

Сірий О.А.

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

Баранюк О.В.

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

Кобилянська О.О.

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

CFD МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІНУ ТА ГІДРОДИНАМІКИ В СТРУМІНЕВО-НІШЕВІЙ СИСТЕМІ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА

У роботі наведено результати дослідження процесу спалювання газу у струменево-нішевому стабілізаторі полум'я (СНС). Він є основним елементом універсальних промислових пальникових пристроїв, які можуть ефективно застосовуватися у складі широкої номенклатури вогнетехнічного обладнання.

Об'єктом дослідження роботи є процеси гідродинаміки, теплообміну та горіння в СНС. Предметом дослідження – чисельна модель процесу паливорозподілу у стабілізаторі, який реалізовується крутими перпендикулярними до потоку окислювача струменями однорядовою системою отворів.

Моделювання проводилось із застосуванням пакету прикладних програм обчислювальної гідродинаміки Ansys-Fluent. Обчислювальна область є прямокутним каналом із нішевою порожниною на боковій стінці, виконаною у формі трапеції. Перед нішею (за потоком повітря) розміщено один ряд газових отворів. Математична модель досліджуваного процесу містить системи диференціальних рівнянь руху, неперервності та переносу *i*-го компонента суміші і розв'язується за допомогою чисельних методів у середовищі Ansys-Fluent.

Результати досліджень представлені у вигляді полів температур, концентрацій основних компонентів реакції, осереднених швидкостей і їх пульсацій. В якості визначального розміру для числа Рейнольдса використано еквівалентний діаметр каналу пальника. Аналіз отриманих результатів показує, що в нішевій порожнині під струменями газового потоку утворюється область циркуляції. Основною рисою процесів сумішеутворення в зоні стабілізації СНС є їх автотемпературність. Тобто зі зміною швидкостей потоків окисника та палива концентрація пальної суміші змінюється несуттєво. Результати дослідження свідчать про те, що однорядова система паливорозподілу здатна забезпечити необхідний рівень концентрації пальної суміші та стабільну контрольовану аеродинамічну структуру потоку в області стабілізації процесу згорання в широкому діапазоні зміни режимних і геометричних параметрів системи.

Ключові слова: струменево-нішева система, оксиди азоту, математичне моделювання, концентрація, метан.

Постановка проблеми. Нині проблема збереження ефективності роботи вогнетехнічного обладнання (ВО) на змінних режимах його експлуатації є важливою й актуальною. Одним зі шляхів її вирішення є проведення його модернізації з упрощенням сучасного паливовикористовуючого обладнання. Визначальним напрямом у цій ситуації є орієнтація на вітчизняні технології, які вигідно відрізняються від імпорتنих аналогів за рахунок кращої адаптованості до ВО, більш сприятливою ціною політикою вітчизняних виробників [1].

Поряд із проблемами, пов'язаними з необхідністю пошуку альтернативних палив та економії

дефіцитних енергоресурсів, до паливовикористовуючого обладнання висуваються вимоги стосовно розширення меж потужності за рахунок зниження пускових тисків палива, при збереженні нормативних показників щодо емісійних характеристик, а також ефективності вигорання палива. Тому розуміння закономірностей утворення шкідливих речовин і можливість прогнозування їх емісії при зміні співвідношення витрат палива і окисника в суміші є одними з основних питань забезпечення норм охорони навколишнього середовища.

Пальниковий пристрій (ПП) здебільшого визначає ефективність роботи ВО та рівень

концентрації шкідливих речовин у відхідних газах. З метою зниження викидів шкідливих речовин розробляються пальники складної конструкції зі збільшенням числа зон горіння, кожна з яких оптимізується на певний режим роботи. Встановлено, що тільки у вузькому діапазоні температур (1650–1900 К) можна одночасно домогтися необхідних рівнів викидів NO_x і CO [2].

З огляду на неоднозначність впливу на робочий процес ВО таких основних факторів, як тиск у камері згоряння, температура та вміст кисню в окиснику, теплонавантаження робочого об'єму та коефіцієнт надлишку повітря, поведінка емісійних характеристик ВО потребує досконалого дослідження та більш глибокого аналізу. Використання методів інтенсифікації процесу сумішоутворення та реалізації мікродифузійного спалювання палива є одним із ефективних факторів впливу на емісію токсичних окислів азоту [3].

Реалізація дифузійно-кінетичного (мікродифузійного) механізму спалювання газу ВО досягається, наприклад, упровадженням струменево-нішевої технології (СНТ), розробленій на основі досліджень, які проводяться в Лабораторії горіння ТЕФ КПІ ім. Ігоря Сікорського. СНТ є універсальною технологією спалювання газоподібного палива, впровадженням у промисловість якої і подальшим вивченням її особливостей займається ТОВ «Виробниче об'єднання «Струменево-нішева технологія» (м. Київ) [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині проведено модернізацію значної кількості ВО України та зарубіжжя. Вже модернізовано об'єкти міських тепломереж Житомира, Луганська, Алчевська, Івано-Франківська (рис. 1).

Аналіз робіт іноземних авторів свідчить, що з 2000 року значна кількість науково-дослідних робіт була виконана за допомогою комп'ютерного моделювання. Автори доводять, що воно дозволяє коректно вивчити режими роботи й оптимізувати як проєктоване, так і реконструйоване енергетичне обладнання. Слід пам'ятати, що одночасне використання комп'ютерного моделювання і фізичного експерименту дає можливість отримати найбільш повну й достовірну інформацію про предмет дослідження. При цьому суттєво скорочуються затрати на проведення експериментальних і дослідних робіт [5].

За тематикою роботи в доступній літературі є статті, пов'язані з дослідженням тепло- і масообміну при спалюванні вугілля в топках котельного агрегату. Наприклад у роботі [6] виконувалося чисельне моделювання концентрації NO_x у

топках котла при варіюванні розташування пальників. При цьому не було зазначено, для якого конкретно котла проводилось моделювання, не було проведено порівняння з експериментальними даними.

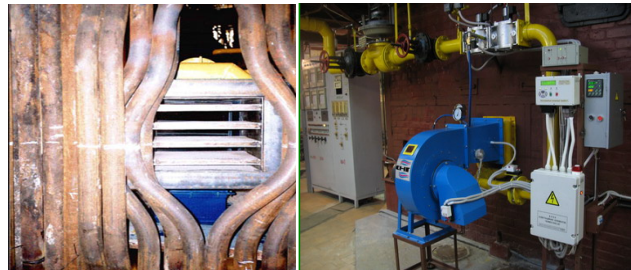


Рис. 1. Пальник струменево-нішевого типу

Досить ґрунтовною є робота [7], присвячена дослідженню топкових процесів у котлі БКЗ-420-140 Омської ТЕЦ-4 при спалюванні проєктного і альтернативного палива на основі математичного моделювання засобами прикладного програмного пакета FIRE 3D. Автори виконали аналіз отриманих результатів у тривимірній постановці для кожного виду палива і порівняли отримані дані з результатами розрахунку за нормативними документами. В якості палива у роботі використовувалося екібастузьке і кузнецьке вугілля. Тому роботу слід вважати прикладом виконання робіт такого складу. У роботах [8; 9] засобами того ж програмного комплексу автори досліджували вплив тангенційно розташованих пальників при спалюванні вугілля і природного газу. Ці та багато інших робіт виконані із застосуванням методів CFD-моделювання без використання якісних експериментальних даних.

Моделюванню робочих процесів у топці парового водотрубного котла ДЕ 10/14 з метою пошуку шляхів зниження окислів азоту присвячені роботи [10; 11]. Результати свідчать, що на утворення шкідливих викидів впливає надлишок повітря, пірометричний рівень у топковій камері, час перебування палива й окислювача в зоні високих температур. Використовувався пальник ГМГ-7 продуктивністю 728 $\text{м}^3/\text{год}$ природного газу, в якому була реалізована вихрова структура факелу з можливістю зміни його протяжності. Проте автори надають дані про викиди окислів азоту з топки котла. Недостатньо уваги приділяється тим процесам, які відбувається саме в пальнику.

Найбільш близькою до тематики статті є робота [12], де автори визначали екологічність спалювання біогазу у камері згоряння газової турбіни 100 kWe MGT. Автори наводять числові значення викидів NO_x , на які можна орієнтуватися

при аналізі результатів цієї роботи, особливо при спалюванні збіднених сумішей.

Виклад основного матеріалу дослідження. Мета роботи – поглибити уявлення про процеси утворення шкідливих оксидів при спалюванні газоподібних палив у струменево-нішевому стабілізаторі полум'я. У роботі [13] проведено числове дослідження процесів гідродинаміки та сумішоутворення пального та окисника у СНС. Виконано дослідження структури потоку суміші при використанні спеціально спрофільованої нішевої порожнини. Ця робота є розвитком попередніх досліджень, основним завданням якої є визначення у кількісному співвідношенні характеру розподілу окислів азоту за ПП і проведення зіставлення отриманих даних із результатами експериментальних досліджень.

Для розрахунку викидів NOx авторами була розроблена CFD-модель процесу, який відбувається в СНС (рис. 2). В загальному випадку вона містить геометричну модель СНС, створену на її основі скінченно-елементну модель із граничними умовами й математичним описом розрахункового процесу, реалізованого засобами ANSYS-Fluent.

У роботі виконані дослідження режимів стабілізації полум'я одиночним струменем, розміщеним перед нішевою порожниною. Результати наведені на рис. 2.

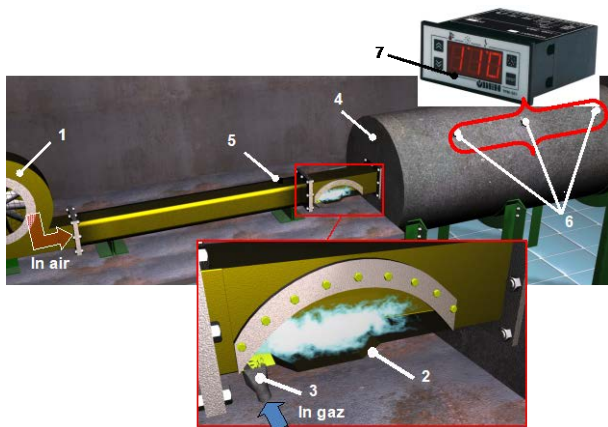
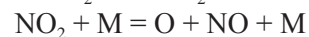
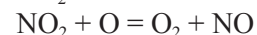
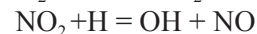
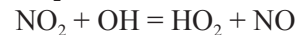
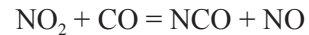


Рис. 2. Модель лабораторної установки для дослідження процесів горіння в СНС: 1 – вентилятор, 2 – СНС, 3 – система паливорозподілу, 4 – корпус вогнетривкої ділянки; 5 – відбори статичного та повного тисків; 6 – термопари; 7 – вимірювач сигналів термопар

Математична модель процесу, який досліджується, містить системи диференціальних рівнянь руху, нерозривності і переносу i-го компонента суміші та розв'язується чисельними методами в середовищі Ansys-Fluent. При моделюванні використовувалася стандартна методика прогно-

зування утворення NOx засобами цього програмного комплексу, було враховано такі основні механізми утворення оксидів азоту [14; 15]:

1) термічний механізм, який включає окислення N₂ відповідно до ланцюга механізму Зельдовича і взаємодії атомів N із радикалами OH, а також механізми N₂O, NO₂ і NO; механізм N₂O визначається групою реакцій, у яких N₂O є проміжною речовиною при утворенні NO. Механізм NO₂ призводить до утворення NO шляхом таких реакцій:



2) механізм NO визначається взаємодією «швидких» оксидів азоту, які утворюються при горінні палива у фронті полум'я в результаті взаємодії N₂ з радикалами CH і CH₂, які з'являються при руйнуванні складних молекул вуглеводневого палива.

Засобами ANSYS-Fluent розраховуються рівні термічних і швидких NOx. Модель враховує турбулентно-хімічну взаємодію компонентів і дозволяє обчислювати рівні NOx з урахуванням впливу турбулентних пульсацій при осередненій за часом швидкості реакції. Для прогнозування концентрації радикала O, необхідного для прогнозування температурних NOx, використовується модель часткової рівноваги. Вуглецеве число палива (число атомів вуглецю у молекулі палива) позначається цифрою 1, а коефіцієнт еквівалентності (визначає співвідношення паливо-повітря відповідно до стехіометричних умов) обраний рівним 0,76. Ці параметри використовуються при розрахунку швидкості утворення NOx.

В якості алгоритму розв'язку був обраний алгоритм встановлення (Pressure Based Implicit). Розрахунок зроблений у стаціонарній постановці (Steady). Це припущення має на меті скорочення ресурсів і часу, який витрачається на розрахунок.

Теплофізичні властивості реагуючих компонентів (у цьому випадку повітря і метан) задавалися у вигляді поліноміальної залежності від значення температури. Для розглянутого класу задач високою обчислювальною ефективністю володіє Realisable k-ε модель турбулентності. Цю модель автори й використовували в якості розрахункової. В якості граничних умов на непроникних стінках задавалося умова рівності нулю всіх компонентів вектора швидкості, таким же чином задавалася й температура стінки. На вході в розрахункову

область задавалася масова витрата і температура (Massflow inlet), на виході – статичний тиск (Pressure outlet).

З метою визначення впливу на процес горіння й утворення NOx при обчисленні за допомогою CFD-моделі змінювався коефіцієнт надлишку повітря α . Швидкості потоків газу і повітря, необхідні для розрахунку цього коефіцієнта, наведені в таблиці 1. Там же містяться й експериментальні дані значень NOx, необхідні для верифікації CFD-моделі [14].

На рис. 3 зображено CFD-модель струменево-нішевого стабілізатора полум'я, який є об'єктом дослідження. Модель – комп'ютерна копія лабораторного стенду, на якому проводились експериментальні дослідження гідродинаміки, сумішоутворення і горіння у струменево-нішевій системі. На цьому ж стенді проводилось визначення концентрації NOx на виході з дослідної ділянки за допомогою газоаналізатора Testo 330-1 LL.

До складу лабораторного стенду входить низьконапірний вентилятор, який подає повітря в ізотермічний канал квадратного перерізу з розміром стінки 70 мм. Канал виконаний довжиною 700 мм з огляду на необхідність формування профілю швидкості потоку перед стабілізатором. Газорозподіл виконується через один ряд паливних отворів (7 отворів діаметром 3 мм), через які перпендикулярно у потік окисника подається природний газ. У СНС відбувається сумішеутворення та стабілізація процесу горіння, догорання палива завершується у жаровій трубі. Процес горіння характеризується формуванням просторово розвиненого і протяжного факела, довжина і конфігурація якого змінюється залежно від співвідношення витрат палива і окислювача. На виході із жарової труби горючі гази направляються у витяжний канал [13].

Скінченно-елементна сітка моделі враховує розвиток примежового шару на поверхнях стінок струменево-нішевого стабілізатора полум'я і жарової труби. Область поза примежовим шаром моделювалася за допомогою нерівномірної тетраедричної сітки. При цьому скошеність (Skewness) не перевищувала 0,8, а співвідношення сторін (AspectRatio) кінцевих елементів – 40. Для збіль-

шення швидкості розрахунку модель була поділена на дві окремі розрахункові області. Одна з них містить попередньо включену стабілізуючу ділянку (рис. 3а), а друга – струменево-нішеву систему та жарову трубу (рис. 3б).

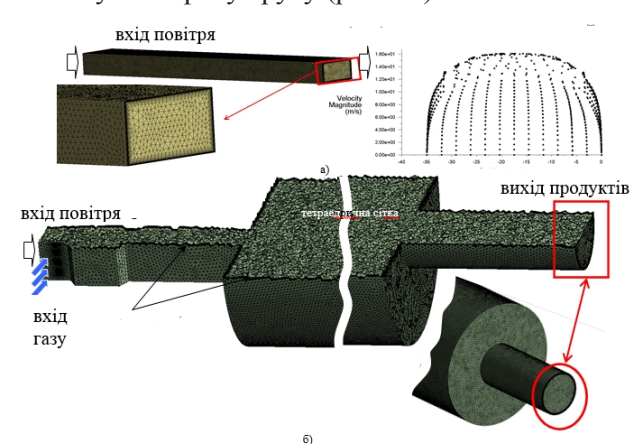


Рис. 3. Скінченно-елементна сітка стабілізуючої ділянки (а) та СНС із вогнетривкою ділянкою (б)

Для візуалізації результатів досліджень процесу горіння в СНС використовувалися значення середніх швидкостей і температур суміші та розподілу окислів азоту. Також наведена візуалізація розповсюдження метану в ніші і за пальником. Аеродинамічна структура потоків в області стабілізації процесу горіння наведена на (рис. 4). Збільшення швидкості руху струменів метану призводить до інтенсивного перемішування суміші за рахунок турбулізації відривного шару. Крім того, в нішах і кавернах, які омиваються потоком при великих числах Рейнольдса, спостерігається інтенсивна циркуляційна течія [16].

Слід зазначити, що експериментальна візуалізація обтікання потоком нішевої порожнини виконувалася тільки за умов ізотермічних продувок. Далі наведено гідродинамічну картину течії за умов хімічного реагування компонентів горіння. Результати на рис. 4а свідчать, що поблизу передньої кромки ніші по ходу потоку можна спостерігати вихор, який займає 1/4 її площі. При зменшенні швидкості метану (рис. 4б) значно зменшується інтенсивність перемішування потоку в ніші. Про це свідчить наявність значно меншого, порівняно з попереднім випадком, вихору.

Таблиця 1

Експериментальні значення концентрацій NOx на виході із жарової труби [13]

α	1,12	1,27	1,62	2,00	2,62
w_{O_2} , м/с	61,5	56	40,5	32	20
w_{H_2} , м/с	13,2	13,7	12,6	12,2	13,9
NOx, ppm	45	43	30	11	1

Від аеродинамічної структури потоку залежить розподіл компонентів, які беруть участь у реакції горіння. Як свідчать рис. 5 і 6, масова частка метану в перерізі пальника і в ніші залежить від швидкостей реагуючих потоків. Так, для співвідношення швидкостей метан-повітря, що відповідає коефіцієнту надлишку повітря $\alpha = 3,62$ (табл. 1) спостерігається наявність у ніші одного вихору поблизу передньої кромки ніші по ходу потоку. При цьому потік «притискає» метан до ніші (рис. 5а). У випадку, коли швидкість струменів палива сягає 61,5 м/с за швидкості потоку повітря 13,2 м/с ($\alpha = 1,12$) картина течії змінюється – лінії току струменя метану практично не деформуються (рис. 5б). Потік метану рухається паралельно стінкам пальника, а в ніші створюються умови для інтенсивного перемішування суміші.

Про інтенсивне перемішування потоку поблизу передньої кромки ніші свідчить також рис. 6. У випадку, коли коефіцієнт надлишку повітря становить 1,12, поблизу передньої кромки ніші знаходиться область площею 1/2 площі ніші, в якій спостерігається наявність від 1 до 6% кисню (рис. 6а). Зі зменшенням швидкості метану область у перетині, який розглядається, зменшується, а при $\alpha = 3,62$ – вироджується (рис. 6б).

Результати підтверджують, що ніша в СНС є зоною активного горіння. Займання палива і стабілізація факелу відбувається саме в ніші, і далі полум'я розповсюджується вглиб за потоком. Протяжність розповсюдження факелу залежить від співвідношення швидкостей метан-повітря (рис. 7).

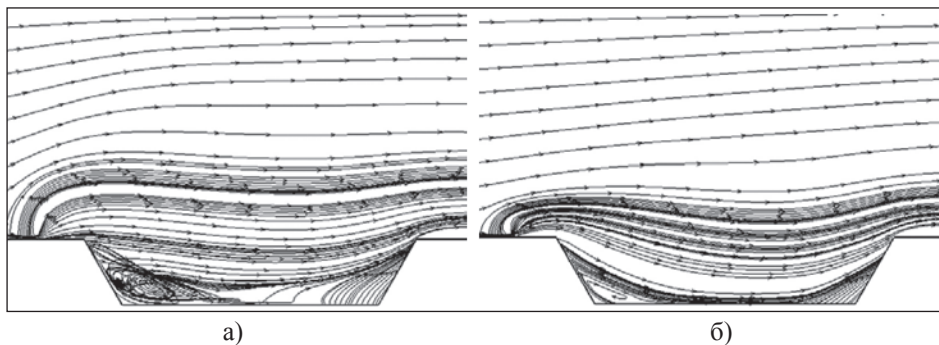


Рис. 4. Траскторії руху частинок суміші в зоні стабілізації полум'я при: а – $\alpha = 1,12$; б – $\alpha = 3,62$

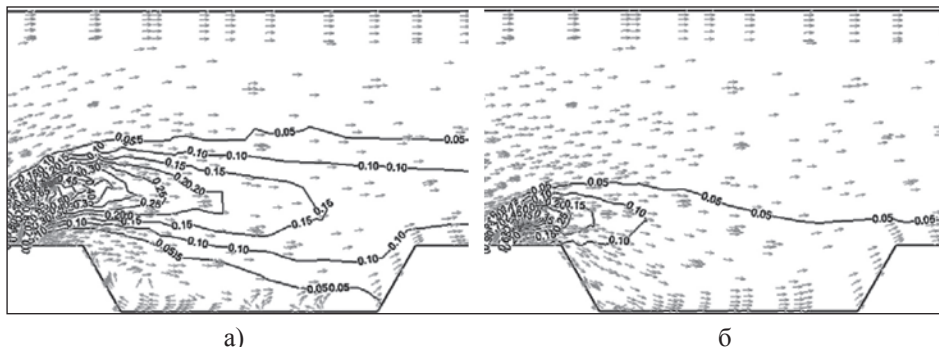


Рис. 5. Масова частка метану в зоні стабілізації полум'я при: а – $\alpha = 1,12$; б – $\alpha = 3,62$

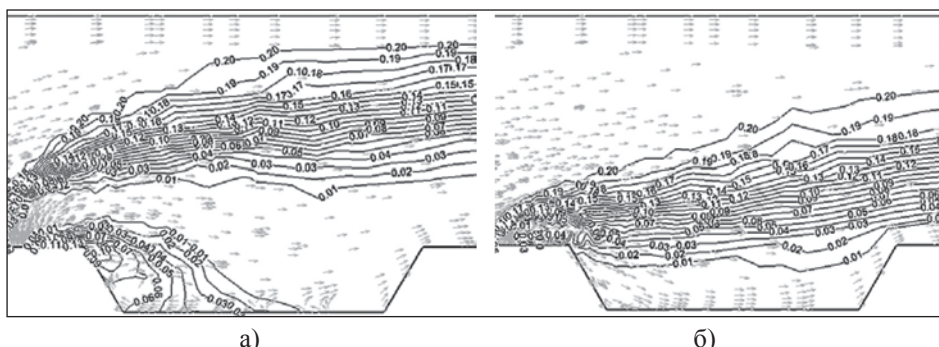


Рис. 6. Масова частка кисню в зоні стабілізації полум'я при: а – $\alpha = 1,12$; б – $\alpha = 3,62$

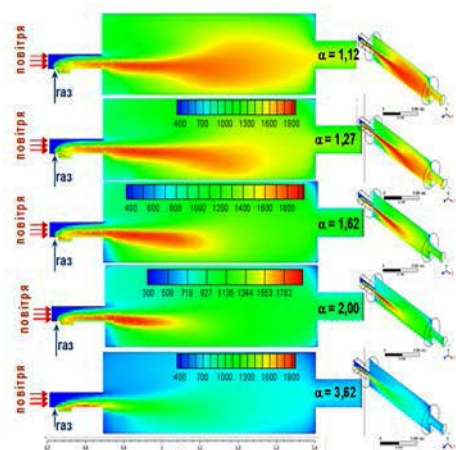


Рис. 7. Розподіл температур потоку у поздовжньому перерізі моделі

Як свідчить рис. 7, збільшення коефіцієнту надлишку повітря суттєво скорочує довжину факелу. Експериментальні вимірювання температури суміші вздовж жарової труби свідчать, що рівень температур не перевищує 1220°C для $\alpha = 1,12$ і 860°C для $\alpha = 1,12$. Розрахунки за допомогою CFD-моделі показують, що при $\alpha = 1,12$ рівень температур у центрі жарової труби сягає 1320°C, а для $\alpha = 3,62$ – 720°C. Тобто відхилення даних CFD-моделювання від експериментальних не перевищують 10%. Приведені результати дозволяють провести аналіз емісії окислів азоту з точки зору термічного механізму їх утворення (рис. 8).

Розподіл утворення NOx у палинковому пристрої і жаровій трубі наведено у вигляді кількості частин на мільйон (промиле) – NO [ppm]. NO [ppm] у цій роботі обчислювалося за допомогою такого рівняння:

$$NO \text{ ppm} = \frac{No \text{ mole fraction} \times 10^6}{1 - H_2O \text{ mole fraction}}, \quad (1)$$

Розподіли мольної концентрації окислів азоту і водяної пари, які включені у залежність (1), обчислювалися засобами ANSYS-Fluent. Отриманий завдяки розрахунку за (1) розподіл утворення NOx наведений на рис. 8. Результати свідчать, що зі збільшенням коефіцієнта надлишку повітря генерація викиду окислів азоту пригнічується. Для $\alpha = 1,62, 2,00, 3,62$ максимум викидів спостерігається в зонах із високими температурами, що не суперечить існуючим уявленням про «термічний» характер розповсюдження окислів азоту. Для досліджених випадків, коли коефіцієнт надлишку повітря знаходиться в діапазоні 1,1–1,2, максимум інтенсивності генерації окислів азоту зміщується

в кінець факелу. Це можна пояснити збільшенням часу перебування молекул окислювача у високо-температурній зоні.

Характер розподілу NOx здебільшого формується гідродинамікою потоку пального та окисника у дослідній ділянці. Так, вільний кисень повітря, який не взаємодіє з горючими компонентами палива, транспортується в основному у прошарку повітря над зоною паливорозподілу, тому безпосередньо починає взаємодіяти з азотом далі за потоком по мірі протікання процесу і зміщується до хвостової частини футерованої ділянки. Для того, щоб була можливість порівняти експериментальні дані з даними розрахунку за допомогою CFD-моделі, останні необхідно осереднити по площі вихідного перерізу. Процедура осереднення по площі теплофізичних параметрів в ANSYS-Fluent організована таким чином:

$$\overline{[NOx]_{ppm}} = \frac{1}{A} \int [NOx]_{ppm} dA, \quad (2)$$

де A – площа перерізу чарунки m^2 , $[NOx]_{ppm}$ – значення викидів окислу азоту, обчислені в одиницях вимірювання ppm за допомогою функції користувача в ANSYS-Fluent.

Отримані шляхом розрахунку за допомогою залежності (1) дані CFD-моделювання порівнювалися з експериментальними даними [13] на рис. 9а. Аналіз наведених результатів свідчить, що порівняно з даними експериментальної роботи [13], розроблена CFD-модель досить точно прогнозує поведінку окислів азоту.

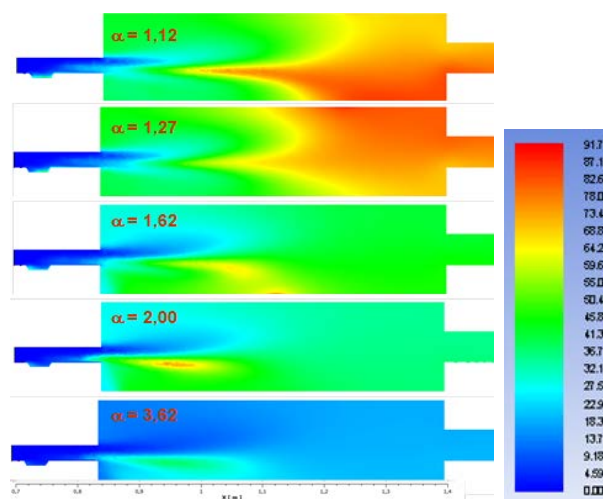


Рис. 8. Поле концентрації окислів азоту в центральному перетині дослідної ділянки

На рис. 9б також наведена залежність $NOx = f(\alpha)$ як для експериментальних даних [3], так і для даних CFD-моделювання. Рис. 9б

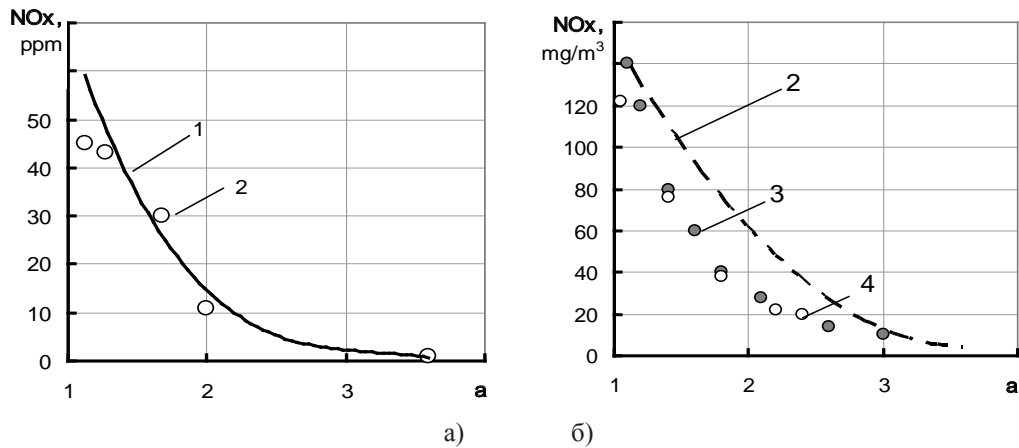


Рис. 9. Верифікація числового експерименту щодо емісії NOx: а – порівняння чисельних та експериментальних результатів; б – порівняння СНС із паливними трубчастого типу конструкції КПП; 1 – дані CFD-моделювання, 2 – експериментальні дослідження СНС [13], 3 – ТМД; 4 – ТМДН [3]

наведено з метою порівняння екологічності СНС із паливником – конструкції КПП на основі трубчастої технології спалювання газу, яка розроблена авторами [3]. Загалом наведені типи стабілізаторів полум'я мають в основі подібний принцип стабілізації факелу, який реалізовано шляхом взаємодії пальної суміші з погано обтічним тілом, але з певними відмінностями. Основна різниця полягає в тому, що у трубчастих модулях стабілізація полум'я відбувається у тороїдальному вихорі при виході потоку повітря у канал, який розширюється, а в СНС – у каверні на стінці каналу. Крім того, наведені на рис. 9б результати стосуються трубчастих модулів, у яких паливо вводиться безпосередньо у зону вихороутворення, тобто зону з підвищеним рівнем турбулізації потоку, тоді як у СНС струмені палива безпосередньо не взаємодіють із вихровою структурою у нішевій порожнині.

На рис. 9б цифрою «3» позначено рівень викидів азоту на виході з модуля дифузійного типу без внутрішньої вставки (тип ТМД), а цифрою «4» – ті ж дані для модуля дифузійного типу з внутрішньою вставкою (тип ТМДН). Аналіз рис. 9б свідчить, що характер залежності $NO_x = f(\alpha)$ для СНС загалом співпадає з даними, наведеними в літературі, проте на межі обраного діапазону α значення NO_x для СНС і ТМД співпадають повністю, а в середині обраного діапазону α концентрація NO_x майже на 40% є нижчою. Така різниця пояснюється відмінностями організації процесу сумішоутворення у стабілізаторах і додатковою інтенсифікацією процесів переносу при введенні палива в зону вихрової стабілізації палива, різними умовами проведення вимірювань (об'єм камери згоряння, питома тепло напруга робочого об'єму). Таким чином, було підтверджено важливість мак-

симальної гомогенізації пальної суміші з точки зору мінімізації утворення окислів азоту у продуктах спалювання.

Висновки. Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити такі висновки:

1) проведені комп'ютерні розрахунки процесів гідродинаміки потоку суміші за умови проходження хімічного реагування загалом задовільно узгоджуються з існуючими уявленнями щодо картини взаємодії струменевого «екрану» палива з потоком окисника за умови проходження горіння потоку пальної суміші;

2) результати моделювання процесів сумішоутворення в СНС підтверджують наявність горючого концентраційного поля в зоні нішевої порожнини при зміні режимних параметрів системи у широкому діапазоні їх значень;

3) запропонована математична модель утворення шкідливих NO_x забезпечує достатню для подальших промислових досліджень точність визначення впливу геометричних і режимних параметрів системи на рівень викидів при узгодженні результатів розрахунків з експериментальними у межах похибки не більше 10%;

4) наведені числові результати підтверджують ефективність досліджуваного стабілізатора полум'я щодо забезпечення сталості горіння без зривів полум'я в широкому діапазоні робочих навантажень системи;

5) підтверджено необхідність інтенсифікації процесів переносу та гомогенізації пальної суміші з точки зору зменшення концентрації окислів азоту у відхідних газах;

6) дані CFD моделювання можуть бути використані при проектуванні енерго-екологічного газопальникового обладнання на основі СНТ.

Список літератури:

1. Абдулин М.З. Применение струйно-нишевой технологии сжигания топлива в энергетических установках. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. 2005, № 6, С. 130–144.
2. Baukal C.E. Industrial Burners Handbook. Charles E. Baukal. London, New-York, Washington D. C. CRC Press, 2003. 221 p.
3. Любчик Г.Н., Говдяк Р.М., Микулин Г.А., Зарицкий А.А. Экологический аудит газогорелочных устройств на основе применения метода базовых характеристик эмиссии NOx и CO. Экотехнологии и ресурсосбережение. 2007, № 4, С. 64–70.
4. Абдулин М.З., Дворцин Г.Р., Тепляков И.Б., Строкин В.Н. Горелочное устройство на основе саморегулирующейся системы смесеобразования и стабилизации пламени. Труды IV международной научно-технической конференции «Комплексная автоматизация промышленности». 1990, С. 12–16.
5. Кобзарь С.Г., Халатов А.А. Снижение выбросов оксидов азота в газовых котлах методом рециркуляции дымовых газов. Пром. теплотехника. 2009, Т. 31, № 4, С. 5–11.
6. N. Chernetskaya, M. Chernetskiy and A. Zhukov. Effect of the reburning zone stoichiometry on the NOx concentration at the three-Stage combustion of pulverized coal. doi: 10.1051/mateconf/2016727201022.
7. Гиль А.В., Заворин А.С., Красильников С.В., Обухов С.В., Старченко А.В. Исследование аэродинамики и горения в топке котла БКЗ-420-140 применительно к вариантам замещения проектного топлива. Известия Томского политехнического университета. 2007, Т. 310, № 1, С. 175–181.
8. Заворин А.С., Бетхер Т.М., Лебедев Б.В. Анализ топочной среды котла БКЗ-210-140 на основе численного моделирования. Известия Томского политехнического университета. 2011, Т. 319, № 4, С. 50–55.
9. Тайлашева Т.С. Моделирование топочной среды в котле типа ДКВР при сжигании природного газа. Известия Томского политехнического университета. 2009, Т. 34, № 4, С. 42–47.
10. Redko A.A., Davidenko A.V., Pavlovskiy S.V., Kulikova N.V., Pavlovskaya A.A., Redko I.A. Simulation of Working Processes in the Water-Tube Boiler Furnace with the Purpose of Reducing Emissions of Nitrogen Oxides. Problemele energeticii regionale. 2017. Vol. 1(33), P. 54–65.
11. Редько А.О., Давіденко А.В., Павловський С.В., Костюк В.Є. Моделирование аэродинамических процессов водотрубного парового котла ДКВР (ДЕ)-10/14. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». 2016, № 44(1216), С. 54–65. DOI: 10.20998/2411-0558.2016.44.07.
12. Vincenza Liguori, Numerical investigation: Performances of a standard biogas in a 100 kWe MGT. Energy Reports, 2(2016) P. 99–106.
13. Сірий О.А. Вплив параметрів струменево-нішевої системи на робочий процес пальникових пристроїв: Дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / НТУУ «ХПІ». Київ, 2016. 199 с.
14. Zhao D., Yamashita H., Kitagava K., Arai N., Furuhashi T. Behavior and effect on NOx formation of OH radical in methane-air diffusion flame with steam addition. Combustion and Flame. 2002, vol. 130, P. 352.
15. Матвеев С.Г., Лукачев С.В., Орлов М.Ю., Чечет И.В., Красовская Ю.В. Расчет образования CO и NOx в камерах сгорания ГТД. Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева, 2012. 41 с.
16. Абдулин М.З. Применение струйно-нишевой технологии сжигания топлива в энергетических установках. Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. 2005. № 6. С. 130–144.

Siryi O.A., Baranyuk O.V., Kobylanska O.O. CFD SIMULATION OF HEAT EXCHANGE AND HYDRODYNAMICS IN THE JET-NICHE SYSTEM OF FUEL BURNING

The main issue of the work is studying effects of natural gas combustion in the jet-niche flame stabilizer (JNS). JNS is the main part of universal industrial burning devices implemented on many types of gas burning systems. The main object of the study is hydrodynamic parameters of the flow in the niche flame stabilizer based on the JNS. As a subject of research was a numerical model of gas distribution of fuel by circular jets fed perpendicularly to the carrying oxidizer stream through a single-row system of holes.

The simulation was performed with using of numerical methods with Ansys-Fluent application software. The computational domain represented a channel with a trapezium-shape niche in front of which (along the air flow) there is one row of gas holes. The mathematical model of the process under study contains systems of differential equations of motion, continuity and transfer of the i-th component of the mixture and is solved by means of numerical methods in the Ansys-Fluent environment.

The research results are presented in the form of temperature distributions, components of the reacting data, average velocities and their pulsations in the central part of the niche cavity. The equivalent diameter of

the burner channel was chosen as the determining size in the Reynolds number. The flow velocity in the center of the burner channel was chosen as the determining speed.

The analysis of the results shows that a circulation flow is formed in the niche cavity under the gas flow jets. This flow influences the mixing process in the niche cavity as follows: with an increase of the gas outflow velocity, the mixture formation processes in the flame stabilization zone are self-similar. In this manner, the average level of gas concentration in the niche volume is almost unchanged with changing operational modes of object. The research conclusion indicates that a single-row supply is capable of providing the necessary combustible level of concentrations of the fuel mixture and a stable controlled aerodynamic structure of the flow in the field of stabilization of the combustion process in a wide range of studies.

Key words: *jet niche system, nitrogen oxides, mathematical modeling, concentration, methane.*