності, скоротити довжину факелу.

На рис. 5 наведена візуальна довжина факелу для трьох варіантів стабілізаторів.

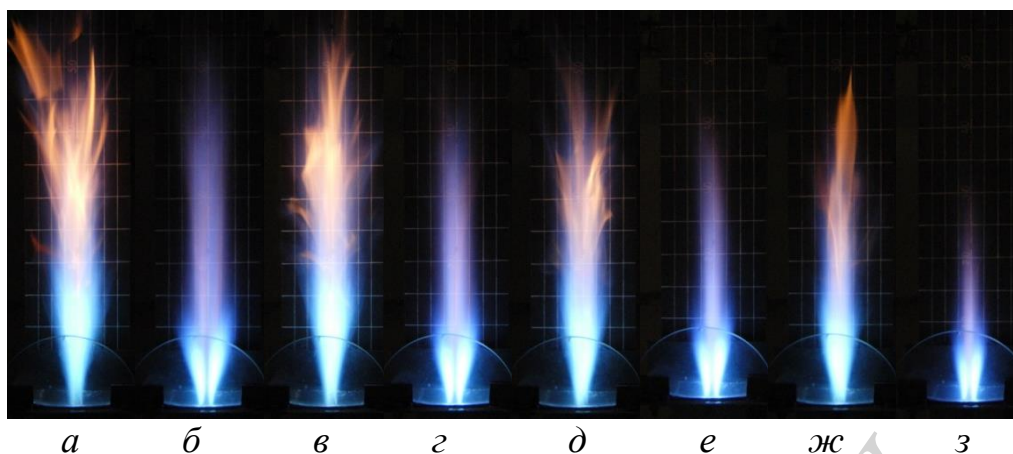


Рис. 4. Характеристики факелу за стабілізатором при двох схемах подачі газу: $a-z$ - порівняльні фотографії факелів; $a, б$ - $\alpha=5,53$; $в, г$ - $\alpha=6,78$; $д, е$ - $\alpha=7,73$; $ж, з$ - $\alpha=8,9$; $a, в, д, ж$ - подача газу в зону рециркуляції за I схемою (15,5-0,155-9Ø3-I); $б, г, е, з$ - подача газу впровадженням в обтічний потік повітря за II схемою (15,5-0,155-32Ø1,5-85-II)

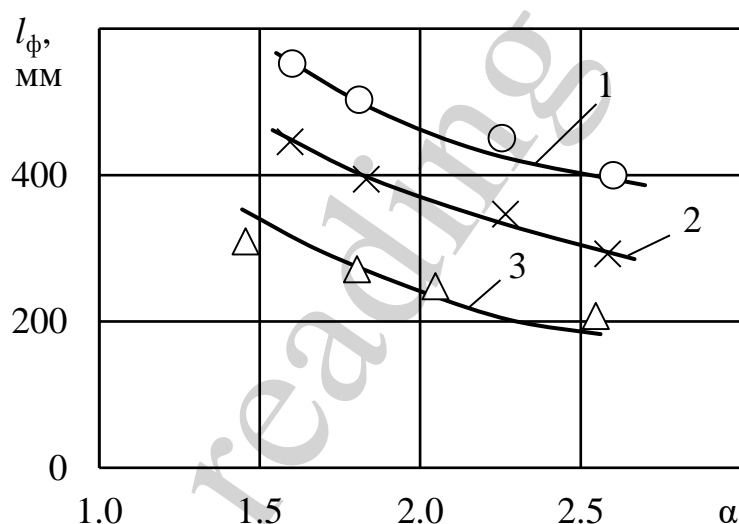


Рис. 5. Візуальна довжина факелу за стабілізатором при подачі газу за різними схемами: 1 - подача в зону рециркуляції, стабілізатор 15,5-0,4-9Ø3-I; 2, 3 подача газу зануренням в обтічний потік, 2 - стабілізатор 15,5-0,4-32Ø1,5-85-II ($L_1^{\text{II}}=85$ мм); 3 - 15,5-0,4-32Ø1,5-120-II ($L_1^{\text{II}}=120$ мм)

Як видно з порівняння ліній 1 та 2, подача газу на попереднє перемішування з повітрям дає можливість скоротити дожину факелу. Подальшого зменшення довжини факелу можна досягти при збільшенні відстані газових отворів до зривної кромки стабілізатора від $L_1^{\text{II}}=85$ мм (крива 2) до $L_1^{\text{II}}=120$ мм (крива 3). При збільшенні відстанні L_1^{II} відбувається більш рівномірне перемішування газу і повітря.

Порівняльні дані щодо впливу схеми сумішоутворення на вигорання палива в сліді за стабілізатором по довжині наведено на рис. 6, де q_3 - хімічний не-

допал, а $\bar{X}=X/V_{ст}$ – відносна довжина зони горіння, X – абсолютна довжина. Крива 1 отримана розрахунком за літературними даними [29] при горінні попередньо перемішаних сумішей ($B_{ст}=40$ мм, $K_f=0,40$; $\alpha=2,0$), крива 2 – дані, отримані при струменевої подачі газу впровадженням в обтічний потік окислювача ($B_{ст}=40$ мм, $K_f=0,40$; $\alpha=2,0$), крива 3 – при подачі палива в зону рециркуляції за стабілізатором ($B_{ст}=40$ мм, $K_f=0,40$; $\alpha=2,0$).

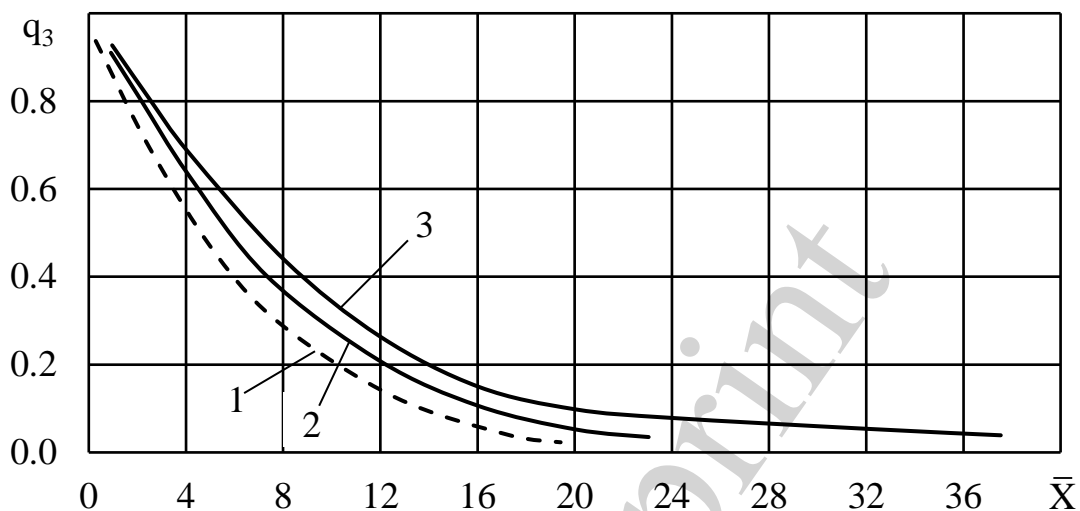


Рис. 6. Порівняння інтенсивності мікрофакельного горіння палива за стабілізаторами в залежності від схеми подачі газу ($t_B=200$ °С, $\alpha=2,0$). 1 – попереднє перемішування палива з окислювачем [29] ($B_{ст}=40$ мм, $K_f=0,40$); 2 – струменева подача газу впровадженням в обтічний потік окислювача (40-0,4-16Ø3-85-II); 3 – струменева подача палива в зону рециркуляції (40-0,4-9Ø3-I)

Таким чином, в залежності від використання відповідної схеми сумішоутворення є можливість впливу на характер горіння палива. Інтенсивність вигорання підвищується і довжина факелу зменшується в такій послідовності – горіння попередньо перемішаної суміші, подача палива впровадженням в обтічний повітряний потік, подача газу в зону рециркуляції.

Розглянута технологія мікрофакельного спалювання газу за стабілізаторами дозволяє шляхом зміни конструктивних параметрів і системи сумішоутворення впливати на характеристики вигорання, довжину зони горіння і, відповідно, необхідний розмір топкового простору.

Були проведені випробування щодо встановлення залежності сталості факелу при II схемі газороздачі від конструктивних і режимних параметрів системи стабілізаторів при спалюванні пропан-бутану.

Була проведена обробка експериментальних даних для систем стабілізаторів при зміні конструктивних і режимних даних в такому діапазоні: ширина стабілізатора $B_{ст}=15,5\div 30,0$ мм; коефіцієнт затінення стабілізаторної решітки $K_f=0,15\div 0,45$; відносна відстань газових отворів від зривної кромки стабілізатора $\bar{L}_1 = 1,0\div 8,0$, де $\bar{L}_1 = L_1 / B_{ст}$; діаметр газових отворів $d_r=1,2\div 3,2$ мм; відно-

шення вихідної торцевої площини стабілізатора до площі газових отворів $F_{ст}/F_{г}=26\div 80$; температура повітряного потоку $T_0=293\div 393$ К.

Узагальнена залежність коефіцієнту надлишку повітря на режимі бідного зриву α_{max}^{II} від цих параметрів має вигляд:

$$\alpha_{max}^{II} = K_{max}^{II} \frac{B_{ст}^{0,5}}{W_K^{1,2} \cdot e^{6,25 \cdot K_f} \cdot \left(\frac{F_{ст}}{F_{г}}\right) \cdot (\bar{L}_1^2 + 30)} \left(\frac{T_0}{273}\right)^{1,4}, \quad (1)$$

$K_{max}^{II} = 0.872 \cdot 10^5$ – коефіцієнт пропорційності у разі спалювання пропан-бутану при інтенсивності турбулентності повітряного потоку $\varepsilon \approx 1,5$ %.

З рівняння (1) видно, що при II схемі подачі газу в обтічний повітряний потік сталість факелу підвищується із збільшенням розміру стабілізатора і температури повітря. Протилежний ефект спостерігається при збільшенні швидкості повітряного потоку, коефіцієнта затінення пальника, відстанні газових отворів, а також при зменшенні відносної площі газових отворів.

На рис. 7 показана залежність сталості факелу на бідному зриві при подачі газу зануренням в обтічний потік від швидкості повітряного потоку в камері для двох типів стабілізаторів: 1 – 15,5-0,155-10Ø3-15-II; 2 – 15,5-0,155-10Ø3-85-II, тобто відповідно на відстані $L_1=15$ мм і $L_1=85$ мм від зривної кромки стабілізатора назустріч повітряному потоку.

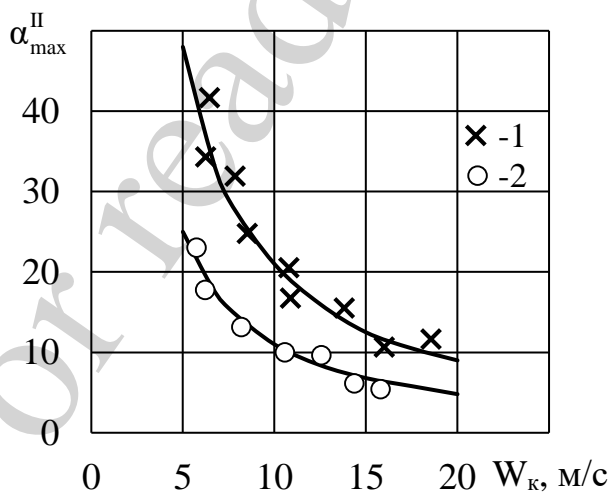


Рис. 7. Залежність сталості факелу на бідному зриві від швидкості повітряного потоку при подачі палива в обтічний повітряний потік для двох типів стабілізаторів: 1 – 15,5-0,155-10Ø3-15-II; 2 – 15,5-0,155-10Ø3-85-II

При порівнянні кривих 1 та 2 на рис. 7 видно, як при інших однакових параметрах сталість факелу зменшується при збільшенні відстані від газових отворів до зривної кромки стабілізатора.

Для обох варіантів коефіцієнт надлишку повітря при бідному зриві $\alpha_{max}^{II} > 2,0$, що свідчить про близькість режиму горіння до дифузійного. Видно також,

що при зміщенні газових отворів назустріч повітряному потоку сталість факелу зменшується. Кінцевий вибір системи газороздачі визначається вимогами до режимів сталості горіння пальника щодо бідного зриву.

Результати досліджень для одного з варіантів стабілізаторів щодо впливу на сталість факелу баластування паливного газу повітрям і двоокисом вуглецю при II схемі газороздачі наведено на рис. 8.

Вздовж осі ординат відкладено відносну витрату палива при зриві $(\bar{G}_r^{II})_{\text{бал}}^{\text{min}} = (G_r^{II})_{\text{бал}}^{\text{min}} / G_{\text{ст}}$, де $(G_r^{II})_{\text{бал}}^{\text{min}}$ – витрата палива на режимі бідного зриву, $G_{\text{ст}} = F_{\text{ст}} \cdot W_{\text{щ}} \cdot \rho_{\text{пов}}$ – умовна витрата повітря, що оббігає стабілізатор [30], $W_{\text{щ}} = W_k \cdot (1 - K_f)$ – швидкість повітря на вихідній кромці стабілізатора.

Через $(\bar{G}_r^{\text{min}})^{II} = (G_r^{\text{min}}) / G_{\text{ст}}$ позначалась відносна витрата палива на режимі бідного зриву факела без баласту. Вздовж осі абсцис нанесена відносна витрата домішок, повітря – $G_{\text{бал}}^{II} / G_r^{II}$ та диоксида вуглецю – $G_{\text{CO}_2}^{II} / G_r^{II}$.

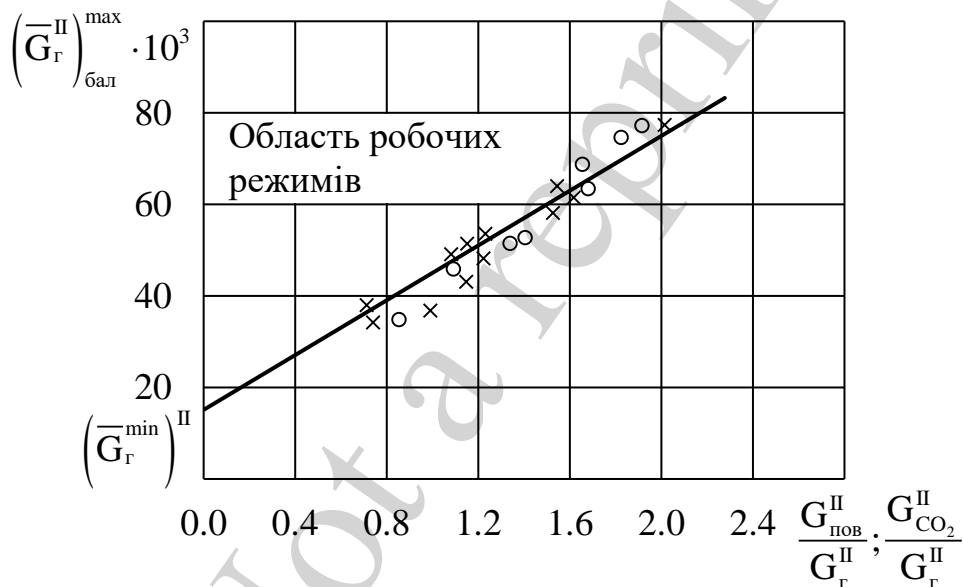


Рис. 8. Вплив на сталість факелу подачі повітря і CO_2 на попереднє сумішеутворення з паливом при II схемі газороздачі. Стабілізатор 15,5-0,155-16Ø3-85-II.

Позначення режимів: x – подача повітря; o – подача CO_2

Область допустимих робочих режимів знаходиться в лівій половині графіка від лінії зриву факела. Як видно з рис. 8, при збільшенні витрати палива можна допустити підвищення долі витрати домішки без зриву факелу.

В межах точності експерименту вплив підмішування баласту у вигляді повітря і CO_2 дає один і той же ефект.

Дослідження сталості факела виконувалось таким чином: встановлювалась певна витрата палива G_r^{II} і поступово додавались на попереднє змішування з паливом домішки $G_{\text{пов}}^{II}$ або $G_{\text{CO}_2}^{II}$ до моменту зриву факелу.

Таким чином, при подачі газу за другою схемою існує певний діапазон сталої роботи пальника при додаванні баласту до паливного газу.

Значення відносної сталості факелу $(\bar{G}_r)_{\text{бал}}^{\text{max}}$ при попередньому підмішуванні до газу баласту (повітря, CO_2) в залежності від витрати домішки $G_{\text{бал}}/G_r^{\text{II}}$ можна розрахувати:

$$(\bar{G}_r)_{\text{бал}}^{\text{min}} = (\bar{G}_r^{\text{min}})^{\text{II}} + K_{\text{бал}}^{\text{II}} \left(\frac{G_{\text{бал}}}{G_r^{\text{II}}} \right), \quad (2)$$

$$(\bar{G}_r^{\text{min}})^{\text{II}} = \frac{(G_r^{\text{min}})^{\text{II}}}{W_{\text{щ}} \cdot F_{\text{ст}} \cdot \rho_{\text{пов}}}, \quad (3)$$

$$(G_r^{\text{min}})^{\text{II}} = \frac{G_{\text{пов}}^0}{\alpha_{\text{max}}^{\text{II}} \cdot L_0}, \quad (4)$$

де $G_{\text{пов}}^0$ – загальна витрата повітря в пальнику, кг/с; L_0 – масовий стехіометричний коефіцієнт, кг/кг; $(\bar{G}_r^{\text{min}})^{\text{II}}$ – відносна витрата газу на стабілізатор при бідному зриві факелу без баласту; $(G_r^{\text{min}})^{\text{II}}$ – абсолютна витрата газу на стабілізатор при бідному зриві факелу без баласту, кг/с; $K_{\text{бал}}^{\text{II}} = 27,9 \cdot 10^{-3}$ – коефіцієнт пропорційності при баластуванні повітрям або CO_2 .

Спостереження за розвитком факелу при подачі палива за II схемою показали, що при збільшенні витрати газу візуальна довжина факелу поступово збільшується (рис. 9, а–г) і температура газів підвищується (рис. 9, д). Це свідчить про наявність характеристик дифузійності у процесі горіння.

На рис. 9, д і наступних аналогічних рисунках через X означена довжина зони вимірів параметрів на стенді, мм. З рис. 9, д також видно, що найбільш інтенсивний процес горіння спостерігається на початковій ділянці факелу в межах зони рециркуляції $(3 \div 5) \cdot V_{\text{ст}}$, де вигорає основна частка палива і спостерігається максимальний рівень температур газів.

На рис. 10 показано розвиток факелу при горінні з подачею газу за II схемою і попереднім підмішуванням до газу повітря. У разі роботи з баластуванням палива повітрям аналіз даних свідчить, що довжина факелу поступово зменшується (рис. 10, а–в) і рівень температур продуктів горіння в сліді за стабілізатором знижується (рис. 10, г).

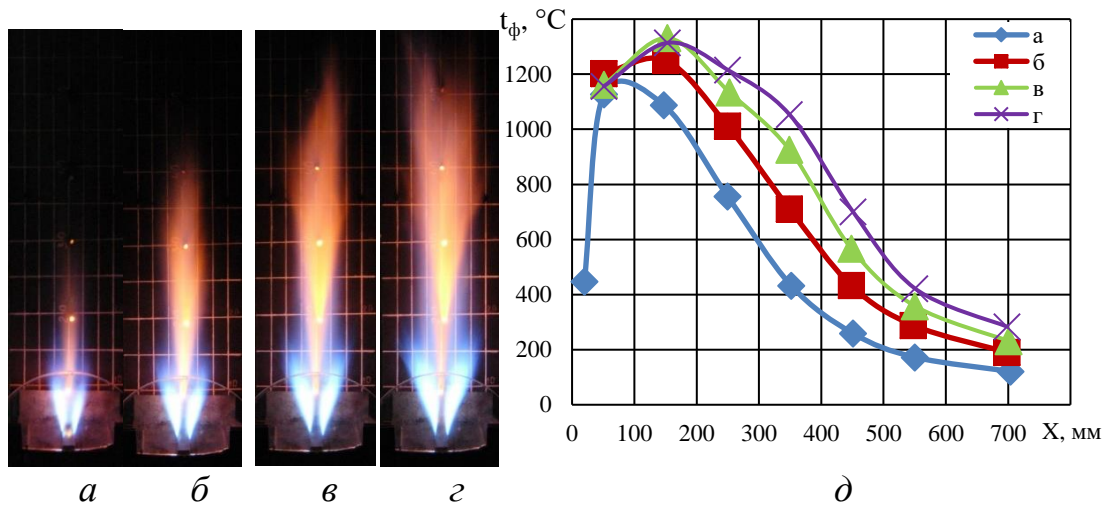


Рис. 9. Характеристики горіння палива (пропан – бутан) за стабілізатором з подачею газу в обтічний потік повітря за II схемою – 15,5-0,155-16Ø3-85-II; $W_k=6,6$ м/с; *a – з* – фотографії факелу; *д* – температура газів вздовж осі сліду за стабілізатором; режими: *a* – $G_r^{II} = 0,38 \cdot 10^{-3}$ кг/с; *б* – $G_r^{II} = 0,58 \cdot 10^{-3}$ кг/с; *в* – $G_r^{II} = 0,78 \cdot 10^{-3}$ кг/с; *г* – $G_r^{II} = 0,93 \cdot 10^{-3}$ кг/с

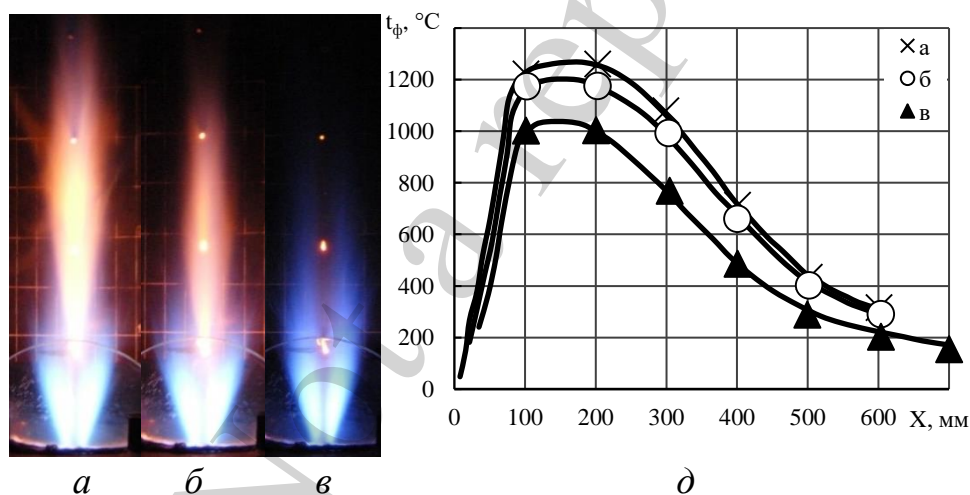


Рис. 10. Характеристики горіння палива за стабілізатором з подачею суміші газу з повітрям в обтічний потік повітря за II схемою – 15,5-0,155-16Ø3-85-II при постійній витраті газу $G_r^{II} = 0,64 \cdot 10^{-3}$ кг/с; $W_k=7,0$ м/с; *a–в* – фотографії факелу; *г* – температура газів вздовж осі сліду за стабілізатором; режими: *a* – $G_{пов}^{II} = 0$ кг/с; *б* – $G_{пов}^{II} = 0,25$ кг/с; *в* – $G_{пов}^{II} = 0,50$ кг/с

На рис. 11 показано розвиток факелу при горінні з подачею газу за II схемою і попереднім підмішуванням до газу іншого баласту – диоксиду вуглецю. У разі роботи з баластуванням палива диоксиду вуглецю аналіз даних свідчить, що довжина факелу також поступово зменшується (рис. 11, *a–в*) і рівень температур продуктів горіння в сліду за стабілізатором знижується (рис. 11, *г*).

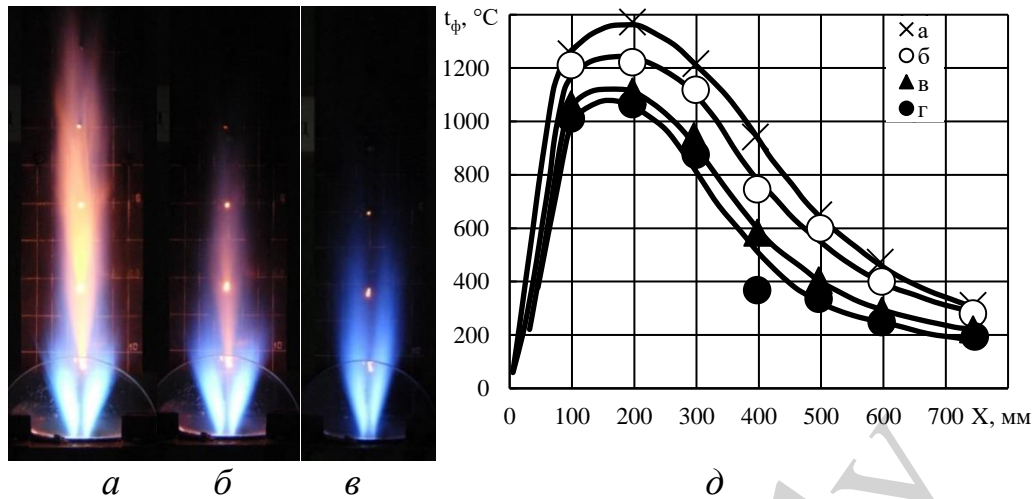


Рис. 11. Характеристики горіння палива за стабілізатором з подачею суміші газу з діоксидом вуглецю в обтічний потік повітря за II схемою – 15,5-0,155-16Ø3-85-II при постійній витраті газу $G_{\Gamma}^{\text{II}} = 1,0 \cdot 10^{-3}$ кг/с; $W_{\text{к}}=7,0$ м/с; а-г – фотографії факелу; д – температура газів вздовж осі сліду за стабілізатором; режими: а – $G_{\text{CO}_2}^{\text{II}} = 0$ кг/с; б – $G_{\text{CO}_2}^{\text{II}} = 0,52 \cdot 10^{-3}$ кг/с; в – $G_{\text{CO}_2}^{\text{II}} = 0,70 \cdot 10^{-3}$ кг/с; г – $G_{\text{CO}_2}^{\text{II}} = 1,23 \cdot 10^{-3}$ кг/с

На рис. 12 показане скорочення відносної довжини факелу

$$\bar{l}_{\phi}^{\text{II}} = \left(l_{\phi}^{\text{II}} \right)_{G_{\text{бал}} > 0} / \left(l_{\phi}^{\text{II}} \right)_{G_{\text{бал}} = 0},$$

де $\left(l_{\phi}^{\text{II}} \right)_{G_{\text{бал}} = 0}$ – довжина газового факелу без баластування, $\left(l_{\phi}^{\text{II}} \right)_{G_{\text{бал}} > 0}$ – довжина газового факелу при баластуванні, від відносних витрат домішок – повітря і CO_2 при різних значеннях витрати газу на стабілізатор.

Як видно з рис. 12, при баластуванні газу повітрям або CO_2 довжина факелу поступово зменшується до виникнення зриву.

Вимірювання вмісту продуктів реакції в кінці зони горіння по осі факелу, виконані за допомогою газоаналізатора Testo 330 (Німеччина) (рис. 13), показали, що із збільшенням витрати газу, що подається в обтічний повітряний потік (II схема) концентрація оксиду вуглецю (а) і оксиду азоту (б) збільшуються.

В зв'язку з тим, що подача баластних домішок до основного газу пов'язана із зниженням максимальної температури газів, це приводить до зменшення виходу оксидів азоту (рис. 14).

Вихід оксидів вуглецю залежить від кількості домішки. На першому етапі відбувається зменшення вмісту оксиду вуглецю при подачі обох видів домішок. Потім в зв'язку із зниженням максимальної температури газів у факелі відбувається збільшення концентрації продуктів недопалу (рис. 15).

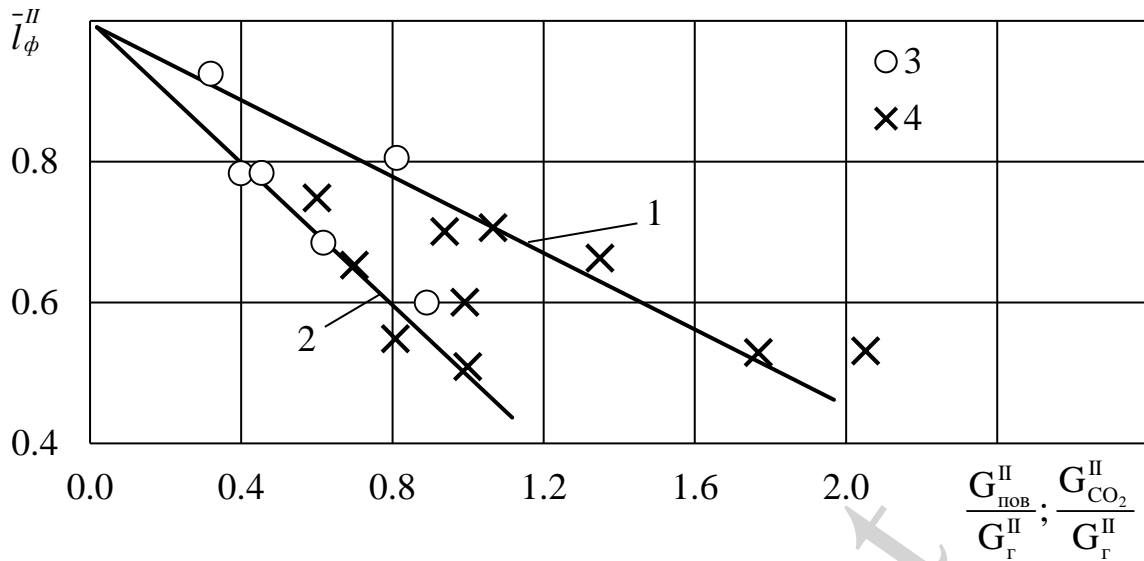


Рис. 12. Залежність відносної довжини факелу за стабілізатором при баластуванні палива повітрям і двоокисом вуглецю при різних витратах домішок: 1 – $G_r=(1,1\div 1,4)$ г/с; 2 – $G_r=(0,56-0,77)$ г/с; 3 – баластування повітрям; 4 – баластування CO_2

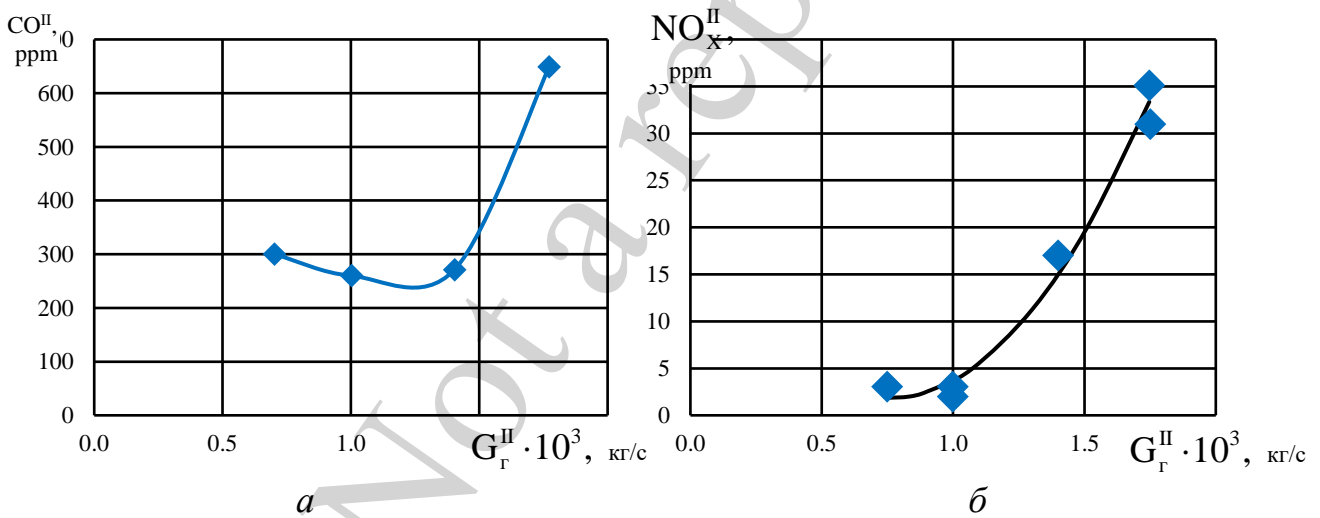


Рис. 13. Вихід полюантів при роботі пальника з подачею палива в обтічний повітряний потік (II схема). Стабілізатор 15,5-0,155-16xØ3-85-II; $W_k=6,8$ м/с; а – вихід диоксиду вуглецю; б – вихід оксидів азоту

Таким чином, в результаті випробувань стабілізатора з подачею палива за II схемою – в обтічний повітряний потік, встановлена залежність бідного зриву факелу від конструктивних і режимних параметрів, що дозволяє впливати на характеристики стійкості факелу. При подачі баласту у вигляді повітря і диоксиду вуглецю відбувається зменшення максимальної температури факелу, скорочення його довжини і наступне згасання полум'я. Згасання факелу відбувається внаслідок того, що при баластуванні палива і зменшенні температури горіння також зменшується теплова потужність зони рециркуляції за стабілізатором.

ром. Коли виділення тепла стає менше відведення тепла в оточуюче середовище, відбувається зрив факелу.

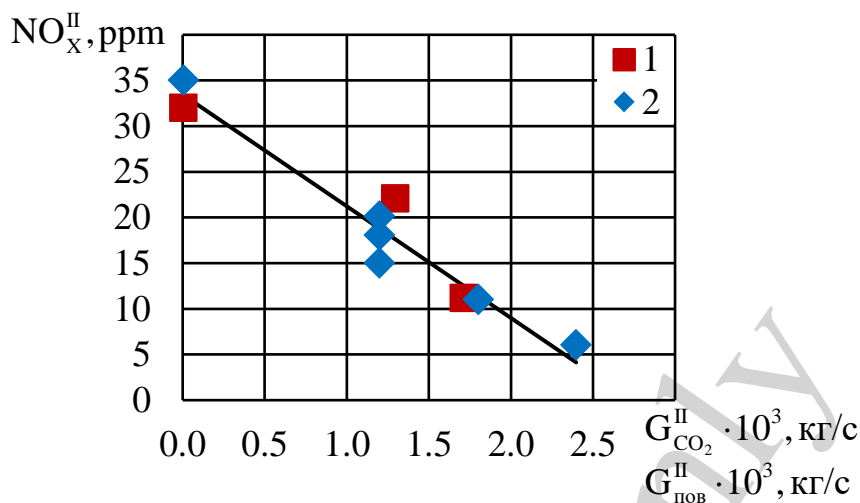


Рис. 14. Залежність виходу оксидів азоту від витрати баласту при попередньому перемішуванні з основним газом при II схемі газороздачі: Стабілізатор 15,5-0,155-16xØ3,0-85-II; $W_k=6,8$ м/с; $G_r^{II} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 1 – диоксид вуглецю; 2 – повітря

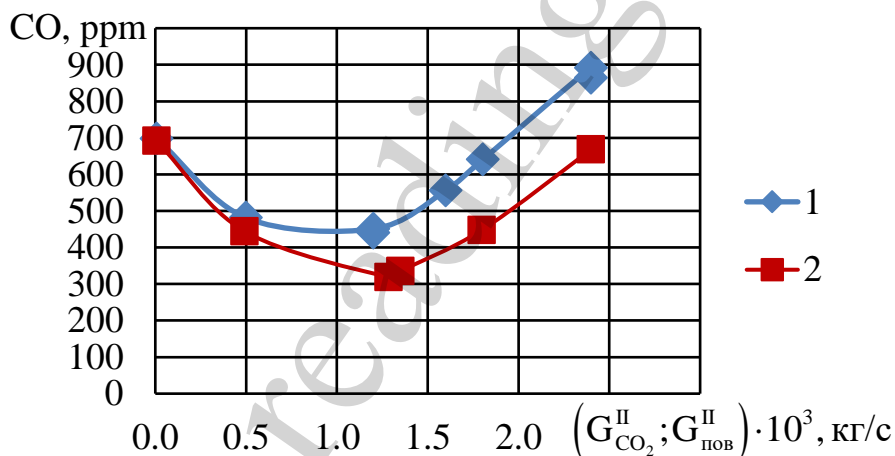


Рис. 15. Залежність виходу оксиду вуглецю від витрати баласту при попередньому перемішуванні з основним газом при II схемі газороздачі: Стабілізатор 15,5-0,155-16xØ3,0-85-II; $W_k=6,8$ м/с; $G_r^{II} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 1 – диоксид вуглецю; 2 – повітря

5. 2. Характеристики горіння при подачі газу за I схемою – в зону рециркуляції за стабілізатором

Випробування з подачею високо реакційного палива в зону рециркуляції струменями з отворів в торцевій стінці стабілізатора (рис. 2, отвори 4) виконувались з використанням таких стабілізаторних систем: $B_{ст}=15,5 \div 30$ мм, $K_f=0,155 \div 0,45$, $d_f=1,5 \div 3,0$ мм.

Механізм сумішоутворення і горіння палива за стабілізатором при подачі в зону рециркуляції і вплив режимних і конструктивних факторів розглянуто в роботах [18, 25–27]. З урахуванням основних положень цих робіт і відповідних

уточнень в процесі проведення досліджень отримані дослідні дані були узагальнені наступною залежністю:

$$\alpha_{\max}^I = \frac{K_{\max}^I \cdot B_{\text{ст}}^{0,5} \cdot d_{\text{г}}^{0,35} \cdot \left(\frac{F_{\text{г}}}{F_{\text{ст}}}\right)^{0,2}}{W_{\text{к}} \cdot K_f (1 + K_f)}, \quad (5)$$

де $K_{\max}^I = 4,3$ – при турбулентності повітряного потоку $\varepsilon \approx 1,5\%$.

На рис. 16 для одного з варіантів стабілізаторів 15,5-0,155-8Ø3-I наведені дані щодо бідного зриву факелу.

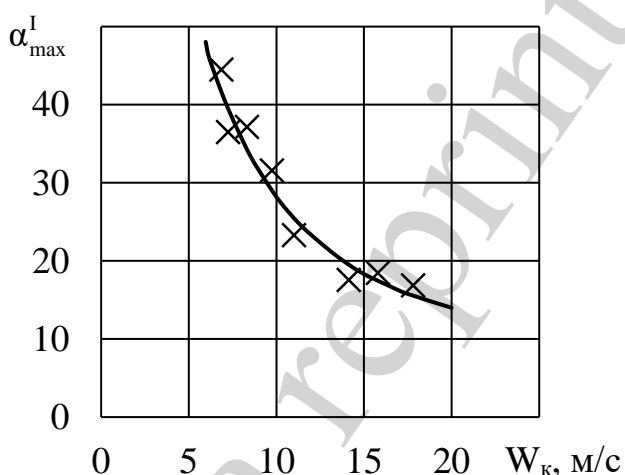


Рис. 16. Характеристика бідного зриву при подачі газу в зону рециркуляції за стабілізатором 15,5-0,155-8Ø3-I

При подачі газу в зону рециркуляції ступінь дифузійності процесу горіння вище, ніж при подачі зануренням в обтічний потік, і сталість факелу відповідно вище (рис. 6).

На рис. 17 показане поле температур вздовж осі факелу при обтіканні стабілізатора повітряним потоком. Із збільшенням витрати газу максимум температури підвищується і зміщується вздовж факелу відповідно збільшенню розмірів факелу.

Як видно з рис. 17, при підвищенні витрати газу за I схемою можна забезпечити в безпосередній близькості від стабілізатора температуру газів в зоні рециркуляції на рівні $(1000 \div 1100)^\circ\text{C}$, що може бути цілком достатнім для надійного запалювання забаластованого палива, яке подається за II схемою, навіть у випадку виходу паливної суміші за концентраційні межі горіння.

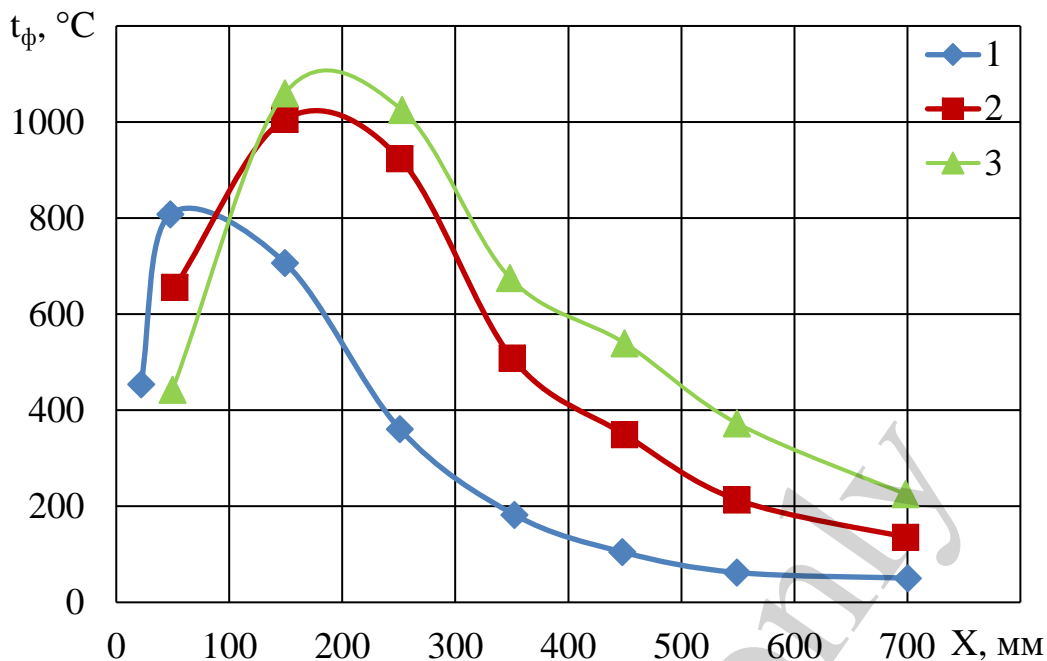


Рис. 17. Зміна температури газів вздовж осі факелу при подачі пропан-бутану в зону рециркуляції – I схема: Стабілізатор 15,5-0,155-8Ø3-I; $W_k=6,8$ м/с; 1 – $G_r^I = 0,1 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 2 – $G_r^I = 0,24 \cdot 10^{-3}$ кг/с; 3 – $G_r^I = 0,35 \cdot 10^{-3}$ кг/с

5.3. Робота пальника при комбінованій системі сумішоутворення – подачі газу за I і II схемами

При проведенні досліджень з подачею газу за II схемою було встановлено, що при зменшенні витрати газу і, відповідно, збільшенні загального коефіцієнту надлишку повітря в топковому просторі, спостерігалось зниження повноти згоряння (рис. 18).

В таких випадках можливе підключення подачі газу за I схемою, тобто, організація чергового факелу високо реакційного палива. В результаті продукти горіння основного палива проходили через систему високотемпературних струменів чергового факелу і, як встановлено, загальна повнота згоряння підвищувалась.

На підставі розгляду наведених на рис. 18 даних можна зробити висновок, що при комбінованій газороздачі загальна довжина зони горіння визначається сумарною витратою палива і закономірностями горіння палива за I схемою.

При роботі на забаластованому паливі (суміш пропан-бутану з діоксидом вуглецю або повітрям) і подачі палива за II схемою також виявилась можливість значного підвищення сталості факелу шляхом подачі високо реакційного палива (пропан-бутан) за I схемою. Витрата газу за I схемою відповідає значенню коефіцієнта надлишку повітря на межі бідного зриву $\alpha_0^I \approx 10$. Сталість горіння комбінованого факелу за стабілізатором забезпечувалась при максимально досягнутому за умов роботи стенду вмісту повітря в газі $G_{пов}^{II}/G_r^{II} \approx 10$.

На рис. 19 показані фотографії факелу, а в табл. 1 наведено режими випробувань стабілізатора при комбінованій подачі газу і повітря. Означення стабілізаторів: за I схемою – 15,5-0,155-8Ø3-I, за II схемою 15,5-0,155-16Ø3-85-II.

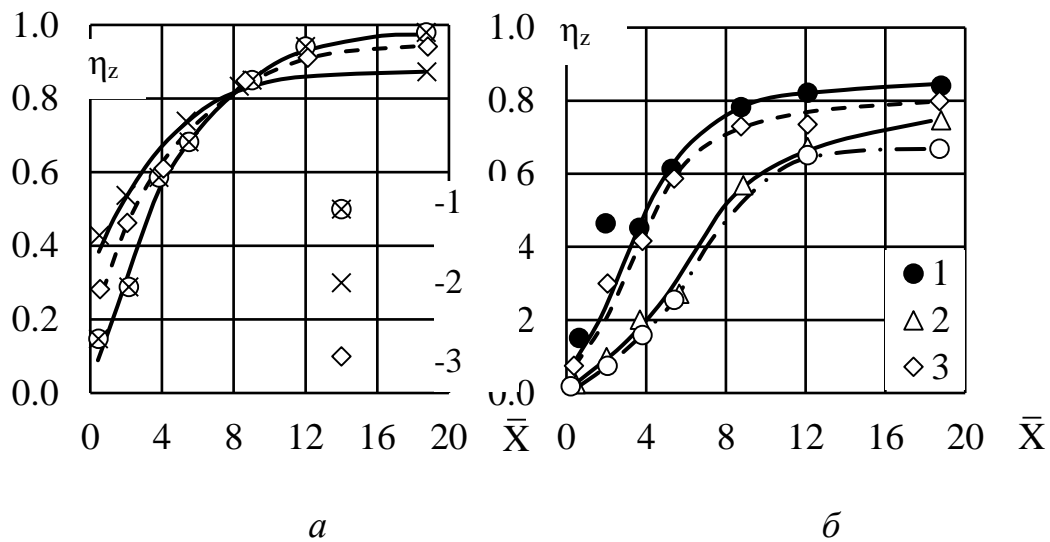


Рис. 18. Характеристики горіння палива в пальникових пристроях стабілізаторного типу при комбінованій подачі газу в зону рециркуляції (I схема) і в обтічний потік повітря (II схема): *a* – 1 – стабілізатор 30-0,45-16Ø3-I, $\alpha^I=3,94$; 2 – 30-0,45-10Ø3-80-II, $\alpha^{II}=4,86$; 3 – комбінована робота: $\alpha^I=21,8$, $\alpha^{II}=5,26$, $\alpha^{\Sigma}=4,25$; *б* – 1- 30-0,45-10Ø3-80-II, $\alpha^{II}=1,47$; 2 – 30-0,45-16Ø3-I, $\alpha^I=1,53$; 3 – комбінована робота: $\alpha^I=8,35$, $\alpha^{II}=2,0$, $\alpha^{\Sigma}=1,61$; 4 – $\alpha^I=4,6$, $\alpha^{II}=2,0$, $\alpha^{\Sigma}=1,4$

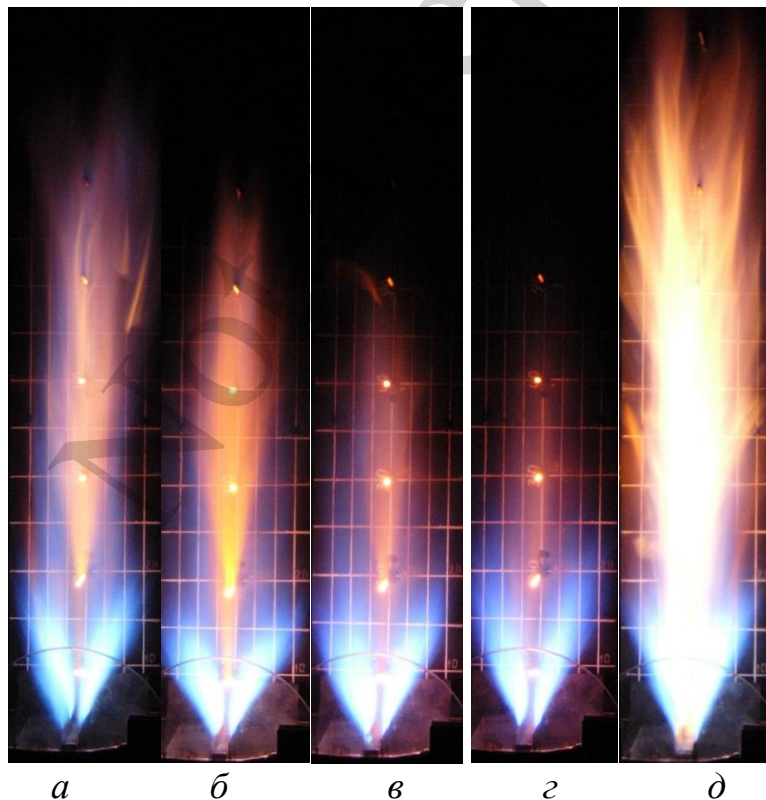


Рис. 19. Фотографії факелу за стабілізатором при комбінованій роботі; $W_k=6,8$ м/с; *a* – подача основного газу за II схемою, *б–д* – підмішування повітря до основного газу; *д* – додатковій подачі стабілізуючого газу за I схемою – в зону рециркуляції

Таблиця 1

Режими випробувань стабілізатора при комбінованій подачі газу за I схемою та II схемою з попереднім змішуванням з повітрям

Режим	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>
$G_{\Gamma}^{\text{II}} \cdot 10^{-3}$, кг/с	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
$G_{\text{пов}}^{\text{II}} \cdot 10^{-3}$, кг/с	–	0,45	1,1	1,35	1,35
$G_{\Gamma}^{\text{I}} \cdot 10^{-3}$ кг/с	–	–	–	–	0,26

Дослідження показали, що сталість горіння забаластованого палива, яке подається за II схемою, визначається сталістю горіння стабілізуючого факелу I схеми. Це дозволяє значно розширити межі сталої роботи всього пальникового пристрою.

На підставі результатів досліджень можна зробити висновок, що для забезпечення надійного горіння забаластованого (альтернативного) палива практично з необмеженою зміною концентрації домішок необхідно подавати це паливо за II схемою. Черговий факел утворюється шляхом подачі високо реакційного палива за I схемою з витратою, яка відповідає вимогам сталої роботи цього дифузійного факелу.

Були проведені випробування з визначення впливу на процес горіння баластних домішок різної концентрації і різного якісного складу – від повітря, яке приймає участь у горінні палива, до абсолютно інертної добавки у вигляді двоокису вуглецю. З результатів досліджень можна зробити висновок, що склад баластних домішок практично не впливає на стійкість горіння, якщо організувати подачу суміші через систему високотемпературних дифузійних факелів.

У підсумку можна сформулювати загальний підхід до створення пальникового пристрою, який призначений для спалювання газових палив змінного і перемінного в часі складу палива.

Робочий процес може бути організований таким чином.

В залежності від вимог до характеристик пальникового пристрою, які обумовлені вимогами паливокористуючого обладнання, подача палива може бути організована за I схемою – подачею газу в зону рециркуляції, або за II схемою – зануренням газових струменів в обтічний повітряний потік. Відповідно до прийнятої схеми розраховується система газороздачі. При цьому слід брати до уваги, що при подачі газу за I схемою забезпечується ефективно горіння палива в широкому діапазоні режимів щодо зміни коефіцієнту надлишку повітря, але при цьому має місце збільшена довжина зони горіння.

При зменшенні коефіцієнту надлишку повітря $\alpha \rightarrow 1,0$ при такій схемі можливий «багатий» зрив факелу. При подачі газу за II схемою забезпечується ефективно горіння при $\alpha \rightarrow 1,0$ і більш короткий факел. В той же час при роботі на режимах часткового навантаження $\alpha \gg 1,0$ при такій схемі можлива поява недопалу.

Якщо під час роботи вміст баластних домішок у альтернативному паливі збільшується і теплова потужність пальника зменшується, підвищення потужності пальника в певних межах можна забезпечити збільшенням витрати палива.

У випадку розробки пальника із широкою зміною концентрації баластних домішок в паливі за основу слід приймати варіант з подачею альтернативного палива в обтічний повітряний потік (II схема), а стабілізуючого палива – в зону рециркуляції (I схема). При зменшенні теплової потужності пальника і неможливості компенсації потужності за рахунок збільшення витрати основного альтернативного палива, а також виходу суміші (паливо+домішок) за концентраційні межі запалювання підключається подача високо реакційного палива за I схемою. При цьому сталість горіння в пальнику визначається характеристикою першої схеми. Необхідно брати до уваги, що загальна довжина факелу визначається характеристиками горіння при I схемі газороздачі.

5. 4. Характеристики робочого процесу при подачі чергового газу на рівні зривних кромek стабілізатора

При роботі пальника з комбінованою подачею газу і збільшенні витрати високо реакційного палива за I схемою може бути порушена структура зони рециркуляції і вихід основної маси палива за межі зони рециркуляції. Це призведе до збільшення довжини факелу, виникнення недопалу палива при недостатній довжині топкового простору, а також до небезпеки появи «багатого» зриву факелу.

Для забезпечення можливості роботи стабілізуючого факелу при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha \rightarrow 0$ необхідно усунути вплив газових струменів на структуру зони рециркуляції.

В такому випадку може бути використана конструкція стабілізатора, що показаний на рис. 20. Забаластоване паливо подається в обтічний потік повітря з отворів 5, які розміщені на відстані L_1^{II} від зривної кромки стабілізатора. Стабілізуюче високо реакційне паливо подається у обтічний повітряний потік із системи отворів 4, що розміщені ближче до зривної кромки стабілізатора на відстані $L_1^{\text{I}} < L_1^{\text{II}}$.

При подачі високо реакційного палива зануренням в обтічний повітряний потік відбувається часткове перемішування газу з повітрям, що призводить, як видно з рис. 6, до зменшення довжини факелу у порівнянні з подачею газу в зону рециркуляції за I схемою. В той же час, як видно з даних рис. 7, 16, треба враховувати, що при подачі зануренням звужуються межі сталої роботи щодо коефіцієнту надлишку повітря на бідному зриві факелу.

Фотографії факелу при подачі газу на рівні зривних кромek стабілізатора і температура продуктів горіння при різних витратах газу приведені на рис. 21.

Як видно з рис. 21, д, максимальна температура факелу перевищує $1200\text{ }^\circ\text{C}$, що достатньо для надійного забезпечення забаластованого палива. З підвищенням витрати газу довжина факелу відповідно підвищується, що вказує на дифузійність процесу горіння, в той же час максимальна температура газів також збільшується. Звертає на себе увагу, що в даному випадку розширення факелу починається вже на зрізі стабілізатора.

При аналізі даних поля температур також можна відмітити, що процес горіння основної маси палива відбувається на початковій ділянці факелу.

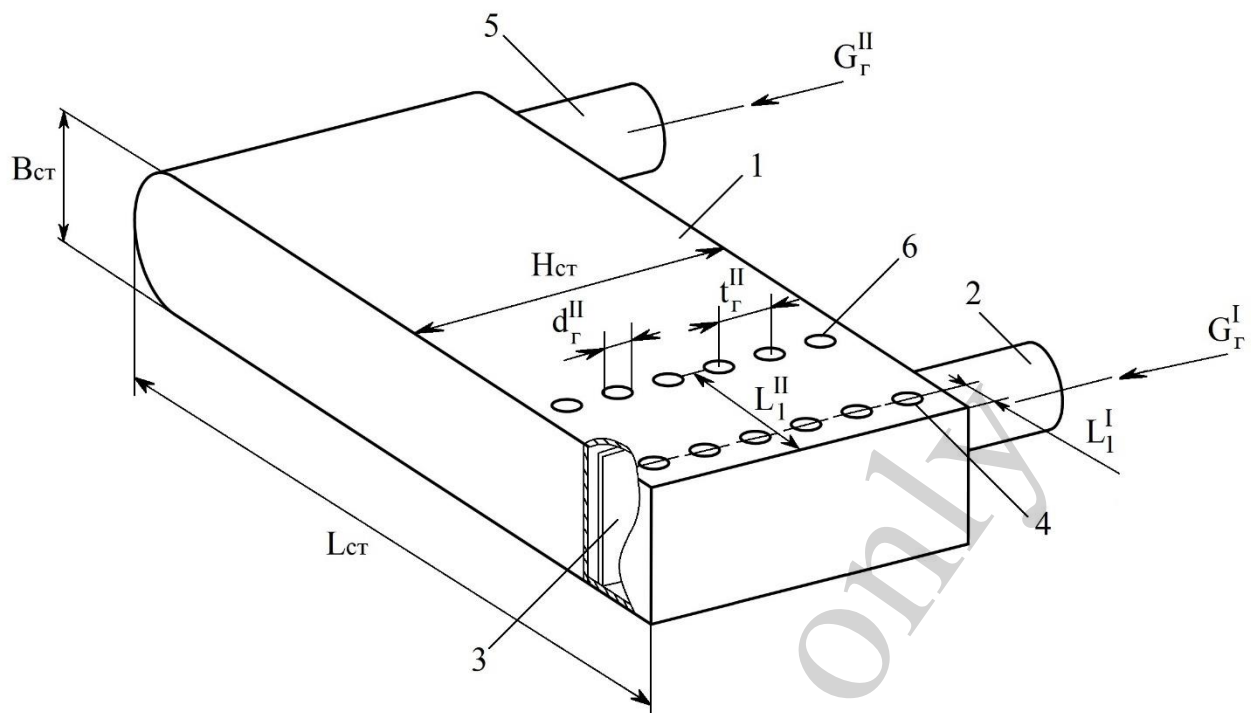


Рис. 20. Комбінований пальник з подачею високо реакційного палива за I схемою на рівні зривних кромек стабілізатора 15,5-0,155-14Ø3-15-I ($L_1^I = 15$ мм): 1 – корпус; 2–4 – патрубок, вирівнювальна камера і отвори подачі газу у кромек стабілізатора; 5, 6 – патрубок і отвори подачі забаластованого палива (II схема)

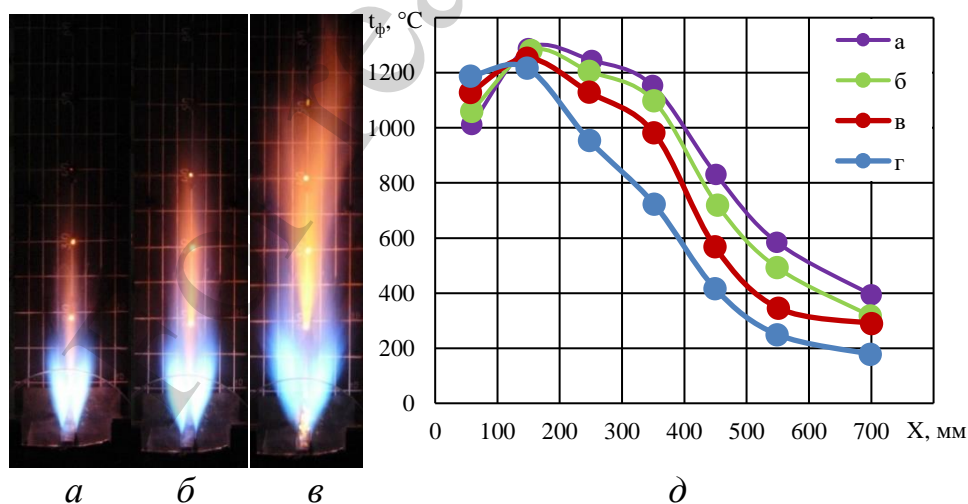


Рис. 21. Характеристики горіння палива (пропан – бутан) за стабілізатором з подачею газу в обтічний потік повітря за I схемою з отворів у кромек стабілізатора – 15,5-0,155-14Ø3-15-I; $W_k=6,6$ м/с; а–г – фотографії факелу; д – температура газів вздовж осі сліду за стабілізатором; режими: а – $G_r^I = 0,44 \cdot 10^{-3}$ кг/с; б – $G_r^I = 0,62 \cdot 10^{-3}$ кг/с; в – $G_r^I = 0,90 \cdot 10^{-3}$ кг/с; г – $G_r^I = 1,1 \cdot 10^{-3}$ кг/с

В якості прикладу роботи паливкового пристрою з комбінованою газороздачею на рис. 22 показано розвиток горіння палива за стабілізатором з подачею забаластованого газу за II схемою (15,5-0,155-16Ø3-85-II), а чергового газу – за I схемою з отворів, що розміщені ближче до кромки стабілізатора (15,5-0,155-14Ø3-15-I). В табл. 2 приведені режими випробувань.

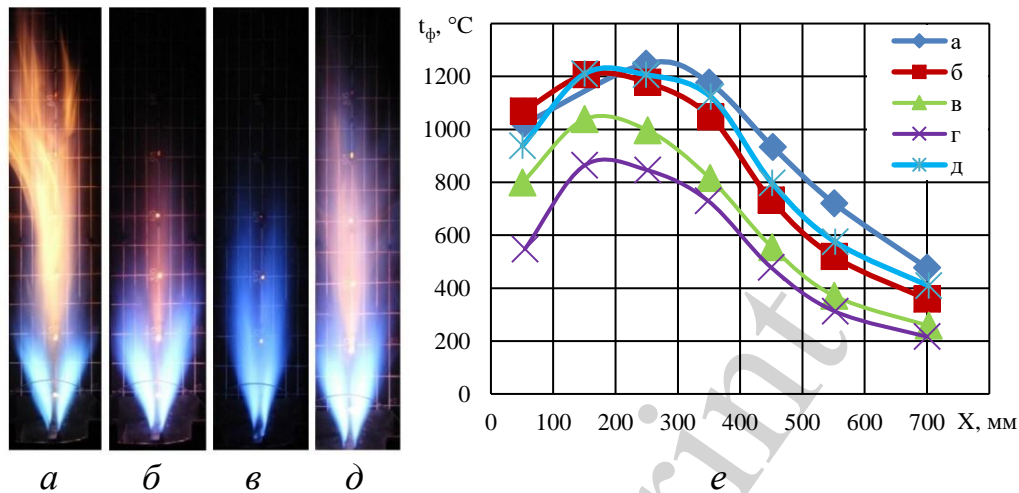


Рис. 22. Розвиток горіння палива за стабілізатором при комбінованій роботі; $W_k=6,8 \text{ м/с}$; $a-d$ – фотографії факелу при комбінованій роботі з подачею основного газу і двоокису вуглецю за II схемою (15,5-0,155-16Ø3-85-II) і додатковій подачі стабілізуючого газу за I схемою з отворів ближче до кромки стабілізатора (15,5-0,155-14Ø3-15-I); e – температура продуктів горіння при різних режимах роботи

Таблиця 2

Режими випробувань стабілізатора при комбінованій подачі газу за I схемою та II схемою з попереднім змішуванням з двоокисом вуглецю

Режим	a	b	c	d
$G_r^{\text{II}} \cdot 10^{-3}, \text{ кг/с}$	1,4	1,4	1,4	1,4
$G_{\text{CO}_2}^{\text{II}} \cdot 10^{-3}, \text{ кг/с}$	–	1,9	2,5	2,85
$G_r^{\text{I}} \cdot 10^{-3}, \text{ кг/с}$	–	–	–	0,31

При подачі на попереднє сумішоутворення двоокису вуглецю з газом довжина факелу зменшується, як видно з режимів a – c . При підключенні подачі додаткового чергового газу з отворів, що розміщені ближче до кромки стабілізатора довжина факелу збільшується і температура газів підвищується (режим d).

При розміщенні отворів подачі палив слід враховувати, що отвори подачі додаткового чергового палива повинні бути зміщені на півкроку по відношенню до отворів подачі основного палива. За такою схемою струмені основного палива з домішками проходять в зону горіння між високотемпературними струменями додаткового палива.

За допомогою програмного комплексу ANSYS Fluent (США) [31] виконано аналіз струменевої течії палива (пропан-бутан) при виході з газових отворів, що

розміщені на бокових стінках стабілізатора. На рис. 23 наведено розрахункові дані щодо картини концентрацій палива, яке виходить з двох систем газових отворів, що розміщені на відстані $L_1=85$ мм і $L=15$ мм від зривної кромки стабілізатора.

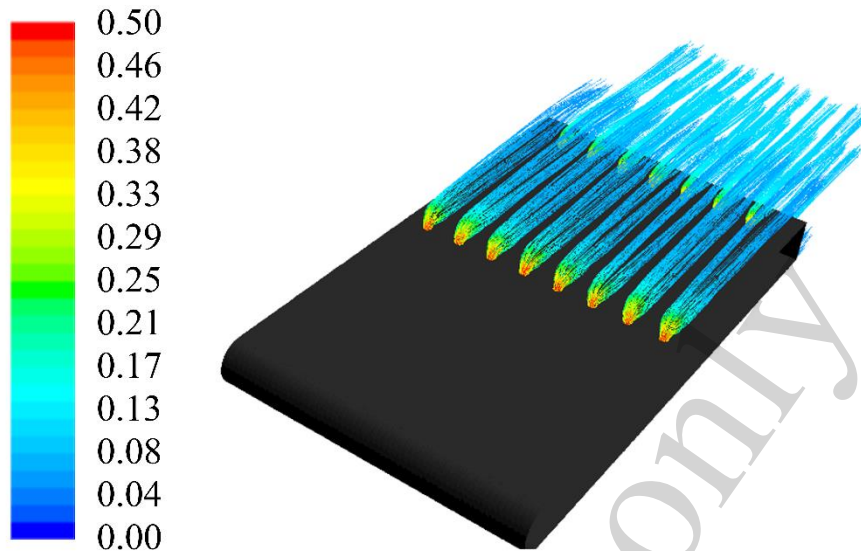


Рис. 23. Поля розвитку концентрацій газових струменів, що виходять з систем отворів для стабілізатора 15,5-0,155-16Ø3-85-II і 15,5-0,155-14Ø3-15-I, $W_{\text{пов}}=10$ м/с; $W_{\Gamma}=10$ м/с, $t_{\Gamma}/d_{\Gamma}=3,5$

Як видно із зміни кольору ліній, які відповідають концентрації газу, максимальна ступінь перемішування спостерігається в місцях виходу струменів, після того, як струмінь палива рухається супутно повітряному потоку і різниця в швидкості реагентів зменшується, інтенсивність масообміну зменшується.

На рис. 24 наведено вид на поле концентрацій палива з торця стабілізатора (на його зрізі).

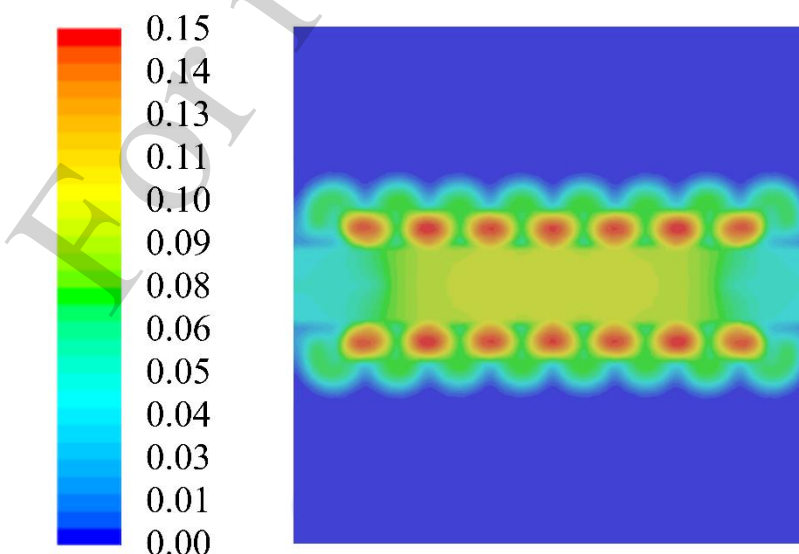


Рис. 24. Вид на поле концентрацій палива (пропан-бутан) назустріч потоку на рівні торцевого зрізу стабілізатора

З поля концентрацій видно, що для забезпечення ефективної роботи пального пристрою струмені додаткового палива повинні розташовуватися між струменями основного палива. Відстань між рядами подачі забаластованого і високо реакційного палив необхідно вибрати за умови забезпечення якісного сумішоутворення обох палив з повітрям без злиття факелів.

6. Обговорення результатів досліджень випробувань стабілізаторного пального пристрою при спалюванні забаластованих газів

В результаті проведених досліджень показана можливість спалювання в стабілізаторних пального пристроях забаластованих газових палив змінного складу. Встановлені межі стабільного горіння палива по бідному зриву факелу в стабілізаторних пального пристроях при різних схемах подачі палива в залежності від режимних і конструктивних параметрів системи. При подачі палива за I схемою – рис. 16, (5). При подачі палива за II схемою – рис. 7, (1). Встановлені межі сталої роботи пального пристрою при зміні концентрації баластних домішок в паливі – рис. 8, (2)–(4). Показана можливість розширення меж стабільного горіння забаластованого палива шляхом одночасної подачі забаластованого і високо реакційного палив в зону горіння за комбінованими схемами – рис. 18, 19, 22.

Завдяки використанню комбінованих схем розширюються можливості використання різних видів палив, в тому числі забаластованих низько реакційних, в енергетиці і промисловості і, таким чином, сприяти заміні коштовного метану і поліпшити захист навколишнього середовища. На відміну від наведених в роботі схем і конструкцій пального пристроїв і камер згоряння [6, 8] стабілізаторні пального пристрої мають низку переваг. Серед них можна зазначити такі як модульність конструкції та можливість впливу на втрати тиску повітря в пального пристрою зміною коефіцієнту затінення решітки стабілізаторів. Регулювання показників сталості горіння можна здійснювати зміною конструктивних параметрів пального пристрою, наприклад, шириною стабілізатора, коефіцієнтом затінення, швидкістю повітря. Крім того, завдяки прийнятому принципу організації робочого процесу в стабілізаторних пального пристроях відсутня можливість проскоку полум'я в пального пристрою.

Обмеження, які притаманні даному дослідженню, полягають в тому, що дослідження були виконані при невеликих коефіцієнтах затінення стабілізаторної решітки $K_f < 0,5$, що обмежує на даний момент область використання результатів. Не досліджено вплив такого фактора, як турбулентність повітряного потоку. На даному етапі роботи не показано вплив на характеристики пального пристрою відносної відстані між газовими отворами при подачі обох палив, і високо і низько реакційного в обтічний повітряний потік.

Розвитком даного дослідження є проведення випробувань системи стабілізаторів у закритому стенді з вимірюванням всіх необхідних параметрів робочого тіла, а також широке використання методів комп'ютерного моделювання.

7. Висновки

1. Визначено і отримано узагальнюючі формули щодо впливу конструктивних і режимних факторів на характеристики сталості горіння факелу за стабі-

лізатором по бідному зриву при подачі високо реакційного палива (пропан-бутан) за двома схемами. За I дифузійною схемою паливо подавалось в зону рециркуляції за стабілізатором. За II схемою паливо струменями подавалось на попереднє перемішування в обтічний повітряний потік. Коефіцієнт надлишку повітря на режимі бідного зриву при подачі газу в зону рециркуляції більше, ніж при подачі в обтічний потік повітря. При необхідності підвищення сталості факелу в обох випадках необхідно збільшувати ширину стабілізатора і зменшувати швидкість повітря на вихідній кромці стабілізатора.

2. При подачі палива за II схемою і збільшенні вмісту баласту в паливі (повітря, двоокис вуглецю) відбувається поступове зменшення довжини факелу, зниження максимальної температури горіння. При критичному вмісті баласту в паливі в результаті зменшення тепловиділення в факелі відбувається зрив горіння. Отримана узагальнююча залежність сталості факелу від вмісту баласту. При відношенні витрати баласту до паливного газу в межах 2,0 вихід оксидів азоту зменшується в 6 разів.

3. Розроблено метод підвищення сталості горіння забаластованого палива при концентрації домішок від 0 % до 100 % (відсутність палива). Для цього прийнята комбінована подача палив – низько реакційного за II схемою, в обтічний повітряний потік, а високо реакційного палива – за I схемою, в зону рециркуляції за стабілізатором. При такій схемі струмені забаластованого палива проходять через високо температурні дифузійні факели і відбувається процес горіння обох палив незалежно від концентрації домішки з забаластованому паливі. Потужність пальника підтримується за рахунок збільшення витрати палива, яке подається на черговий факел. збереження теплової потужності пальника. Сталість і довжина загального факелу визначається характеристиками дифузійного факелу. У разі подачі всього газу за першою схемою при збільшенні витрати палива відбувається вихід основної маси газу за межі зони рециркуляції і можливий відрив факелу від стабілізатора – «багатий» зрив. Тому при подачі палива за I схемою можна забезпечити сталу роботу пальника при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha > 1,0$.

4. Для роботи пальникового пристрою з коефіцієнтом надлишку повітря більше одиниці або наближається до одиниці забаластоване паливо рекомендується подавати зануренням в обтічний потік повітря з отворів на бокових стінках стабілізатора. Високо реакційне паливо також подається з отворів, що розміщені на бокових стінках стабілізатора вниз по потоку повітря за отворами подачі низько реакційного палива. Розрахунки систем газороздачі виконуються за відповідними методиками. При цьому струмені забаластованого палива проходять між струменями високо реакційного палива.

Література

1. Климчук, О. В., Грох, Н. В. (2012). Виробництво біогазу: досвід зарубіжних країн та перспективи розвитку в Україні. Зб. Наукових праць ВНАУ, 2 (64), 50–54. Available at: <http://econjournal.vsau.org/files/pdf/869.pdf>
2. Kholod, N., Evans, M., Pilcher, R. C., Roshchanka, V., Ruiz, F., Coté, M., Collings, R. (2020). Global methane emissions from coal mining to continue

growing even with declining coal production. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120489. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120489>

3. Владимирова, Я. А., Зыбин, Л. В. (2018). Методические вопросы энергетического использования твердых коммунальных отходов и продуктов их газификации. *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*, 24 (1), 5–16. doi: <http://doi.org/10.18721/JEST.240101>

4. Liu, C., Yan, B., Chen, G., Bai, X. S. (2010). Structures and burning velocity of biomass derived gas flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (2), 542–555. doi: <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.020>

5. Сигал, И. Я., Марасин, А. В., Смихула, А. В., Сигал, А. И., Колчев, В. А. (2013). Экспериментальное исследование горения биогаза и его использование в промышленных котлах. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 17 (139), 84–89. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-goreniya-biogaza-i-ego-ispolzovanie-v-promyshlennyh-kotlah/viewer>

6. Сигал, И. Я., Смихула, А. В., Марасин, А. В., Куц, В. П., Домбровская, Э. П., Колчев, В. А., Кернажицкая, Е. С. (2013). Экспериментальное исследование биогаза как топлива для котлов. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*, 5, 26–32. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/127237?show=full>

7. Anggono, W., Wardana, I. N. G., Lawes, M., Hughes, K. J., Wahyudi, S., Hamidi, N., Hayakawa, A. (2013). Biogas Laminar Burning Velocity and Flammability Characteristics in Spark Ignited Premix Combustion. *Journal of Physics: Conference Series*, 423, 012015. doi: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/423/1/012015>

8. Hosseini, S. E., Bagheri, G., Khaleghi, M., Abdul Wahid, M. (2015). Combustion of Biogas Released from Palm Oil Mill Effluent and the Effects of Hydrogen Enrichment on the Characteristics of the Biogas Flame. *Journal of Combustion*, 2015, 1–12. doi: <http://doi.org/10.1155/2015/612341>

9. Сигал, И. Я., Марасин, Ф. В., Смихула, А. В. (2014). Газогорелочные устройства для сжигания биогаза в котлах. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*, 3, 68–72. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/127295>

10. Комина, Г. П. (2018). Экологические характеристики сжигания газов в замкнутом кольцевом пламени. *Вода и экология: проблемы и решения*, 1 (73), 39–47.

11. Колієнко, В. А., Галінська, Т. А., Шеліманова, О. В. (2015). Комбіноване спалювання суміші природного та генераторного газу. *Науковий вісник НУБіП України*, 5, 136–138. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2015_224_26

12. Славинская, Н. А. (2007). Проект Европейского союза «Высокоэффективная газовая турбина с применением синтетического газа». *Газотурбинные технологии*, 24–27.

13. Лебедев, А. С., Симин, Н. О., Тарасов, Д. С., Юшкевич, А. В. (2010). Работа камер сгорания ГТУ на продуктах газификации твердого топлива. *Теплоэнергетика*, 6, 73–79.

14. Сербин, С. И., Гончарова, Н. А., Вилкул, В. В. (2015). Исследование особенностей рабочего процесса камеры сгорания ГТД мощностью 2,5 МВт, работающей на синтез-газе. *Вісник НТУ «ХПИ»*, 16 (1125), 14–18. Available at: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/17564>
15. Escudero, M., Jiménez, Á., González, C., Nieto, R., López, I. (2012). Analysis of the behaviour of biofuel-fired gas turbine power plants. *Thermal Science*, 16 (3), 849–864. doi: <http://doi.org/10.2298/tsci120216131e>
16. Gómez, M., Amell, A., Zapata, L. (2015). Spark ignition engine performance and emissions in a high compression engine using biogas and methane mixtures without knock occurrence. *Thermal Science*, 19 (6), 1919–1930. doi: <http://doi.org/10.2298/tsci140829119g>
17. Rowhani, A., Tabejamaat, S. (2015). Experimental study of the effects of swirl and air dilution on biogas non-premixed flame stability. *Thermal Science*, 19 (6), 2161–2169. doi: <http://doi.org/10.2298/tsci130112157r>
18. Бутовский, Л. С., Грановская, Е. А., Фиалко, Н. М. (2010). Устойчивость факела за плоским стабилизатором при подаче газа внедрением в воздушный поток. *Технологические системы*, 3 (52), 72–76. Available at: <http://technological-systems.net/index.php/Home/article/view/455>
19. Бутовский, Л. С., Грановская, Е. А., Фиалко, Н. М., Строкин, В. Н., Швецова, Л. А. (2011). Повышение устойчивости факела при подаче газа в зону рециркуляции за стабилизатором. *Технологические системы*, 3 (56), 74–81.
20. Jet-derived low-NO_x combustors to be offered for Land-based machines (1990). *Gas Turbine World*, 20 (6), 30.
21. Keppel, W. (1994). 20 Jahre ABB – gasturbinen typ 13: von 55 bis 165 MWt – spiegelbild einer evolution. *VGB Kraftwerkstechnik*, 74, Heft 4, 361–372.
22. Funke, H. H.-W., Keinz, J., Kusterer, K., Ayed, A. H., Kazari, M., Kitajima, J. et. al. (2017). Development and Testing of a Low NO_x Micromix Combustion Chamber for Industrial Gas Turbines. *International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems*, 9 (1), 27–36. doi: http://doi.org/10.38036/jgpp.9.1_27
23. Sudarev, A. V., Butovsky, L. S., Granovskya, E. A. (1994). Process studies applied to ceramic gas turbine engine low-emission double-zone micro-diffusion combustion chamber. *ASME Paper*, 94-GT-445. Hagus, 6. doi: <http://doi.org/10.1115/94-gt-445>
24. Gadde, S., Wu, J., Gulati, A., McQuiggan, G., Koestlin, B., Prade, B. (2006). Syngas capable combustion systems development for advanced Gas turbines. *ASME TURBO EXPO 2006*. Paper GT 2006-90970. Barcelona. doi: <http://doi.org/10.1115/gt2006-90970>
25. Lefebvre, A. H., Ibrahim, A. R. A. F., Benson, N. C. (1966). Factors affecting fresh mixture entrainment in bluff-body stabilized flames. *Combustion and Flame*, 10 (3), 231–239. doi: [http://doi.org/10.1016/0010-2180\(66\)90079-4](http://doi.org/10.1016/0010-2180(66)90079-4)
26. Chigier, N. A., Mech, A. M. I., Gilbert, J. L. (1968). Recirculation Eddies in the Wake of Flameholders. *Journal of the Institute of Fuel*, 3, 105–112.

27. Winterfeld, G. (1965). On processes of turbulent exchange behind flame holders. Symposium (International) on Combustion, 10 (1), 1265–1275. doi: [http://doi.org/10.1016/s0082-0784\(65\)80261-2](http://doi.org/10.1016/s0082-0784(65)80261-2)

28. Abdulin, M. Z., Siryi, A., Tkachenko, O. M., Kunyk, A. A. (2020). Boilers modernization due to energy-ecological improvement technology of burning. Bulgarian Chemical Communications, 52, 14–19. Available at: http://www.bcc.bas.bg/bcc_volumes/Volume_52_Special_F_2020/BCC-52-F-2020-14-19-Abdulin-2.pdf

29. Раушенбах, Б. В., Белый, С. А., Беспалов, И. В. и др. (1964). Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. Москва: Машиностроение, 526.

30. Bauer, A. B. (1967). Some experiments in the near wake of cones. AIAA Journal, 5 (7), 1356–1358. doi: <http://doi.org/10.2514/3.4202>

31. Ansys Fluent 14.0 Theory Guide from <https://www.scribd.com/doc/140163341/Ansys-Fluent-14-0-Theory-Guide>

Not a reprint