

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.43.056

Абдулін М.З.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сірий О.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЛОСТІ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ У СТРУМЕНЕВО-НІШЕВІЙ СИСТЕМІ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА

У статті виконано огляд основних схем стабілізації полум'я промислового газопальникового обладнання. Подано основні їх переваги та недоліки. Показано перспективність застосування як стабілізатора комбінованої схеми на основі поганообтічного тіла та газодинамічного струменевого екрану, яка реалізована у струменево-нішевій системі (СНС). Подано результати дослідження впливу основних геометричних параметрів струменево-нішевої системи на сталість горіння газоподібного палива. Наведено експериментальні результати дослідження зривних меж («бідного» й «багатого» зриву полум'я) залежно від конфігурації струменево-нішевої системи.

Ключові слова: струменево-нішевий стабілізатор полум'я, «бідний» і «багатий» зрив полум'я, параметри паливорозподілу.

Постановка проблеми. Питання підвищення енергоефективності паливоспалюючого обладнання залишаються провідними в енергетиці та промисловості країни. В умовах складної економічно-політичної обстановки завдання повного оновлення парку вогнетехнічного обладнання (далі – ВО) виявляється досить витратним, а в окремих випадках навіть недосяжним. Одним з альтернативних варіантів підвищення енерго-економічних характеристик застарілого парку ВО є проведення його маловитратної модернізації. Основні шляхи в цьому напрямі такі: впровадження сучасних технологій спалювання; заміна тягло-дугтьового обладнання на агрегати з частотним регулюванням; упровадження ефективних теплообмінників; застосування сучасних теплоізоляційних матеріалів.

Комплексний підхід до підвищення енергоефективності дає змогу досягти не тільки значної економії енергоресурсів, а й забезпечити надійність та екологічність обладнання.

Результати, що наведені в роботі, стосуватимуться суто питань, які пов'язані з особливостями

впровадження технології спалювання за рахунок заміни газопальникового обладнання й дають змогу в кінцевому результаті отримати найбільший із вищеперерахованих заходів енергоекологічний ефект. У цьому аспекті найбільш ефективною паливоспалюючою вітчизняною технологією, яка дає можливість надійно та ефективно працювати в широкому діапазоні робочих навантажень ВО, є струменево-нішева технологія (далі – СНТ) [1]. Сьогодні на основі СНТ проведено модернізацію близько 1000 ВО України та зарубіжжя. Основні принципи, що покладені в основу технології, такі:

- раціональний розподіл палива в потоці окисника;
- стійка регульована структура течії палива, окисника та продуктів згорання;
- саморегульованість складу паливної суміші в зоні стабілізації факелу;
- самоохолодження пальника;
- термічна підготовка пального.

Усі принципи, зазначені вище, досягаються за рахунок вдалого конструктивного розміщення

СНС [2–4] на автономному колекторі-пілоні, з яких складається пальник.

Поряд із проблемами, пов'язаними з необхідністю економії дефіцитних енергоресурсів, нагальними є вимоги стосовно розширення меж потужності пальникових пристроїв за рахунок зниження пускових тисків палива, що також допомагає забезпечити високі енергетичні показники агрегату та його надійну експлуатацію з можливістю глибокого розвантаження під час пусків і регулювання потужності роботи ВО. Розроблення відповідних заходів є необхідною вимогою з погляду підтримання номінального рівня температур у топковому просторі, при цьому варто запобігати термічному «удару» й температурній нерівномірності по об'єму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективна організація робочого процесу ВО, що використовує газоподібне паливо, вимагає врахування відповідних його характеристик під час спалювання в промислових установках:

1) температура займання палива достатньо висока (для природного газу становить 650–800°C);

2) у технологічному процесі котлів, печей, сушарок тощо потоки повітря й палива подаються в топковий простір зі швидкостями, що досягають десятків, а часом і сотень метрів за секунду, це значно більше за нормальну швидкість поширення полум'я, значення якої залежно від виду палива й температур реагентів не більше ніж 1 м/с;

3) для забезпечення стійкого горіння робоча суміш повинна включати необхідну концентрацію палива в загальному об'ємі компонентів реакції (5–15% для природного газу);

4) кількість теплоти, яка виділяється в процесі реакції, повинна перевищувати кількість відведеного тепла.

Для запобігання «зриву» полум'я необхідно забезпечити умови для його стабілізації, тобто безперервне займання горючої суміші у фіксованих ділянках топкового простору. Аналіз робіт, що присвячені дослідженню горіння в потоці, дає змогу виділити кілька способів стабілізації фронту полум'я. Перший – це стабілізація за рахунок підведення енергії від зовнішнього джерела постійної дії, а другий – стабілізація за рахунок підведення енергії із зони горіння.

Перший спосіб зазвичай досягається за допомогою так званого чергового факела (пальника, форсажної камери), а другий – за допомогою зони зворотних струмів високонагрітих продуктів згорання, яка виникає під час закручення потоку за

системою погано обтічних тіл різної геометричної форми або гідродинамічної взаємодії течій тощо [5, с. 527; 6, с. 185].

Найбільш поширеним способом стабілізації полум'я у промислових пальниках (далі – ПП) є закрутка потоків окисника та палива. У цих ПП параметр закрутки потоку визначає потужність зворотної течії високо нагрітих продуктів згорання з топкового простору до устя факела, забезпечуючи таким чином стабілізацію процесу горіння [7, с. 97]. До недоліків цієї схеми в пальниках під час їх експлуатації варто зарахувати підвищений гідравлічний опір, а також температурний перегрів як елементів пальника, так і їх амбразур. Крім того, глибина регулювання таких ПП не велика.

Ефективність процесу стабілізації полум'я може бути оцінена низкою критеріїв, кожен із яких характеризує рівень вирішення проблем, пов'язаних із експлуатацією та характеристиками стійкості роботи стабілізатора і ступенем його впливу на робочий процес: діапазон стабілізації за швидкістю потоку й коефіцієнта надлишку повітря; надійність запуску камер згорання (далі – КЗ) із цим типом стабілізатора; ресурс пристрою стабілізації; гідравлічний опір; вплив процесу сумішоутворення на повноту згорання, протяжність зони горіння; витрати енергії від зовнішніх джерел; простота й відносна дешевизна конструкції [8, с. 28].

Як відомо, принцип дії механічних стабілізаторів фронту полум'я заснований на конвективному перенесенні тепла продуктів згорання до свіжої суміші в зоні зворотних струмів (далі – ЗЗС). Головним чином зона стабілізації може бути створена під час обтікання тіл з погано обтічною конфігурацією (великим лобовим опором) або зміни кривизни поверхні каналу (уступ, каверна, лунка).

Поганообтічні стабілізатори знайшли своє застосування в камерах згорання ГТУ. У цьому випадку зона відриву знаходиться з підвітряного боку погано обтічного тіла. Усередині ЗЗС розміщена вихорова структура, що під час обертання створює умови для процесу масообміну з активним потоком набігаючого повітря. Як межу цієї зони розглядають лінію, що обмежує циркулюючу течію з постійним масообміном. При цьому циркуляційна течія ЗЗС нестационарна. При невеликих числах Рейнольдса відбувається періодичний відрив великих вихорів, тому розмір зони постійно змінюється. У разі збільшення чисел Рейнольдса течія набуває квазістационарного характеру за рахунок зменшення числа відриву вихорів ЗЗС. Експериментальні дослідження показали, що в середньому

розмір зони циркуляції за погано обтічним стабілізатором у 2–2,5 раза більший за його поперечний розмір в ізотермічних умовах і збільшується під час горіння [9–10]. ЗЗС утворюється у випадку як дозвукового, так і надзвукового обтікання погано обтічних стабілізаторів, при цьому рівні швидкостей ЗЗС у 2–3 рази менші, ніж швидкості набігаючого потоку окисника [11, с. 110].

Ділянка стійкої роботи, яка обмежується кривими «багатого» та «бідного» зриву полум'я (рис. 1) [5, с. 557]. Ділянка стабілізації факела в основному залежить від таких параметрів: швидкості основного потоку, форми та розміру стабілізатора, тиску й температури потоку, інтенсивності турбулентності, якості й типу палива. Аналізуючи ці дані, варто зазначити, що найбільш широкі межі стабілізації мають тіла з найбільшим лобовим опором потокові повітря, що набігає.

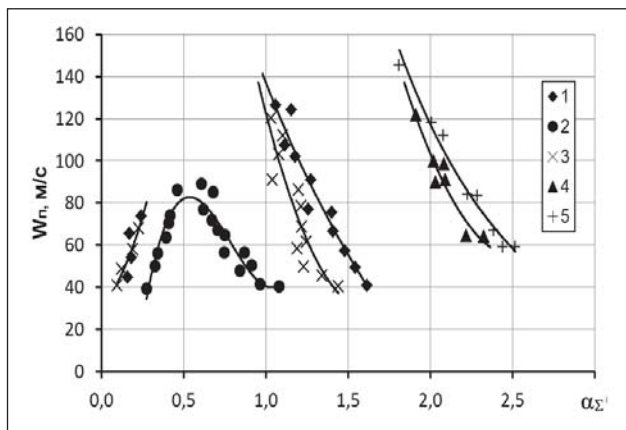


Рис. 1. Зривні характеристики поганообтічних тіл, гомогенна бензино-повітряна суміш, $t_{\text{сум}}=200^{\circ}\text{C}$: 1 – диск, $d_{\text{ст}}=40$ мм; 2 – шар, $d_{\text{ст}}=40$ мм; 3 – конус, $d_{\text{ст}}=40$ мм; 4 – циліндр, $d_{\text{ст}}=40$ мм; 5 – V-подібний стабілізатор, $d_{\text{ст}}=40$ мм

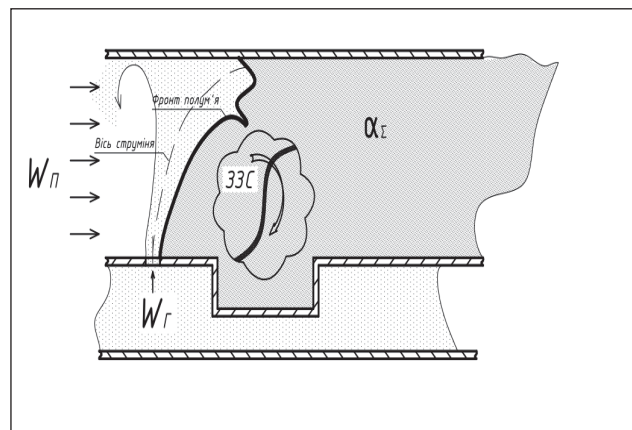


Рис. 2. Схема процесу стабілізації полум'я в СНС, $W_{\text{п}}$, $W_{\text{г}}$ – швидкість повітря та палива, відповідно, м/с

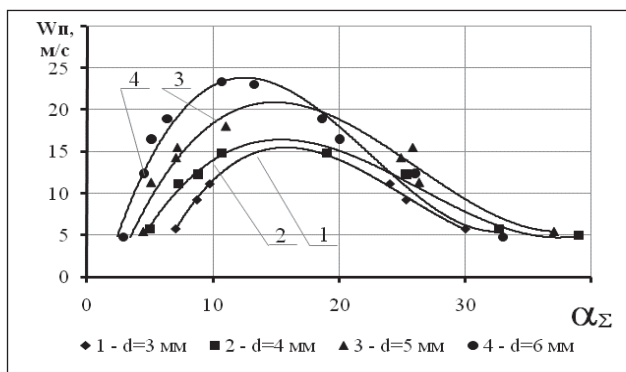


Рис. 3. Зривні характеристики одиночного газового пропан-бутанового струменю різного діаметру в умовах СНС з параметрами: відношення довжини до глибини ніші $L/H=40/10$, $L_1=10$ мм, відстань від зривної кромки ніші $L_1=10$ мм, висота повітряного каналу $H_k=72$ мм, α_{Σ} – сумарний коефіцієнт надлишку повітря в системі

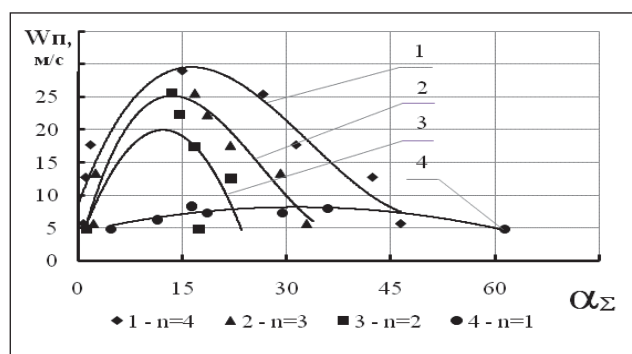


Рис. 4. Зривні характеристики СНС при переході від одиночного струменю ($n=1$) до системи струмин з параметрами: відношення довжини до глибини ніші $L/H=40/10$, відстань від зривної кромки ніші $L_1=10$ мм, висота повітряного каналу $H_k=72$ мм, діаметри газоподавальних отворів $d=2$ мм, крок розташування отворів, $S=4,6$

безпосередньо всередині струменя, вісі яких паралельні аеродинамічній осі самого струменя.

Стабілізатори полум'я у вигляді погано-обтічних тіл мають низку вагомих недоліків, основні з яких – підвищений гідравлічний опір потокові, неможливість ефективного регулювання процесу горіння під час зміни потужності КЗ за рахунок автономності циркуляційної течії за стабілізатором. Варто зазначити також неможливість застосування такої конструкції в умовах обладнання, працюючого при а, близьких до одиниці.

Ефективним способом стабілізації полум'я є перпендикулярна система струменів, яка в поєднанні з нішевою порожниною має низку переваг порівняно зі стабілізацією поганообтічних тіл. По-перше, плавним регулюванням фізичних розмірів так званого «струменевого екрана», а по-друге, автономністю процесів сумішоутворення в ЗЗС, що виникає в затіненій зоні екрану й зоні циркуляції в ніші на пускових режимах. Отже, використання СНС є на порядок більш ефективним засобом стабілізації факела порівняно з різноманітними варіантами просто струменевої стабілізації й дає змогу регулювати процес у більш широкому діапазоні теплових навантажень [13].

Тому одним із перспективних завдань стосовно пальників СНТ є вдосконалення геометричних характеристик СНС для забезпечення мінімізації тиску пального на пускових витратах пальника, а також установлення впливових факторів на коефіцієнт робочого регулювання системи, з метою розроблення рекомендацій щодо конструктивних схем пальників відповідно до використовуваного газоподібного палива.

Постановка завдання. Мета статті – виконати огляд основних схем стабілізації полум'я промислового газопальникового обладнання; подати основні їх переваги та недоліки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Схема стабілізації факела в досліджуваній системі наведена на рис. 2.

У роботі досліджено режими стабілізації полум'я одиночним струменем, розміщеним перед нішевою порожниною. Результати подано на рис. 3.

Результати експерименту показали розширення меж сталого горіння в СНС з одним струменем під час збільшення його діаметра. Значення коефіцієнта α в цьому випадку далекі від стехіометричних, оскільки значна частина повітря проходить транзитом у каналі, не беручи участі в процесі горіння, тому в досліджуваних умовах максимум характеристики зміщений із ділянки стехіометрії в бік збідненої суміші й дещо зміщується під час зменшення діаметра газового сопла. Варто зазначити, що зі збільшенням діаметра діапазон сталого горіння розширюється (площа під кривими запалення та згасання), що може бути пояснено збільшенням фізичного розміру зони циркуляції в затіненій частині струменя (рис. 3).

Очевидно, що поодинокий струмінь не дає змоги ефективно стабілізувати полум'я й межа багатого зриву за коефіцієнтом надлишку повітря становить значення 3–5 в умовах горіння пропану. На рис. 4 подано експериментальні результати дослідження стабілізаційних якостей СНС під час переходу від поодинокого струменя до системи струмин палива. Необхідно врахувати особливості взаємного впливу струменів у системі, які в загальному випадку визначаються відносним кроком розташування: так, у разі зменшення кроку до значень менше ніж 2,0 пограничні шари окремих струменів з'єднуються й система наближається за характеристиками до суцільного щільного струменя, а збільшення відносного кроку до значень 6,0 і більше призводить до мінімізації взаємодії струмин, і вони індивідуально розвиваються в потоці окисника [13].

Дослідження зривних процесів виконувалось у «відкрите» повітря без застосування вогнетривкої футерованої ділянки, фотознімки факела під час горіння поодинокого струменя подано на рис. 5.

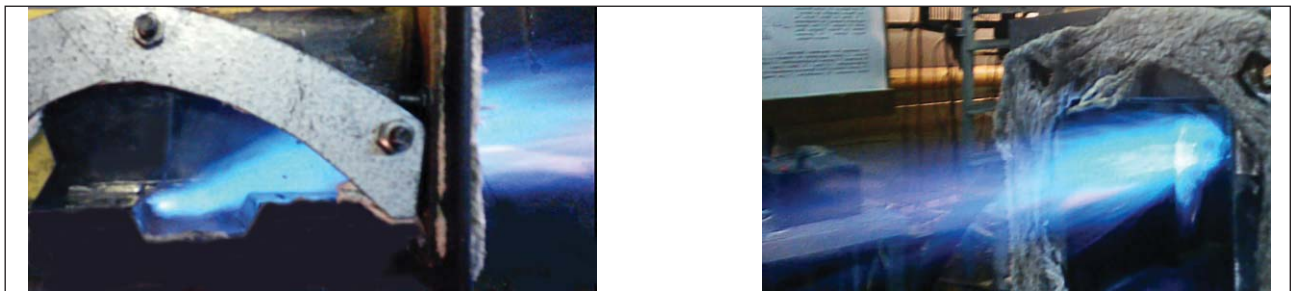


Рис. 5. Фотознімки горіння одиночного струменя в СНС при $L/H=40/10$, $L_1=10$ мм, висота повітряного каналу $H_k=72$ мм, $d=6$ мм

У роботі [2] отримано рекомендації стосовно найбільш прийняттого кроку розміщення струменів палива під час спалювання природного газу. Отже, фізично картина розвитку перпендикулярних струменів у набігаючому потоці окисника з погляду їх далекобійності під час варіювання кроку розташування за постійних значень швидкостей палива й окисника буде поводити себе так: у разі зменшення кроку далекобійність системи буде зменшуватись, а в разі збільшення, відповідно, збільшуватись.

Висновки. Виконано огляд найбільш розповсюджених схем стабілізації факела промислового газопальникового обладнання. Наведено основні їх переваги та недоліки. Основну увагу приділено огляду конструктивних схем пальників, що складаються зі стабілізаторів у вигляді поганообтічних тіл і схем із закрутою потоків окисника та палива. Приведено переваги застосування газодинамічної схеми стабілізації полум'я, яка працює

на основі взаємодії течії ближнього сліду за поганообтічними тілами й системи перпендикулярних струменів палива та реалізована в СНС.

Установлена залежність геометричних характеристик системи паливорозподілу СНС на межі сталого горіння. Визначено таке:

1) поодинокий струмінь під час збільшення його діаметра в умовах СНС здатний стабілізувати полум'я, але при цьому зона сталого горіння зміщена в сторону збіднених сумішей, що не задовольняє вимогам реального ВО, яке працює в діапазонах, близьких до стехіометричного складу паливних сумішей;

2) перехід від поодинокого струменю до системи струмин дає змогу розширити робочий діапазон СНС і максимально наближує ділянку сталого горіння до ділянки стехіометричних сумішей ($\alpha \rightarrow 1,0$); близькою за можливостями регулювання робочих навантажень розглядається система, що складається з 4 і більше струменів палива.

Список літератури:

1. Абдулін М.З. Применение струйно-нишевой технологии сжигания топлива в энергетических установках. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ». 2005. № 6. С. 130–144.
2. Абдулін М.З. Струйно-нишевая система смесеобразования и стабилизации пламени: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.04.01. Киев: КПИ, 1986. 20 с.
3. Джамал Абдель Карим Ибрагим. Особенности рабочего процесса модуля газогорелочного устройства с поперечной подачей струй газа: дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.04.01. Киев: КПИ, 1997. 20 с.
4. Абдулін М.З., Джамал І. Тепловий режим мікродифузійного газогорілочного пристрою. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 1997. С. 111–113.
5. Щетинков Е.С. Физика горения газов. Москва: Физматгиз, 1965. 740 с.
6. Раушенбах Б.В., Белый С.А., Беспалов И.В., Бородачев В.Я., Волынский М.С., Прудников А.Г. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. Москва: Машиностроение, 1964. 526 с.
7. Иванов Ю.В. Газогорелочные устройства. Москва: Недра, 1972. 276 с.
8. Винтовкин А.А., Ладыгичев М.Г. Современные горелочные устройства. Москва: Машиностроение-1, 2001. 487 с.
9. Христич В.А., Любчик Г.Н., Гавриш С.А. Расходные характеристики и оптимальные геометрические соотношения горелок струйного типа. Вестник КПИ. Серия «Теплоэнергетика». Киев, 1973. № 10. С. 31–34.
10. Бутовский Л.С., Грановская Е.А., Любчик Г.Н., Христич В.А. Исследование закономерности выгорания топлива за уголковыми и плоскими стабилизаторами пламени. Теория и практика сжигания газа: сборник. Ленинград: Недра, 1975. Вып. VI. С. 324–338.
11. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Москва: Машиностроение, 1984. 280 с.
12. Абрамович Г.Н., Гирштович Т.А. Теория турбулентных струй. Москва: Наука, 1984. 718 с.
13. Абдулін М.З., Сірій О.А. Принципи організації робочого процесу камер згорання. Авіаційно-космічна техніка та технологія. 2014. № 35. С. 22–25.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В СТРУЙНО-НИШЕВОЙ СИСТЕМЕ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

В статье выполнен обзор основных схем стабилизации пламени промышленного газогорелочного оборудования. Приведены основные их преимущества и недостатки. Показана перспективность применения в качестве стабилизатора комбинированной схемы на основе плохообтекаемого тела и газодинамического струйного экрана, которая реализована в струйно-нишевой системе (СНС). Представлены результаты исследования влияния основных геометрических параметров струйно-нишевой системы на устойчивость горения газообразного топлива. Приведены экспериментальные результаты исследования срывных границ («бедного» и «богатого» срыва пламени) в зависимости от конфигурации струйно-нишевой системы.

Ключевые слова: струйно-нишевый стабилизатор пламени, «бедный» и «богатый» срыв пламени, параметры топливоподачи.

STABILITY ANALYSIS OF COMBUSTION ACTION IN THE JET-NICHE SYSTEM OF BURNING FUEL

The overview of the main schemes of stabilization the flame industrial equipment is shown. The main advantages and disadvantages are presented. The prospect of using as a stabilizer of a combined scheme on the basis of a poorly polluting body and a gas-dynamic jet screen, which is implemented in the jet-niche system, are presented. The results of the studying of the influence of the main geometric parameters of the JNS on the constancy of combustion of gaseous fuel are reveal in the article. Experimental results of the research of the gap (“poor” and “rich” flame failure) are investigated, depending on the configuration of the JNS.

Key words: jet niche flame stabilizer, poor and rich flame failure, fuel distribution parameters.