
Визначення особливостей спалювання газових палив змінного складу в нішевому стабілізаторному пальнику

Ольга Черноусенко

Кафедра теплової та альтернативної енергетики, Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ORCID 0000-0002-1427-8068

Леонід Бутовський

Кафедра теплової та альтернативної енергетики, Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ORCID 0000-0001-8947-9887

Ольга Власенко

Кафедра теплової та альтернативної енергетики, Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ORCID 0000-0002-8975-0873

Інна Беднарська

Кафедра теплової та альтернативної енергетики, Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

ORCID 0000-0002-5558-4467

Анотація: Розглянуті результати експериментальних досліджень щодо спалювання забаластованих газів, які являють собою суміш високореакційного газу пропан-бутану з повітрям і двоокисом вуглецю. Дослідження виконувались з використанням плоского стабілізатора шириною 28 мм, який з обох боків обтікався потоком повітря. З обох сторін стабілізатора послідовно за ходом повітря було виконано по два нішевих поглиблення довжиною 30 мм і глибиною 7 мм. Забаластоване паливо змінного складу подавалось перпендикулярними струменями в повітряний потік із отворів, що розміщувались на стінках першого ряду нішевих поглиблень. В процесі експериментів змінювалась концентрація домішок у високореакційному паливі від 0 % (пропан-бутан) до 100 % (відсутність палива). Дослідження показали, що при збільшенні кількості домішок в паливі поступово знижується довжина факелу, а також зменшуються температура продуктів згоряння і вміст оксидів азоту. При досягненні певної концентрації домішки в паливі відбувається зрив горіння. Встановлена залежність сталості факелу від відносного вмісту домішок в паливі. Для стабілізації горіння із стінок другого ряду нішевих поглиблень за ходом повітря із окремого колектора в повітряний потік подавалось чисте високореакційне паливо (пропан-бутан). Отвори подачі стабілізуючого високореакційного палива зміщені на пів-кроку відносно отворів подачі забаластованого палива. В результаті цього струмені низькореакційного палива змінного складу проходять між високотемпературними факелами високореакційного палива, внаслідок чого відбувається підпалювання і стабілізація горіння низькореакційного палива незалежно від складу останнього. Прийнята комбінована схема подачі газу забезпечує можливість змінювати витрату палива в нішах і таким чином регулювати потужність пальника.

Ключові слова: стабілізаторний пальниковий пристрій, нішеве поглиблення, сталість горіння, довжина факелу, температура факелу, вихід оксидів азоту.

1. Вступ

Свого часу завдяки своїм позитивним перевагам над іншими видами палив, а саме, легкість видобування і транспортування, відсутність твердих та рідких відходів, відсутність шкідливих домішок тощо, природний газ зайняв важливе місце в різних галузях господарства – енергетиці, промисловості, комунальному господарстві, хімічній та металургійній промисловості, в побуті. Газова складова має суттєве значення у відносинах між країнами. Країни, які видобувають газ, в значній мірі впливають на світову економіку і міжнародний порядок.

Наявність або відсутність такого викопного палива, як природний газ, в значній мірі впливає на рівень розвитку народного господарства і добробут населення. У всіх економічно розвинених країнах, у тому числі, в Україні доля природного газу в енергетичному балансі має суттєве значення. З цієї точки зору Україна не являється виключенням і для неї, як і для інших держав, наприклад, Європейських країн, США і інших країн світу задача економічного і ефективного використання імпортованого коштовного палива має першочергове значення.

В той же час аналіз забезпечення народного господарства України паливними ресурсами показує, що в Україні існує достатньо широкий спектр так званих альтернативних, або на відміну від природного газу, нетрадиційних палив, до яких можна віднести гази природного або штучного походження, наприклад, доменні та колошникові гази, шахтний метан, гази хімічного походження, синтетичні гази, різні види біопалив у вигляді горючих газів тощо. За своєю сумарною енергетичною ефективністю ці гази не на багато поступаються традиційному природному газу [1, 2].

Використання таких нетрадиційних газових палив дасть можливість не тільки зменшити витрату дефіцитних в Україні водне-вуглецевих палив, а й дозволить вирішити проблему охорони довкілля шляхом введення в паливний баланс вказаних відходів промислового, а також сільськогосподарського виробництва.

Як правило, нетрадиційні гази відносяться до середньо та малокалорійних. В залежності від свого походження вони мають різний склад. Крім того, склад цих газів може значно змінюватися в часі. Для свого ефективного спалювання ці палива потребують спеціальних методів спалювання, які відрізняються від традиційного підходу.

Щодо технічного використання нетрадиційних або альтернативних газів, то слід мати на увазі, що ці гази, як паливо, мають такі особливості як наявність в їхньому складі різних поліантів, наприклад, повітря, двоокису і окису вуглецю, азоту, складних хімічних речовин, концентрація яких може змінюватись в процесі роботи установки. Наявність таких поліантів впливає на тепломеханічні та фізико-хімічні характеристики палива, наприклад, стехіометричний коефіцієнт, концентраційні межі горіння газу, швидкість розповсюдження полум'я, стабільність та довжину газового факелу, температуру горіння [2].

При розробці пальникових пристроїв для спалювання альтернативних нетрадиційних палив слід брати до уваги необхідність взаємозамінності газових палив, тому що зміна складу газу не повинна впливати на такі основні характеристики пальникових пристроїв як діапазон сталої роботи, повноту згоряння, вихід токсичних оксидів азоту і вуглецю, температуру елементів обладнання, втрати тиску, якість технічного обслуговування пальників, їх регулювання, термін експлуатації тощо.

Таким чином, питання введення в обіг в енергетику і промисловість нетрадиційних газових палив та розробка засобів для їх ефективного спалювання має актуальний характер на сьогодні і повинна бути одною зі складових політики раціонального та економічного використання відновлювальних джерел енергії в Україні.

2. Об'єкт і предмет дослідження

Двонішевий пальниковий пристрій. Спалювання газових палив змінного складу в нішевому стабілізаторному пальнику.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи було експериментальне дослідження стабілізаторного пальникового модуля з уніфікованою схемою подачі альтернативного і високореакційного палив, а також забезпечення сталої роботи пальника при коефіцієнтах надлишку повітря, які наближаються до одиниці.

4. Аналіз літератури

В енергетиці і промисловості використовуються пальникові пристрої для спалювання низько- та середньореакційних палив. В цих пальниках можливе спалювання забаластованих газів з певною концентрацією полуюантів.

Загалом, при спалюванні забаластованих палив здебільшого використовують такі ж конструкції пальників, що розроблені для спалювання високореакційних палив. Але при цьому треба враховувати можливість звуження діапазону сталого горіння, проскоку горіння в зону сумішоутворення або зриву факелу і появи значного недопалу [2]. При збільшенні концентрації полуюантів понад певну концентрацію стабілізація горіння стає неможливою.

З метою суттєвого зменшення залежності від імпорту природного газу останнім часом у світовій енергетиці і в Україні приділяється увага такому відновлювальному джерелу енергії як біогаз [3].

Джерелом біогазу є стічні води на міських очисних спорудах, відходи підприємств харчової промисловості, зокрема, м'ясокомбінатів, спиртових заводів та інших виробництв, первинні відходи сільського господарства (солома, відходи виробництва кукурудзи на зерно, соняшник), енергетичні культури, солома ріпаку, деревина тощо.

За деякими даними кількість біомаси, яка щорічно утворюється на планеті, в декілька разів більше, ніж сумарний видобуток інших палив. Таким чином, виробництво біогазу з біомаси може в перспективі дати значний додатковий ресурс палива.

Біогазові палива в основному містять у своєму складі метан з додатком таких інертних газів як вуглекислота, азот, повітря, оксид вуглецю тощо. Наявність інертних домішок призводить до зменшення частки метану і збільшення баластної маси газів, що поглинає тепло. Це призводить до зменшення температури горіння, звуження меж запалювання і погіршення сталості горіння [4].

Вважається, що для забезпечення стійкого горіння забаластованого газу із змінною концентрацією палива і домішок в широкому діапазоні режимів необхідно використовувати додаткові способи стабілізації горіння. Одним з таких способів може бути використання стороннього джерела енергії з високою температурою, наприклад, запалюючого факелу.

В Україні роботи щодо розробки та впровадження пальників для спалювання біогазу різного складу в енергетичних та промислових котлах та установках виконуються, зокрема, в Інституті Газу НАН України [4, 5].

В роботі встановлено, що для організації ефективного спалювання біогазу його слід подавати перед виходом струменів природного газу. У зв'язку із меншою швидкістю розповсюдження полум'я в біогазі необхідно використати додаткову стабілізацію полум'я біогазу. В роботі використана закрутка повітряного потоку.

Деякі результати робіт щодо дослідження спалювання природного і генераторного газів наведено в [5, 6]. В пальнику подача палива передбачена по окремим каналам. Для запобігання

проскоку полум'я в змішувач утворення суміші газів та їх перемішування з повітрям здійснюється в тунелі пальника і самій топці.

В останні роки значна увага приділяється також використанню нетрадиційних газових палив, зокрема, в газових турбінах.

Були проведені дослідження з використанням, зокрема, синтез-газу, що утворюється в результаті переробки високозольного вугілля, в камері згоряння ГТУ потужністю 2,5 МВт [7]. В процесі роботи змінювались склад і теплота згоряння синтез-газу.

В результаті випробувань камери згоряння, яка призначена для роботи на природному газі, при спалюванні синтез-газу з меншою теплотворною спроможністю встановлено, що із зміною структури факелу пов'язане збільшення виходу оксидів азоту наприклад, з величини 66 ppm до 200 ppm. Зроблено висновок про необхідність внесення потрібних змін в конструкцію камери згоряння.

Розвиток енергетичної галузі в країнах Євросоюзу визначається трьома основними принципами: безпека, зниження залежності від нафти і газу, екологічна чистота. Вважається, що альтернативним паливом, яке задовольняє всім трьом принципам, є гази з біомаси. В рамках проекту Європейського союзу «Високоєфективна газова турбіна з використанням синтетичного газу» (HEGSA: High Efficient Gas Tyrbine with Syngas Application) [8] були проведені випробування розробленої камери згоряння.

В одному з варіантів передбачалось використання біогазу (суміш від 40 % до 75 % метану і двоокису вуглецю плюс різні домішки) або синтетичного газу (суміші водню, оксиду вуглецю і різних домішок).

Була розроблена концепція сучасного малоємисійного пальника для турбін з використанням синтетичного газу. В пальнику виконано два канали для введення синтетичного газу. Основний потік подається в завихрувач, що підвищує стабільність горіння бідного синтетичного газу.

Засобом отримання низького рівня емісії NO_x вважається спалювання бідної попередньо перемішаної газової суміші. Але при цьому одною з проблем, яку необхідно вирішити при розробці пальника, є велика вірогідність проскоку полум'я в змішувач.

В [9] досліджувались такі базові характеристики горіння палив, як швидкість розповсюдження ламінарного полум'я і діапазон сталого горіння сумішей палива з повітрям. В дослідженнях в одному з варіантів біогаз складався з 66,4% метану, 30,6 % двоокису вуглецю і 3% азоту. Встановлено, що в результаті наявності інгібіторів діапазон сталого горіння такого палива в суміші з повітрям трохи звужується до значень від коефіцієнту надлишку повітря $\alpha_{\text{мин}} = 0,6$ до $\alpha_{\text{макс}} = 1,2$ у порівнянні з діапазоном сталого горіння для суміші метан – повітря, де $\alpha_{\text{мин}} = 0,6$ до $\alpha_{\text{макс}} = 1,3$. Швидкість розповсюдження полум'я при $\alpha = 1,0$ зменшилась з 0,40 м/с (для суміші повітря з чистим метаном) до 0,2638 м/с.

В енергетиці як і в промисловості при спалюванні нетрадиційних палив традиційно використовуються реєстрові пальники з закрутою повітряного потоку, що збільшує втрати тиску повітря, ускладнює роботу пальника при зміні режиму роботи, а також не дозволяє використати принцип модульності виконання пальника.

Одним з перспективних типів пальникових пристроїв, які можуть забезпечити ефективне спалювання нетрадиційних газових палив, керованість процесом горіння, формування поля температур газів в топці, забезпечення сталості горіння при зміні швидкості повітряного потоку, а також модульність виконання можуть бути мікрофакельні пальникові пристрої стабілізаторного типу, які розроблені в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського») [10].

Схеми таких стабілізаторних пристроїв, які були розроблені для спалювання забаластованих газових палив, показані на рис. 1.

В обох пальникових пристроях забаластоване паливо (пропан-бутан плюс домішки - повітря, двоокис вуглецю) подавалось в обтічний повітряний потік перед зривними кромками

стабілізатора. В варіанті а) високореакційне паливо подавалось в зону рециркуляції, в варіанті б) – в обтічний повітряний потік.

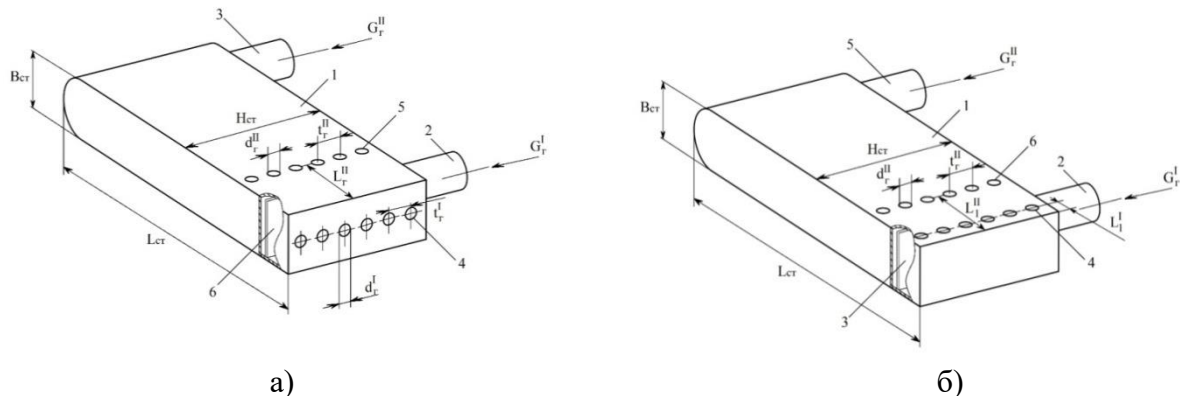


Рис. 1. Стабілізаторні пальникові пристрої для спалювання забаластованих газових палив:
а) подача забаластованого газу в обтічний повітряний потік через отвори 5, високореакційного палива в зону рециркуляції – через отвори 4; б) подача забаластованого газу в обтічний повітряний потік через отвори 6, високореакційного палива в обтічний повітряний потік – через отвори 4.

В роботі визначені межі сталої роботи пальників в залежності від концентрації домішок в забаластованому паливі. Встановлені величини домішок, при яких відбувався зрив процесу горіння забаластованого газу. При згасанні факелу включалась подача високореакційного палива для організації запалюючого (чергового) факелу. Показано, що при подачі високореакційного палива за обома схемами (в зону рециркуляції і в обтічний повітряний потік) забезпечується стала робота пальника при зміні концентрації домішок від 0% (чисте високо реакційне паливо) до 100% (подаються тільки домішки). При включенні запалюючого факелу довжина факелу і сталість горіння визначається характеристиками цього факелу. Таким чином, комбінована подача газу в обох пальниках забезпечує надійну і ефективну роботу в широкому діапазоні режимів по коефіцієнту надлишку повітря.

При подачі високореакційного палива в зону рециркуляції (варіант а) забезпечується стала робота пальника при високих коефіцієнтах надлишку повітря при збільшеній довжині факелу. При подачі високореакційного палива в обтічний повітряний потік (варіант б) забезпечується стала робота при коефіцієнті надлишку повітря, що наближається до одиниці.

5. Методи досліджень

Проведені дослідження стабілізаторних пальників з комбінованою роздільною подачею альтернативного і високореакційного газу показали можливість ефективного і надійного спалювання альтернативного палива в широкому діапазоні зміни концентрації домішок в низькореакційному паливі. При цьому струмені низькореакційного палива проходять між високотемпературними стабілізаційними факелами високореакційного палива. В той же час, при подачі підпалюючого високотемпературного в зону рециркуляції або із зривних кромek стабілізатора спостерігається збільшення довжини факелу з причини затягування процесу перемішування і горіння обох палив.

З метою забезпечення подачі і горіння альтернативного і підпалюючого палив за однаковими схемами, а також отримання стійкого і ефективного горіння палив при зміні концентрації домішок в альтернативному паливі в широкому діапазоні був розроблений і випробуваний двонішевий пальниковий пристрій, який представлений на рис. 1 [11].

Пальник дозволяє організувати процеси спалювання двох різних палив за допомогою свого окремого нішевого поглиблення. Він складається з порожнистих корпусів 1, 3 першого

і другого нішевих поглиблень, двох нішевих поглиблень 2, 4 і вихідного торця 5. Паливо в порожнисті корпуси першого і другого нішевих поглиблень подається через штуцери 6, 7 (рис. 1,б). В набігаючий повітряний потік паливо подається через систему отворів 8,9 ($n_r = 14$ отв., $d_r = 2,6$ мм) в стінках першого і другого нішевих поглиблень.

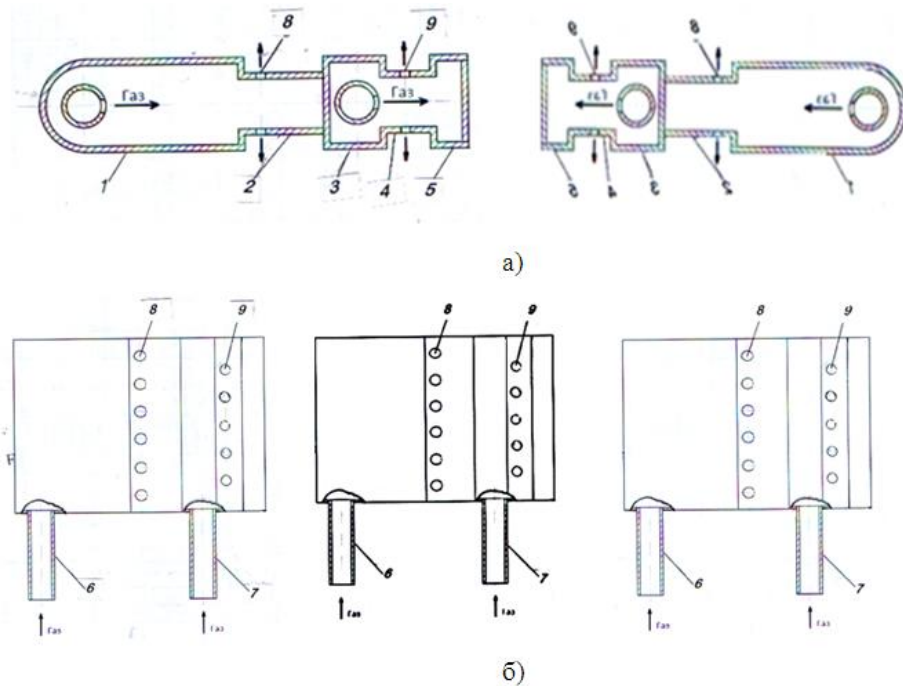


Рис. 2. Двонішевий модульний стабілізатор для спалювання альтернативних газових палив з подачею палива в нішеві поглиблення: а) поперечний переріз, б) вид збоку.

На рис. 2: 1 – корпус першої ніші; 2 – нижня стінка першої ніші; 3 – корпус другої ніші; 4 – нижня стінка другої ніші; 5 – вихідний торець пальника; 6 – штуцер підведення газу до першої ніші; 7 – штуцер підведення газу до другої ніші; 8 – отвори подачі газу в першу нішу; 9 – отвори подачі газу в другу нішу; 10 – отвори подачі газу перед першою нішею; 11 – отвори подачі газу перед другою нішею.

Через отвори 8 відбувається подача на спалювання альтернативного газу змінного складу від високореакційного (відсутність баласту) до суміші газу з баластом, склад якої виходять за межі сталого горіння, і навіть чистого баласту без палива. Через отвори 9 подається високореакційне паливо, яке утворює високотемпературні підпалюючі (чергові) факели. Струмені альтернативного палива першої ніші проходять між високотемпературними факелами другої ніші і відбувається горіння сумарних палив.

Прийнятий метод організації процесу горіння з використанням двох окремих нішевих поглиблень дає можливість при необхідності використати різні варіанти схем сумішоутворення і горіння палив [11].

Незмінним остається одне: при всіх можливих варіантах газороздачі для забезпечення високих експлуатаційних показників горіння низькорекційного палива – надійності запалювання, стійкості факелу, високої повноти згорання, струмені низькорекційного газу з різним і перемінним під час експлуатації вмістом в ньому баласту проходять через високотемпературні факели високореакційного палива [12-14].

З використанням програмного комплексу ANSYS Fluent [15] був виконаний аналіз течії струменів палива (пропан-бутан) при виході з газових отворів, що розміщені в нішевому поглибленні.

На рис. 3 показано лінії концентрації палива (пропан-бутан), яке виходить з газового отвору, що розміщений в першому нішевому поглибленні. Розрахунки виконувались для осі

газового струменя. Швидкість повітря складала $W_{\text{п}} = 10,0$ м/с, швидкість газових струменів приймалось в діапазоні $W_{\text{г}} = (7,0, 14,0)$ м/с.

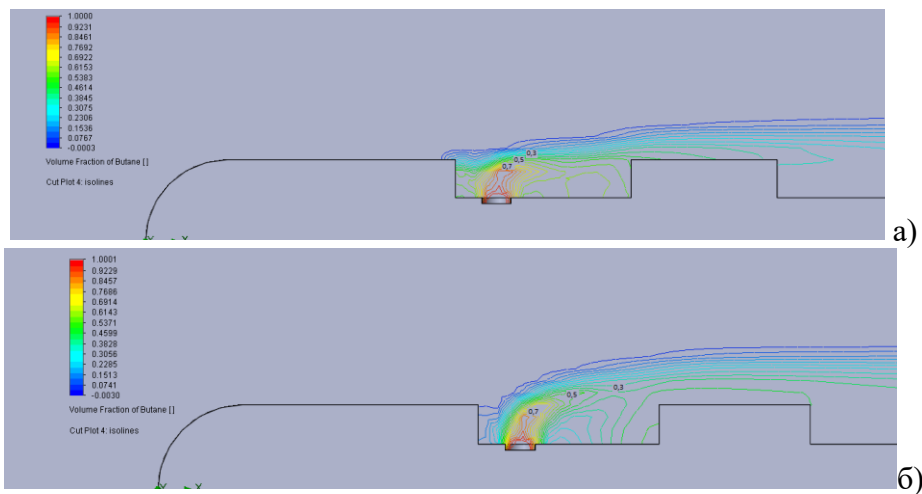


Рис. 3. Розрахункові поля концентрацій палива (пропан-бутан) при подачі газу з отвору в першому нішевому поглибленні $d_r = 5,0$ мм, $W_{\text{п}} = 10$ м/с:
а) $W_{\text{г}} = 7,0$ м/с; б) $W_{\text{г}} = 14,0$ м/с.

Як показує аналіз результатів розрахунків, при подачі газу з отворів в нішевому поглибленні в дослідженому діапазоні достатньо широкої зміни швидкості струменів (витрати) палива в нішевому поглибленні суміш знаходиться в концентраційних межах горіння палива.

Розрахунки за допомогою програмного комплексу ANSYS Fluent [15] дозволили розрахувати комбіновану подачу палива в обох нішах одночасно без злиття струменів. Такий процес показано на рис. 3, де приведено лінії токів, які одночасно відображають концентрації.

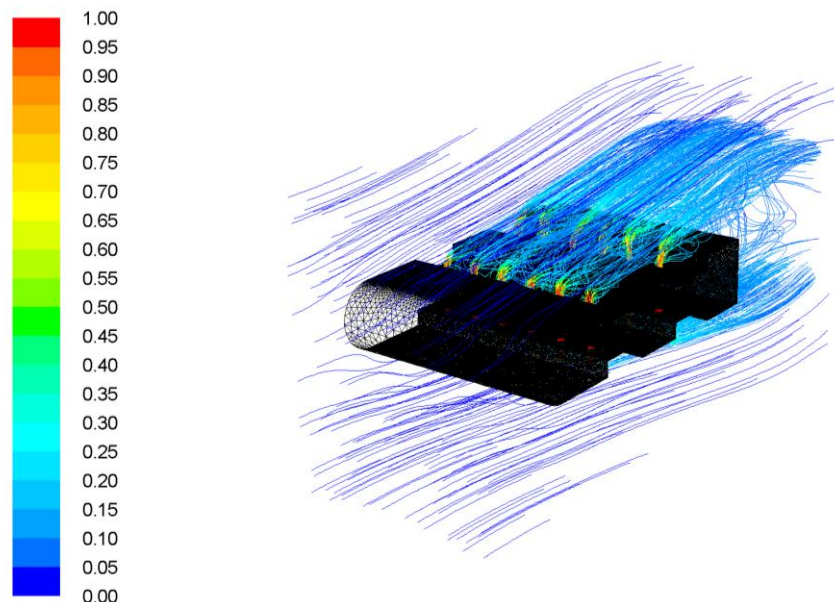


Рис. 4. Лінії токів, які одночасно відображають концентрації палива при одночасній подачі газу в обох нішевих поглибленнях.

Для забезпечення ефективної роботи пальникового пристрою струмені додаткового палива повинні розташовуватися між струменями основного палива. Відстань між рядами подачі забаластованого і високореакційного палив необхідно вибрати за умови забезпечення якісного сумішоутворення обох палив з повітрям без злиття факелів.

6. Результати досліджень

Розрахунки показують, що шляхом зміни діаметру газових отворів, кроку їх розташування в ніші можна регулювати ступінь перемішування палива і повітря з метою підвищення ефективності процесу горіння.

На першому етапі роботи на дослідному стенді були проведені вогневі випробування варіанту двонішевого пальникового пристрою, виконаного за схемою рис. 1, при подачі нерозбавленого газу (пропан-бутан) через отвори в першому нішевому поглибленні.

На рис. 5 наведено дані залежності загального коефіцієнту надлишку повітря в пальнику при бідному зриві факелу ($\alpha_{\Sigma}^{\max}$) у випадку подачі газу в перше нішеве поглиблення від швидкості повітряного потоку, що обтікає стабілізатор $W_{\text{ш}}$, м/с. Коефіцієнт затінення робочої ділянки в місці розташування стабілізатора $K_f = B_{\text{ст}}/B_{\text{р.діл}} = 30 \text{ мм} / 100 \text{ мм} = 0,30$.

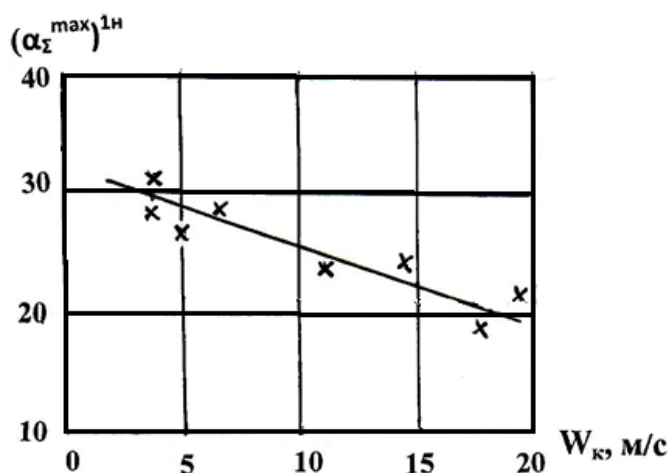


Рис. 5. Залежність загального коефіцієнту надлишку повітря в пальнику на режимі бідного зриву при подачі газу в перше нішеве поглиблення від швидкості повітряного потоку, $B_{\text{ст}} = 30 \text{ мм}$; $K_f = 0,30$; $d_{\text{г}} = 2,6 \text{ мм}$, розміри ніші: довжина $\times$ глибина, $L_{1\text{н}} \times H_{1\text{н}} = 30,0 \text{ мм} \times 7,0 \text{ мм}$.

Оскільки в нішеві поглиблення заходить тільки невелика частина повітря, що обтікає стабілізатор, сталість процесу горіння обох факелів досягається при збільшених загальних коефіцієнтах надлишку повітря в пальнику [12].

Залежність загального коефіцієнту надлишку повітря в пальнику на режимі бідного зриву у випадку подачі газу в перше нішеве поглиблення від швидкості повітряного потоку можна розрахувати за формулою:

$$(\alpha_{\Sigma}^{\max})^{1\text{н}} = 33 - 0,7 \cdot (W_{\text{к}}). \quad (1)$$

Значення $(\alpha_{\Sigma}^{\max})^{1\text{н}}$ розраховувались з урахуванням витрати всього повітря в пальнику, $\alpha_{\Sigma}^{\max} = G_{\text{п}}^{\Sigma} / L_0 \cdot G_{\text{г}}^{1\text{н}}$,

де $G_{\text{п}}^{\Sigma}$ – загальна витрата повітря в стенді;

L_0 – ваговий стехіометричний коефіцієнт;

$G_{\text{г}}^{1\text{н}}$ – витрата газу в першу нішу.

Отримані результати дослідів показують достатньо широкий діапазон сталого горіння факелу. Якщо прийняти, що в нішу при прийнятих в даній роботі розмірах ніші і коефіцієнті затінення перетину каналу $k_f = 0,30$ поступає 2% від загальної витрати повітря [14], можна розрахувати, що при загальному коефіцієнті надлишку повітря в камері $\alpha_{\Sigma} = 20 \div 30$,

коефіцієнт надлишку повітря в ніші $\alpha^{1н} = 0,4 \div 0,6$, тобто в ніші концентрація палива знаходиться в межах сталого горіння (для пропан-бутану діапазон горіння $\alpha = 0,4 \div 1,7$).

На рис. 6 наведені дані щодо сталості факелу в обох нішах при подачі повітря на попереднє сумішоутворення з газом.

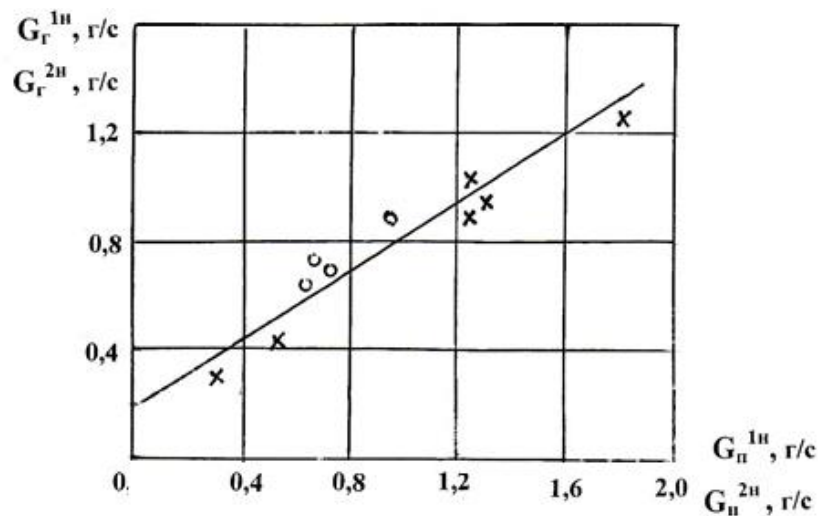


Рис. 6. Вплив на межі сталої роботи пальника подачі повітря в перше і друге нішеві поглиблення на попереднє сумішоутворення з паливом. Позначення режимів:
x – подача повітря в перше нішеве поглиблення; o – подача повітря в друге нішеве поглиблення.

Область можливих режимів роботи пальникового пристрою розміщується з лівого боку від лінії зриву факелу. Як видно з рис. 6, при підвищенні витрати палива можна також збільшити витрату домішки при збереженні сталості факелу.

При проведенні досліджень на даному пальнику не було виявлено впливу виду домішки – повітря чи CO_2 , на характеристики сталості факелу.

Для конструкції пальника, яка була досліджена, при подачі газу в нішеві поглиблення, залежність можливої витрати баласту (повітря) без зриву факелу, $G_{\text{бал}}^{1н}$, $G_{\text{бал}}^{2н}$, від витрати газу можна розрахувати за формулою

$$G_{\text{бал}}^{1н} = G_{\text{бал}}^{2н} = K \cdot (G_{\text{г}} - G_{\text{min}}), \quad (2)$$

де $K = 1,6$ дослідний коефіцієнт пропорційності для даного стабілізатора;

G_{min} – витрата газу на режимі бідного зриву без подачі баласту.

Вплив на розвиток процесу горіння (довжину і температуру факелу) при попередньому сумішоутворенні повітря і газу, і подачі цієї суміші в перше нішеве поглиблення показано на рис. 6.

На рис. 7.а показано факел при подачі чистого високореакційного палива (пропан-бутан) в перше нішеве поглиблення. На рис. 7.б показано факел при подачі додаткового повітря на попереднє сумішоутворення з газом. На рис. 7.в приведені температури газів вздовж осьової лінії сліду за стабілізатором для обох випадків.

Як показали результати випробувань, подача такого баласту, як повітря, на попереднє сумішоутворення з газом першої ніші викликає скорочення довжини факелу з причини наближення характеру процесу горіння суміші повітря і газу до кінетичного. При цьому також зменшується температури факелу внаслідок розбавлення палива повітрям.

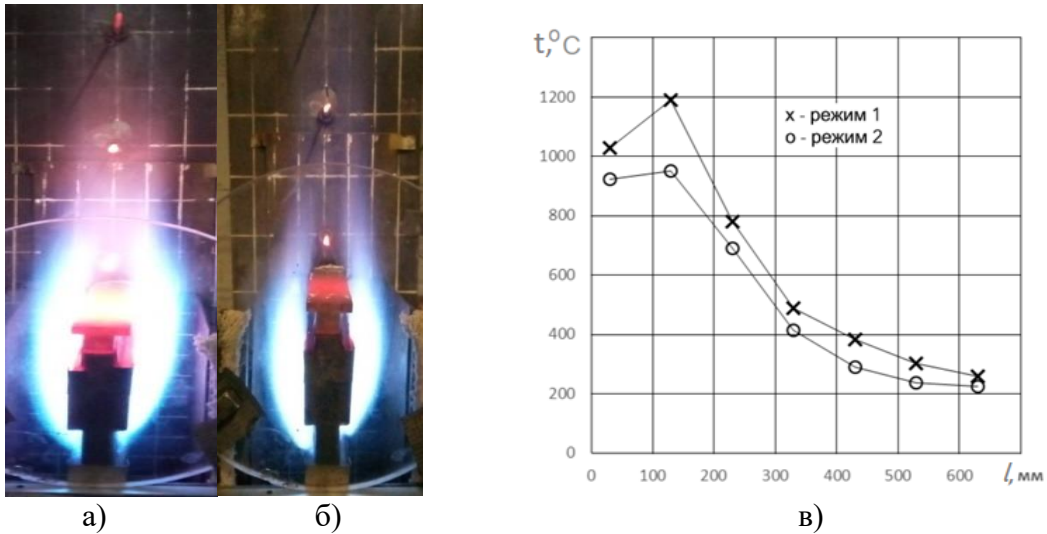


Рис. 7. Вплив на довжину факелу за стабілізатором (а, б) і температуру газів (в) подачі повітря на попереднє утворення суміші з газом в перше нішеве поглиблення: а) режим без подачі повітря на попереднє сумішоутворення ($G_{r^{1H}} = 0,8$ г/с), х – позначення режиму 1 на графіку в); б) - подача повітря на попереднє сумішоутворення ($G_{r^{1H}} = 0,8$ г/с + $G_{n^{1H}} = 0,3$ г/с, $G_{n^{1H}} / G_{r^{1H}} = 0,38$); о - позначення режиму 2 на графіку в).

Графік залежності довжини факелу від відносної витрати домішки (повітря) при подачі газу з поглиблення першої ніші показано на рис. 8.

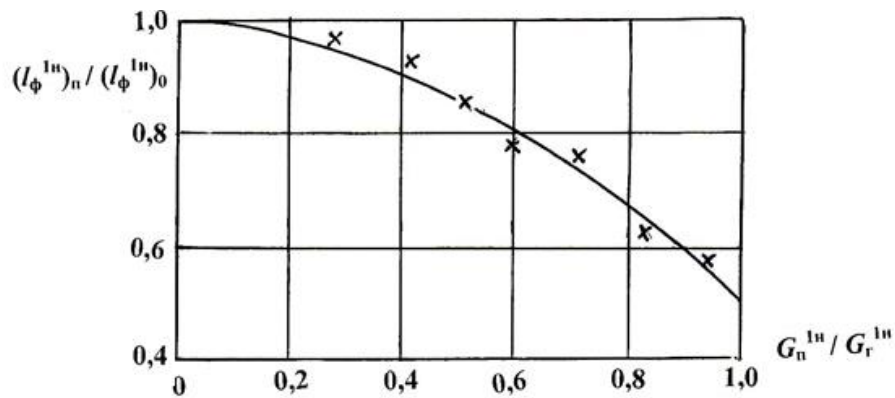


Рис. 8. Залежність відносної довжини факелу першої ніші від баластування газу повітрям

У випадку додавання повітря на попереднє сумішоутворення з газом, який виходить з першого нішевого поглиблення, довжину факелу можна представити у вигляді залежності

$$(l_{\phi^{1H}})_n / (l_{\phi^{1H}})_0 = 1 - 0,5 \cdot (G_{n^{1H}} / G_{r^{1H}}), \quad (3)$$

де $(l_{\phi^{1H}})_0$ – довжина факелу без баластування палива;

$(l_{\phi^{1H}})_n$ – довжина факелу при баластуванні палива повітрям;

$G_{n^{1H}} / G_{r^{1H}}$ – відносна витрата домішки;

Порівняння горіння палива окремо в першій і другій нішах показано на рис. 9.

На рис. 9, а-г приведені фотографії факелів, д,е – температури продуктів горіння по довжині факелу вздовж осової лінії сліду за стабілізатором при однакових витратах палива в 1-ше і 2-ге нішеве поглиблення.

При однакових витратах палива довжина факелу при подачі газу в друге нішеве поглиблення більше, а максимальна температура газів вище ніж при подачі в перше нішеве поглиблення.

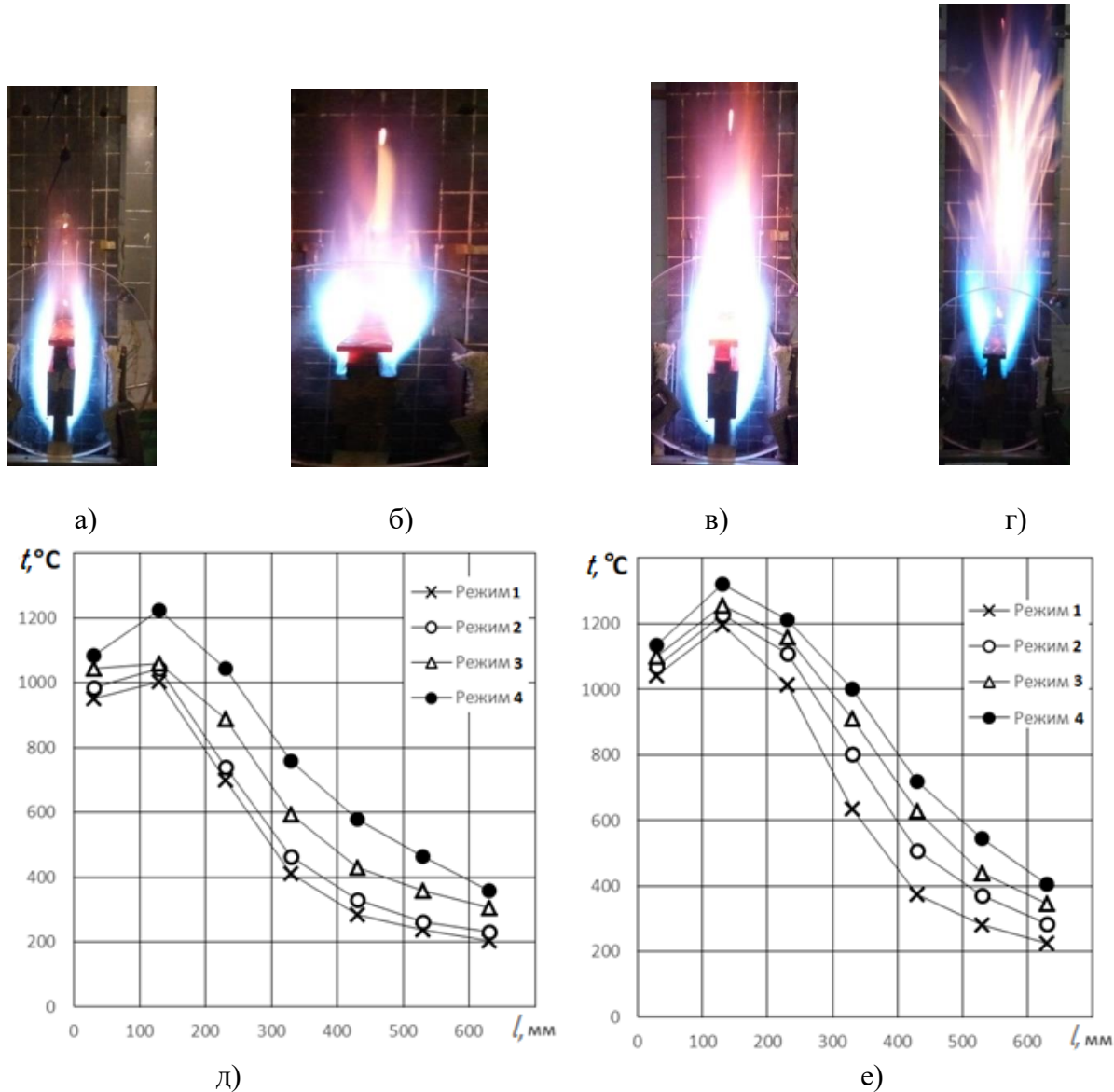


Рис. 9. Фотографії факелів (а-г) і температура продуктів горіння по довжині сліду за стабілізатором (д, е) при подачі палива (пропан-бутан) в першу і другу ніші при однакових витратах газу.

На рис.9 режими: а, в, д – подача газу в перше нішеве поглиблення, б, г, е – подача газу в друге нішеве поглиблення.

Фото факелів: а,б – $G_{r1n} = G_{r2n} = 0,64 \text{ г/с}$, в,г – $G_{r1n} = G_{r2n} = 1,27 \text{ г/с}$. Графіки температур: д,е – витрати газу: 1 – $G_{r1n} = G_{r2n} = 0,64 \text{ г/с}$, 2 – $0,80 \text{ г/с}$, 3 – $1,06 \text{ г/с}$, 4 – $1,27 \text{ г/с}$.

Це пов'язане з тим, що відстань від газових отворів в першій ніші до зривної кромки стабілізатора, а також довжина зони горіння і перемішування продуктів згорання з повітрям більші, ніж у другої за ходом повітря ніші.

Як видно з графіків, максимальна температура факелу другої ніші знаходиться в межах $1000 - 1400 ^\circ\text{C}$, що повинно забезпечувати надійне запалювання низькореакційного палива у разі подачі з першої ніші.

Залежність довжини факелу за стабілізатором при подачі газу в перше і друге нішеве поглиблення від швидкості газових струменів приведена на рис. 10.

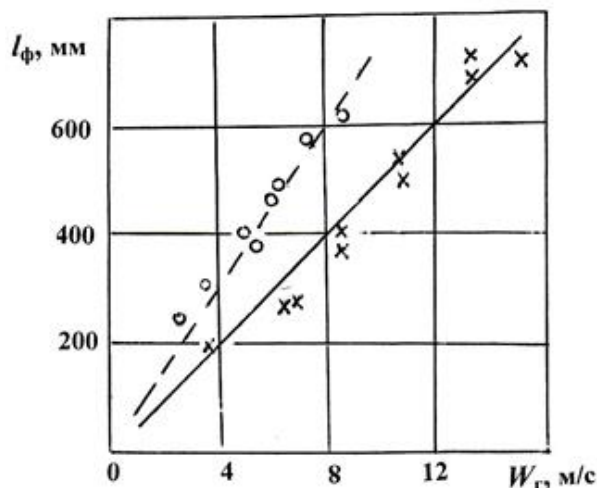


Рис. 10. Залежність довжини факелу за стабілізатором при подачі газу в першу і другу ніші від швидкості газових струменів, $W_{\text{п}} = 10$ м/с; x – 1-ша ніша; o – 2-га ніша

Для даного варіанту стабілізатора залежності довжини факелу можна представити такими формулами (розмірності l_{ϕ} – в мм, $W_{\text{г}}$ – м/с).

Для першої ніші

$$l_{\phi}^{1\text{н}} = 50 W_{\text{г}}^{1\text{н}}, \text{ мм.} \quad (4)$$

Для другої ніші

$$l_{\phi}^{2\text{н}} = 77,8 W_{\text{г}}^{2\text{н}}, \text{ мм.} \quad (5)$$

Загалом можна сказати, що при однакових конструкціях обох ніш і системах газороздачі характеристики горіння майже ідентичні.

Для визначення можливості роботи двонішевого стабілізатора на альтернативних забаластованих паливах при подачі суміші газу і баласту з отворів в першому нішевому поглибленні були виконані відповідні дослідження.

У відповідності з прийнятою в даній роботі методикою організації процесу спалювання газів у двонішевому стабілізаторі, у разі виходу концентрації паливної суміші, що подається з першої ніші, $(G_{\text{г}}^{1\text{н}} + G_{\text{пов}}^{1\text{н}})$, за межі сталої роботи, для підтримки процесу горіння пропонується подавати високореакційне паливо через отвори в другому нішевому поглибленні – $G_{\text{г}}^{2\text{н}}$.

Результати роботи на одному з варіантів такої подачі палив і повітря в обидві ніші показано на рис. 11 у вигляді фотографій факелу і температури газу по довжині зони горіння.

Під час випробувань на всіх режимах приймалась постійною теплова потужність пальника $Q_{\text{пал}} = Q^{1\text{н}} + Q^{2\text{н}} = \text{const}$. Зменшення витрати палива з першої ніші компенсувалось збільшенням його витрати з другої ніші.

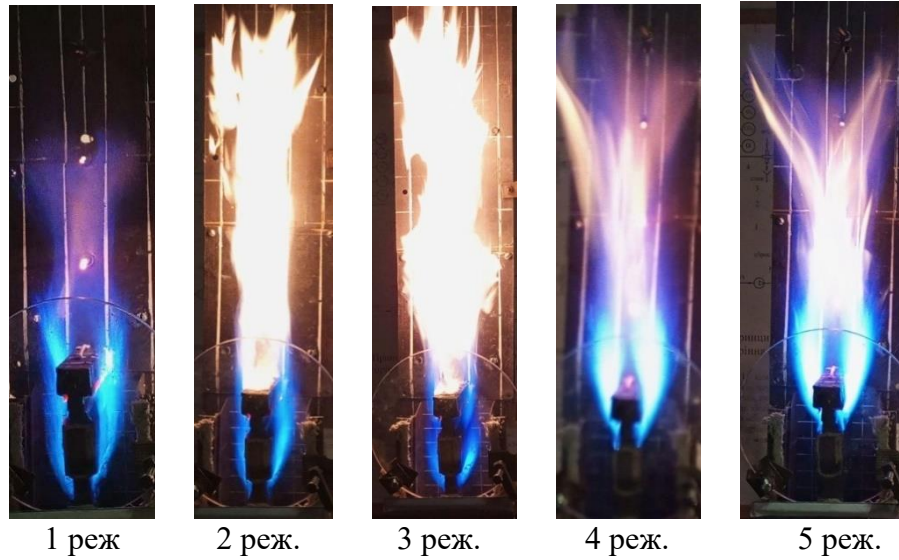


Рис. 11. Робота двонішевого стабілізатора по комбінованій схемі

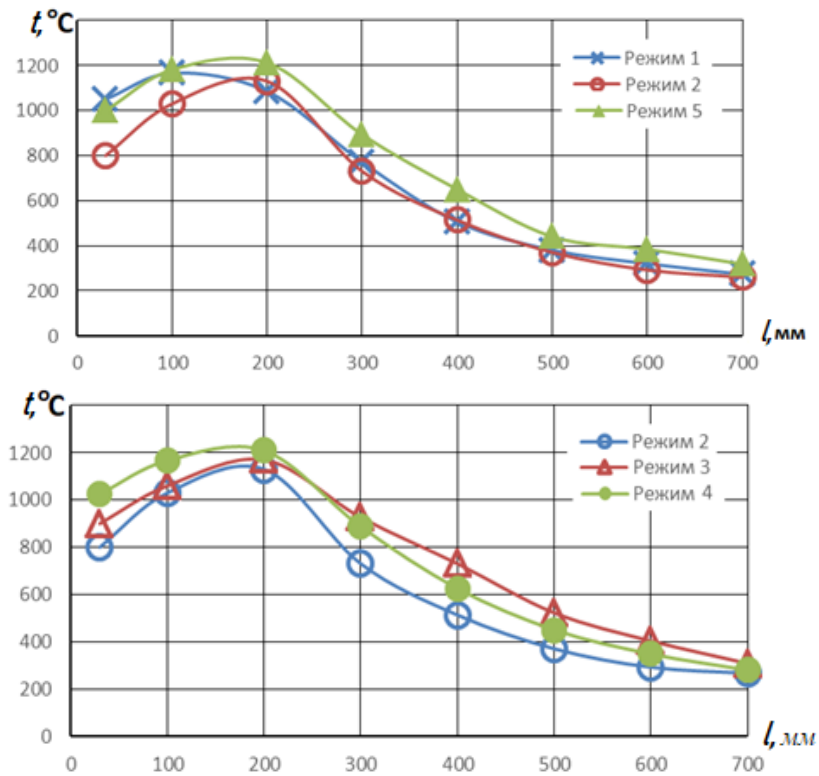


Рис. 12. Робота двонішевого стабілізатора по комбінованій схемі: режими 1, 2, 5 – робота без подачі повітря в першу нішу; режими 3, 4 – комбінована робота з подачею повітря в першу нішу.

Таблиця 1. Робота двонішевого стабілізатора по комбінованій схемі

№ режиму	$G_{г}^{1н} \cdot 10^3$, кг/с	$G_{г}^{2н} \cdot 10^3$, кг/с	$G_{г}^{\Sigma} \cdot 10^3$, кг/с	$G_{п}^{1н} \cdot 10^3$, кг/с	$G_{п}^{1н} / G_{г}^{1н}$	Умовне позначення
1	1,0	0	1,0	0	0	X
2	0,5	0,5	1,0	0	0	○
3	0,5	0,5	1,0	0,5	0	Δ
4	0,5	0,5	1,0	1,0	2,0	●
5	0	1,0	1,0	0	0	▲

В таблиці 1 наведено роботу двонішевого стабілізатора по комбінованій схемі при різних режимах. В першому режимі в першу нішу подавалось високореакційне паливо (пропан-бутан) ($G_{r1n} = 1,0$ г/с; $G_{r\Sigma} = 1,0$ г/с, режим 1). В другому режимі комбінована робота з подачею по 50% палива в обидві ніші ($G_{r1n} = G_{r2n} = 0,5$ г/с; $G_{r\Sigma} = 1,0$ г/с, режим 2). Як видно, довжина факелу збільшується, але температура газів змінюється мало. В третьому режимі додатково подавалось повітря на утворення суміші з паливом в першій ніші при збереженні загальної витрати палива ($G_{r1n} = G_{r2n} = 0,5$ г/с; $G_{r\Sigma} = 1,0$ г/с, $G_{p1n} = 0,5$ г/с; режим 3), характер горіння практично не змінюється у порівнянні з другим режимом. В четвертому режимі при збільшенні витрати повітря до газу в першій ніші відбувався зрив горіння в цій ніші ($G_{r1n} = G_{r2n} = 0,5$ г/с; $G_{r\Sigma} = 1,0$ г/с, $G_{p1n} = 1,0$ г/с; режим 4). В даному випадку струмені низькореакційного альтернативного палива першої ніші (пропан-бутан + повітря) запалюються високотемпературними факелами другої ніші. При цьому відбувається деяке скорочення довжини факелу, практично, без зміни рівня температури факелу. В п'ятому режимі у разі припинення подачі альтернативного палива ($G_{r1n} = 0$ г/с; $G_{r2n} = 1,0$ г/с; $G_{r\Sigma} = 1,0$ г/с, режим 5) теплова потужність пальника забезпечується роботою другої ніші з її характеристиками по довжині і температурі факелу.

7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

Метою подальшої роботи є вдосконалення конструкції модульного пальника з точки зору охолодження вихідної частини стабілізатора і скорочення довжини факелу при роботі з подачею газу у другу нішу.

8. Висновки

Загалом, як показують візуальні спостереження і заміри температури факелу, при подачі негорючої суміші палива і баласту в першу нішу, а високореакційного палива – в другу нішу, не відбувається суттєвого підвищення довжини факелу і зниження температури горіння.

Таким чином, запропонований принцип організації процесу спалювання газу в двонішевому стабілізаторному модулі і досліджена конструкція стабілізатора може бути використана для розробки пальникових пристроїв, які призначені для спалювання різних видів паливних газів, в тому числі низькореакційних, навіть при виході суміші палива і баласту за концентраційні межі запалювання.

Список літератури:

- 1) Khrystych V.A. Szhyhanye zaballastyrovannykh metanosoderzhashchykh hazov peremennoho sostava / V.A. Khrystych, A.O. Khyzhazy, N.N. Olkhovskaia, S.A. Levchuk . Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia. 2000. № 1. С. 47-52.
- 2) Khrystych V.A. Mykrofakelnoe horenye metano-vozdushnykh smesei / V.A. Khrystych, A.O. Khyzhazy, S.A. Levchuk, N.N. Olkhovskaia. Ekotekhnolohyy y resursozberezhenye. 1998. № 3. S. 43-47.
- 3) Heletukha H.H., Zhelezna T.A. Rozvytok bioenerhetyky yak instrument zamishchennia pryrodnoho hazu v Ukraini. Bioenerhetyka. 2015. № 1. S. 15-20.
- 4) Syhal Y.Ia, Marasyn Y.Ia., Smykhula A.V. Hazohorelochnyye ustroystva dlia szhyhanyia byohaza v kotlakh. Enerhotekhnolohyy y resursosberezhenye. 2014. № 3. S. 68-72.
- 5) Syhal Y.Ia. Eksperymentalnoe yssledivanye horenyia byohaza y ego yspolzovanye v promyshlennykh kotlakh / Y.Ia. Syhal, A.V. Marasyn, A.V. Smykhula y dr. // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, № 17 (139) 2013. – pp. 84-89. <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperymentalnoe-issledovanie-goreniya-biogaza-i-ego-ispolzovanie-v-promyshlennykh-kotlah/viewer>

- 6) Syhal Y.Ia. Экспериментальное исследование безопасности как топлива для котлов / Y.Ia. Syhal, A.V. Smikhula, A.V. Marasyn y dr. Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2013. № 5. С. 26-32. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/127237?show=full>
- 7) Serbyn S.Y. Yssledovanye osobennosti rabocheho protsessa kamery shoranyia HTD moshchnosti 2,5 MVt, robotaiushchei na syntez-haze / S.Y. Serbyn, N.A. Honcharova, V.V. Vylkul. Visnyk NTU «KhPI». 2015. № 16 (1125). С. 14-18. http://www.kpi.kharkov.ua/archive//16_15_02.pdf
- 8) Slavynskaia N. A. Proekt Evropeiskoho soiuza «Высокоэффективная газовая турбина с применением синтетического газа». Газотурбинные технологии. 2007. № 3. С. 24-27.
- 9) W. Anggono, ING Wardana, M. Lawes, K. J. Hughes, S. Wahyudi, N. Hamidi, A. Hayakawa. Biogas Laminar Burning Velocity and Flammability Characteristics in Spark Ignited Premix Combustion / Journal of Physics: Conference Series 423 (2013) 012015. – pp. 1-7. Scopus. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/423/1/012015/pdf>
- 10) Olga Chernousenko O., Butovsky L., Granovska O., Moroz O., Starchenko O. Determining basic characteristics of stabilizer micro torch burners for the combustion of ballasted fuel gas // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies" - Energy-saving technologies and equipment, 5 (8 (113)). 51-65, 2021. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242984>.
- 11) Kombinovanyi dvonishevyi hazovyi palnyk. Chernousenko O.Iu., Butovskiy L.S., Hranovska O.O., Moroz O.S., Starchenko O.S.: pat. 136625 Ukraina: MPK (2019.01) F23C 1/00, F23C 1/08 (2006.01), F23C 5/00. № u 2019 02546; zaiavl.15.03.2019; opubl. 27.08.2019, Biul. № 16. https://library.ukrpatent.org/document?fund=2&id=261437&to_fund=2
- 12) Abdulin M.Z., Siryi O.A. Doslidzhennia stalosti protsesu horinnia u strumenevo-nishevii systemi spaliuvannia palyva. Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Serii: tekhnichni nauky. 2018. т. 29 (68),4.2. № 1. С. 55-60.
- 13) Butovskiy, L., Hranovska, O., Moroz, O., Starchenko, O. (2021). Doslidzhennia dyfuziino-stabilizatornoho spaliuvannia hazu pry znyzhenomu vmisti kysniu v oksyliuvachi. Molodyi vchenyi, 3 (91), 115-120. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2021-3-91-26>
- 14) Chernousenko, O. ., Butovskiy, L., Moroz , O., Kunyk, A., Khilimonchuk , D. (2023). Rozrobka ta doslidzhennia dyfuziino-stabilizatornoho palnyka z nisheiu. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia, (1-2), 47–54. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2022.01.08>
- 15) Ansys Fluent 14.0 Theory Guide [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <https://www.scribd.com/doc/140163341/Ansys-Fluent-14-0-Theory-Guide>

Determination of the characteristics of combustion of gas fuels of variable composition in a niche stabilizer burner

Olha Chernousenko

Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID 0000-0002-1427-8068

Leonid Butovsky

Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Olha Vlasenko

Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID 0000-0002-8975-0873

Inna Bednarska

Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine
ORCID 0000-0002-5558-4467

Abstract: The results of experimental studies of the burning of ballast gases, which were a mixture of highly reactive propane-butane gas with air and carbon dioxide, were considered. The studies were carried out using a flat, hollow stabilizer with a width of 28 mm, which was flowed by an air stream on both sides. On both sides of the stabilizer, two niches deepening with a length of 30 mm and a depth of 7 mm each were made in sequence according to the flow of air. Ballasted fuel of variable composition was supplied by perpendicular jets into the air flow from holes located on the walls of the first row of niche deepenings. During the experiments, the concentration of impurities in the high-reaction fuel varied from 0% (propane-butane) to 100% (no fuel). Studies have shown that with an increase of the amount of impurities in the fuel, the length of the torch gradually decreases, as well as the temperature of the combustion products and the content of nitrogen oxides. When a certain concentration of impurities in the fuel is reached, a combustion failure occurs. The dependence of flame stability from the relative content of impurities in the fuel was established. To stabilize combustion, pure high-reactivity fuel (propane-butane) was fed into the air flow from the walls of the second row of niches deepening from a separate collector. The supply holes for stabilizing high-reaction fuel are offset by half a step relative to the supply holes for ballasted fuel. So, jets of low-reactivity fuel of variable composition pass between high-temperature torches of high-reactivity fuel and as a result of which ignition and stabilization of combustion of low-reactivity fuel occurs, regardless of the composition of the latter. The adopted combined gas supply scheme provides an opportunity to regulate the fuel consumption in the niches and thus to regulate the burner power.

Keywords: stabilizer burner device, niche deepening, burning stability, flame length, flame temperature, output of nitrogen oxides.
