

Сірий О.А.

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 ПРОЦЕСУ СПАЛЮВАННЯ СУМІШІ МЕТАН-ВОДЕНЬ В СТРУМЕНЕВО-НІШЕВОМУ СТАБІЛІЗАТОРІ ПОЛУМ'Я

Розвиток водневих технологій індустріально розвиненими країнами світу та поступове залучення їх в енергетичну галузь виокремлює цей напрям як перспективний у контексті поступового переходу до безвуглецевих технологій. Використання водню в якості часткової заміни традиційного природного газу паливоспалюючим устаткуванням може бути першим кроком на шляху забезпечення діючих та майбутніх екологічних норм. Слід зазначити, що визначальним фактором щодо емісії шкідливих речовин є технологія спалювання. В роботі авторами розглянуто головні етапи побудови CFD-моделі процесу згоряння суміші палив метан-водень в струменево-нішевій системі (СНС) стабілізації та спалювання палива. Наведено методику CFD-моделювання в програмному середовищі Ansys Fluent. Проведено аналіз отриманих результатів, а саме вплив геометричних та режимних параметрів стабілізатору на процес горіння при різних співвідношеннях концентрацій компонентів метан-водень. Показано вплив додавання водню на далекобійність та швидкість витікання струменів палива, необхідного для забезпечення робочого режиму пальника. За результатами математичного моделювання проаналізовано закономірності утворення оксидів азоту при зміні геометричних характеристик паливоподачі. Також визначено вплив зміни вмісту водню в об'ємі пальної суміші з метаном на концентрації NOx в продуктах спалювання. Встановлені закономірності гідродинаміки потоку в струменево-нішевій системі при варіюванні гідродинамічного параметра q для неізоtermічної течії. Представлено залежності для розрахунку емпіричного коефіцієнту, який трактує глибину проникнення струменів суміші метан-водень у потік окисника, що набігає. Надані рекомендації щодо визначення раціональних конструктивних параметрів паливорозподілу СНС.

Ключові слова: метано-воднева суміш, CFD-модель, ANSYS Fluent, струменево-нішева система, розподіл температур.

Постановка проблеми. В останні роки відбувається критичне загострення глобальних екологічних проблем, таких як кислотні опади та зміна клімату. Україна серед європейських держав має найвищий інтегральний показник негативних техногенних навантажень на навколишнє природне середовище практично на всій своїй території. Відомо, що одним з основних джерел забруднення оточуючого повітря є енергетика. І, хоча енергію можна одержувати більш екологічними шляхами, використовуючи відновлювані джерела (сонце, вітер, термальні води, деревина та відходи сільськогосподарського виробництва), необхідно усвідомлювати, що способу отримання енергії, який би зовсім не шкодив довкіллю, не існує.

Слідом за провідними європейськими країнами, які орієнтують енергетику у напрямі «без-

вуглецевих» технологій, Україна також тримає курс на зменшення шкідливих викидів в атмосферу [НПСВ 1]. Станом на 2021 рік виробництво електроенергії відновлюваними джерелами становить 9% [2]. Наразі деякі країни віддають перевагу водневим технологіям, як альтернативному виду палива. Одним з перспективних напрямів застосування водню є використання його в технологіях спалювання у якості домішки до основного палива з ціллю часткового заміщення традиційного природного газу об'єктами побутового призначення [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі, лідером у використанні водню є Велика Британія, де реалізовано проект, за яким сумішшю природний газ – водень будуть опалюватись житлові будинки та учбові заклади. Об'єм водню

в суміші складатиме 20% [3]. Також є досвід у використанні суміші метан-водень з вмістом H_2 від 20% до 48%. Відомо, що Європейські країни вже набули досвіду використання домішок водню як процесу декарбонізації продуктів згоряння. Так, при проведенні теоретичних розрахунків процесу горіння природного газу з вмістом метану 96%, де в якості окисника обрано повітря, було встановлено, що у продуктах реакції зменшується кількість діоксиду вуглецю CO_2 майже на 40% при співрозмірному вмісті водню у суміші. Загальне зниження продуктів спалювання становить у середньому 30%. Відбувається деяке підвищення теоретичної температури горіння, орієнтовно на 30 °С. Слід зазначити, що заміщення газу воднем призводить до зменшення теплоти згоряння. Так при 40,01%, Q_n^p становить 26,38 МДж/кг, що менше на 27% у порівнянні з природним газом без додавання H_2 [4].

Відомо, що теплотворна спроможність водню – становить 10,8 МДж/м³. Енергетична цінність водню у 3,3 рази менша, ніж метану та у 3,2 рази, ніж у природного газу [4]. У процесі застосування водню у котельних агрегатах необхідно дотримуватись особливих вимог техніки безпеки через його високу запалювальну здатність та велику швидкість розповсюдження полум'я. Треба зважати на високу проникаючу здатність водню, що зумовлює необхідність використання спеціальних матеріалів для його транспортування та зберігання.

До особливостей водню можна віднести високу дифузійну проникність та високі температури і швидкості горіння у порівнянні з природним газом, що дозволяє покращити сталість горіння факелу при високих надлишках повітря, тобто розширити межі «бідного» зриву полум'я. Але, при додаванні водню відбувається підвищення максимальних температур горіння, що негативно відзначиться на емісії шкідливих окислів азоту і це обов'язково також потрібно враховувати при

проведенні еколого-теплотехнічної модернізації газоспалюючого устаткування [5].

За результатами літературних джерел [4–6] можна прийти до висновку, що наразі доцільне застосування не тільки «блакитного» водню, який отримується паровою конверсією з метану, але й впровадження, так званого, «зеленого» водню, який утворюється при електролізі води за рахунок використання надлишкової енергії сонця або вітру. А додавання водню впливає не лише на зниження вуглецю, а й на ефективність паливоспалюючого обладнання.

Також, слід зазначити, що за результатами проведення модернізації існуючого обладнання доведено, що на ефективність зниження емісії окисидів азоту суттєвий вплив має технологія спалювання палива. З точки зору канонічних принципів мінімізації концентрацій NO_x таких як: попереднє сумішеутворення, стадійне горіння та прямоочна аеродинамічна схема течії окиснювача, перспективними розглядаються пальникові пристрої розроблені у КПІ ім. Ігоря Сікорського. Однією з таких перспективних розробок є Струменево-нішева технологія спалювання (СНТ) (рис. 1) [5].

Основні принципи, що покладені в основу технології, наступні: раціональний розподіл палива в потоці окисника; стійка регульована структура течії палива, окисника та продуктів згоряння; саморегульованість складу паливної суміші в зоні стабілізації факелу. Станом на 2022 рік на базі СНТ напрацьовано значний досвід енергоекологічної модернізації котельного обладнання потужністю 0,5...125 МВт [5].

Подальший розвиток досліджуваної технології пов'язаний з можливістю використання паливних газів альтернативних природному газу, тому наразі актуальним є дослідження емісійних показників струменево-нішевої системи, де в якості палива використовується суміш метан-водень.

Постановка завдання. Метою роботи є розширення уявлень про особливості процесів спа-

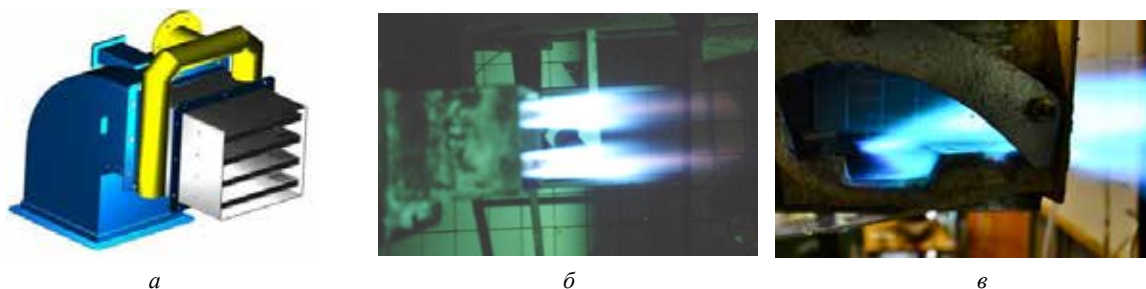


Рис. 1. Струменево-нішева технологія спалювання палива:
пальник (а), відкритий газовий факел (б), горіння в СНС (в)

лювання суміші метан-водень в струменево-нішевій системі стабілізації та спалювання палива шляхом CFD-моделювання досліджуваного явища в програмному середовищі Ansys Fluent. Основною задачею роботи є оцінка геометричних параметрів паливорозподілу СНС при додаванні до природного газу водню з точки зору реалізації процесу сталого горіння та забезпечення мінімально можливого рівня емісії шкідливих оксидів азоту. Виконання попередніх розрахунків з ціллю оцінки можливих режимів роботи пальників на базі СНС. Розробка рекомендацій щодо вибору геометричних і режимних параметрів при підготовці до проведення експериментальних досліджень на вогневому лабораторному стенді.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для дослідження процесу спалювання суміші авторами була розроблена CFD-модель процесу, який відбувається в СНС. 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.

Слід зазначити, що процес горіння у пальниках СНТ класифікується як мікрофакельний, турбулентний процес горіння попередньо неперемішаної суміші. Мікрофакельне горіння наразі зустрічається в багатьох технологіях спалювання палива. Цей тип згоряння характеризується складним математичним описом [7]. Турбулентний потік реагуючої суміші описується системою диференціальних рівнянь: руху, нерозривності і переносу і-го компонента суміші [8]. Розв'язок виконуватиметься чисельними методами в програмному середовищі Ansys-Fluent.

Емісія NO_x моделювалася з використанням стандартної методики прогнозування термічних

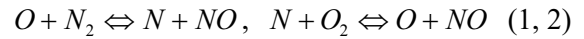
$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = \kappa_{f,1}[\text{O}][\text{N}_2] + \kappa_{f,2}[\text{N}][\text{O}_2] + \kappa_{f,3}[\text{N}][\text{OH}] - \kappa_{r,1}[\text{NO}][\text{N}] - \kappa_{r,2}[\text{NO}][\text{O}] - \kappa_{r,3}[\text{NO}][\text{H}] \quad (4),$$

де всі концентрації мають розмірність моль/м³.

Кінетика швидкості термічного утворення NO_x набагато повільніша, ніж швидкість основного окислення вуглеводнів, і тому більша частина теплових NO_x утворюється після завершення згоряння. Тому термічний процес утворення NO_x часто можна відокремити від основного механізму реакції горіння, а швидкість утворення NO_x можна розрахувати, припустивши рівновагу реакцій горіння. Використовуючи цей підхід, розрахунок швидкості теплового утворення NO_x значно спрощується.

Таким чином, при моделюванні було враховано тільки механізм Зельдовича [10]. Інші механізми

оксидів азоту засобами програмного комплексу Ansys Fluent. Так, утворення термічних NO_x визначалися набором залежних від температури хімічних реакцій, відомих як розширений механізм Зельдовича. Основні реакції утворення термічних NO_x з молекулярного азоту, є такими:



З рівняння (1) видно, що швидкість утворення NO буде зростати зі збільшенням концентрації кисню. Також термічне утворення NO сильно залежить від температури, але не залежить від типу палива. Насправді, виходячи з граничної швидкості, швидкість термічного утворення NO_x подвоюється з кожними 90К підвищення температури понад 2200 К.

Третя реакція сприяє утворенню теплових NO_x , особливо в умовах, близьких до стехіометричних, і в сумішах, багатих паливом:



Константи швидкості цих реакцій які використовуються в моделі NO_x , були обрані на основі оцінки Хенсона і Саліміана [9]), та мають вигляд:

$$\kappa_{f,1} = 1.8 \cdot 10^8 e^{-38370/T} \quad \kappa_{f,2} = 1.8 \cdot 10^4 e^{-4680/T}$$

$$\kappa_{f,3} = 7.1 \cdot 10^7 e^{-450/T}$$

$$\kappa_{r,1} = 3.8 \cdot 10^7 e^{-425/T} \quad \kappa_{r,2} = 3.81 \cdot 10^3 e^{-20820/T}$$

$$\kappa_{r,3} = 1.7 \cdot 10^8 e^{-24560/T}$$

У наведених вище виразах $\kappa_{f,1}$, $\kappa_{f,2}$, та $\kappa_{f,3}$ – константи швидкості прямих реакцій (1-3), відповідно, $\kappa_{r,1}$, $\kappa_{r,2}$, та $\kappa_{r,3}$ – відповідні зворотні константи швидкості. Усі ці константи швидкості мають розмірність м³/моль·с.

Чиста швидкість утворення NO в результаті реакцій у рівнянні (13) визначається як:

у розрахунку не застосовувалися з міркувань значного превалювання саме термічного механізму (наявність водню збільшує температури горіння) та спрощення математичної моделі процесу. На рис. 2 зображено 3D-модель струменево-нішевого стабілізатора полум'я, яка є об'єктом дослідження і вогнетривкої футерованої ділянки.

За алгоритм розрахунку був обраний неявний алгоритм встановлення (Pressure Based Implicit). Розрахунок робився в стаціонарній постановці (Steady). Це припущення зроблено задля скорочення ресурсів і часу, що витрачаються на розв'язок. За обчислювальну модель була обрана Realisable k-ε модель турбулентності.

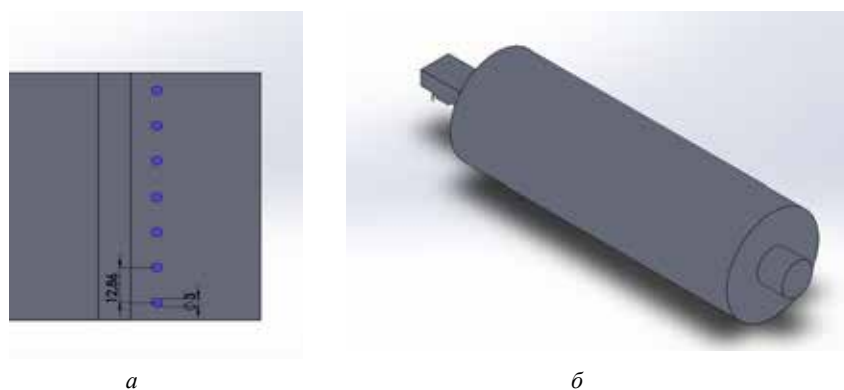


Рис. 2. 3D модель розрахункової області (а) струменево-нішевого стабілізатора полум'я (б)

У якості базової хімічної реакції процесу обрано двостадійне реагування метану і водню з киснем, де у продуктах реакції утворюється вуглекислий газ і вода у вигляді пари. Теплофізичні параметри кожного елемента реакції розраховані з бази Fluent. Процес горіння моделювався на базі підходу Eddy dissipation. В якості граничних умов на непроникних стінках задавалося умова рівності нулю всіх компонентів вектора швидкості. Температура стінки також задавалась рівною нулю. На вході в розрахункову область задавалась масова витрата і температура (Massflow inlet), на виході – статичний тиск (Pressure outlet). З метою визначення впливу на процес горіння при обчисленні різних співвідношень концентрацій паливних компонентів за допомогою CFD-моделі змінювався коефіцієнт надлишку повітря α .

Для візуалізації результатів досліджень процесу горіння в СНС використовувалися значення середніх швидкостей і температур суміші та розподілу окислів азоту. Слід зазначити, що у струменево-нішевій системі відбувається сумішеутворення та стабілізація процесу горіння, догорання палива завершується у жаровій трубці. Процес горіння характеризується формуванням просторово розвиненого і протяжного факела, де співвідношення витрат палива і окислювача значною мірою впливають на його довжину і конфігурацію. Для порівняння температурного поля продуктів згорання проведено чисельні розрахунки для чистого метану та метано-водневої суміші з об'ємним вмістом водню 10 %, 25 %, 50 %.

На рис. 3 зображено розподіл температур для різних співвідношень суміші метан-водень та для чистого метану при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha=1,1$. З результатів видно, що як для випадків з чистим метаном, так і для суміші метан-водень процес горіння починається безпосередньо в нішевій порожнині, що забезпечує стабіліза-

цію факелу не залежно від складу суміші. Також з наведених епюр видно, що водень сприяє певному підвищенню рівня температур у так званій транзитній зоні, тобто області де превалює потік окисника. Фактично, факел розповсюджується у найбільш «захоплену зону» футерованої ділянки, очевидно за рахунок високої реакційності водню. З тієї ж причини високої дифузійності водню, ділянка під факелом у розширеній частині футерованого каналу навпаки не заповнюється високонагрітими продуктами спалювання які утворюються в основному у зоні над факелом і до моменту потрапляння у зазначену зону значним чином заохолоджуються та майже не реагують. Розглянута картина вказує на значні відмінності у процесах спалювання розглянутих сумішей, тому для забезпечення сталого горіння можливо виникне необхідність певної корекції системи паливорозподілу.

При детальному розгляді гідродинамічної картини в зоні стабілізації факелу [4], виявилось, що картина в нішевій порожнині певним чином відрізняється від випадку спалювання чистого метану. Так, для випадку метано-водневої суміші стабілізація та горіння факелу, окрім горіння у нішевій порожнині у значній мірі забезпечується струминним «екраном» пальної суміші, і відбувається в області над нішею та частково розвивається далі у потоці реагуючої суміші. Така особливість пояснюється деяким збільшенням далекобійності струменів палива для забезпечення відповідного робочого режиму системи і визначається гідродинамічним параметром q , який являє собою відношення динамічних напорів палива і окисника [12]:

$$q = (\rho_e \cdot W_e^2) / (\rho_n \cdot W_n^2), \quad (5)$$

де ρ_r , ρ_n – густина пального газу і повітря відповідно, W_r і W_n – швидкість газу повітря відповідно.

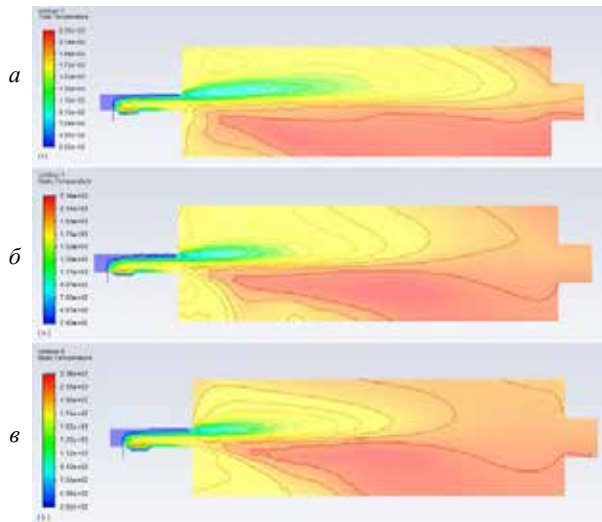


Рис. 3. Порівняння температурного поля продуктів згоряння при $\alpha = 1,1$, $s/d = 4,3$, $d = 3,0$ мм для співвідношення компонентів метан/водень а) 0/100 %, б) 25%/75 %, в) 50%/50 %

За розрахунками, значення гідродинамічного параметру для суміші паливних газів $q_{\text{сум}}$ становить 34, а для чистого метану – $q_{\text{мет}} = 28$. Таким чином, виникає необхідність збільшення швидкості витікання струменів палива необхідної для забезпечення робочого режиму пальника. Наведені значення параметрів q характерні при надлишку повітря 1,1, і в результаті збільшення відсотку вмісту водню збільшується опір потокові повітря, який набігає на стабілізатор (це тобто домашнє завдання для наступної публікації – порахувати ξ гідравлічний опір потоку в залежності від q , висоти каналу, і вмісту водню).

Для випадку $\alpha = 5,0$ зменшення далекобійності струменів палива призводить до збільшення транзиту повітря в області над горінням. Поля температур наочно демонструють різницю гідродинамічної картини потоку реагуючої суміші в області розвитку струменів над нішевою порожниною, що пояснюється збільшеною витратою суміші у порівнянні з чистим метановим паливом для забезпечення $\alpha = 5,0$. Так, значення гідродинамічного параметра для суміші $q_{\text{сум}}$ становить 1,66, у той час для чистого метану – $q_{\text{мет}} = 1,35$.

В цілому для усіх режимів подачі палива ($\alpha = 1,1$, $\alpha = 1,5$, $\alpha = 5,0$) і повітря забезпечувалась схожа тенденція до розподілу температур (середня температура у дослідній ділянці зростала при збільшенні відсотку водню).

На рисунку 4 представлено профілі температур у поперечних перетинах по довжині каналу, що орієнтовані по осі газоподавального отвору.

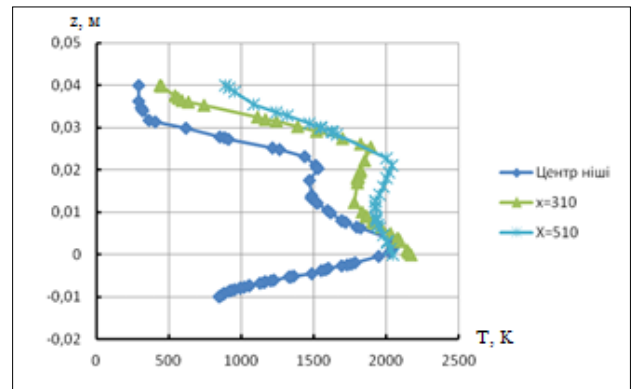


Рис. 4. Значення температур факелу метано-водневої суміші при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha=1,1$ у різних поперечних перетинах ділянки горіння

Графіки характеризуються екстремумами, що являють собою «піки» максимумів температур у корні факелу. У перетині, що відповідає центру ніші, таких піків два, нижчий характеризує профіль температур у зоні стабілізації факелу, а вищий (менший за абсолютним значенням) окреслює картину розвитку струменів палива у потоці окисника, що набігає перпендикулярно. Профілі на відстані 310 та 510 мм від початку досліджуваної ділянки повторюють загальну картину розвитку температурного поля і ілюструють положення осередку полум'я у факелі, що знаходиться приблизно по центру (у відношенні до вертикальної осі) каналу.

З [12] відомо про «термічний» характер розповсюдження окислів азоту, тобто максимум викидів спостерігатиметься в зонах із високими температурами.

З рисунку 5 видно, що число локальних точок утворення окислів азоту дещо підвищується з додаванням водню, внаслідок підвищення температур, що відповідає теоретичним основам формування термічних NO_x .

Так, при зміні домішки водню від 10 % до 25 % максимальне локальне значення емісії NO_x збільшується на 10 %, а при зміні домішки з 25 % до 50 % кількість викидів NO_x збільшується на 27 %. Характер розподілу окислів азоту здебільшого формується гідродинамікою потоку пального та окисника у дослідній ділянці. З результатів видно, що вільний кисень повітря безпосередньо починає взаємодіяти з азотом по мірі протікання процесу і здебільшого зміщується до хвостової частини футерованої ділянки. Звертає на себе увагу зона з підвищеною концентрацією NO_x в області під факелом, що пояснюється наявністю масштабної циркуляційної зони куди потрапляють

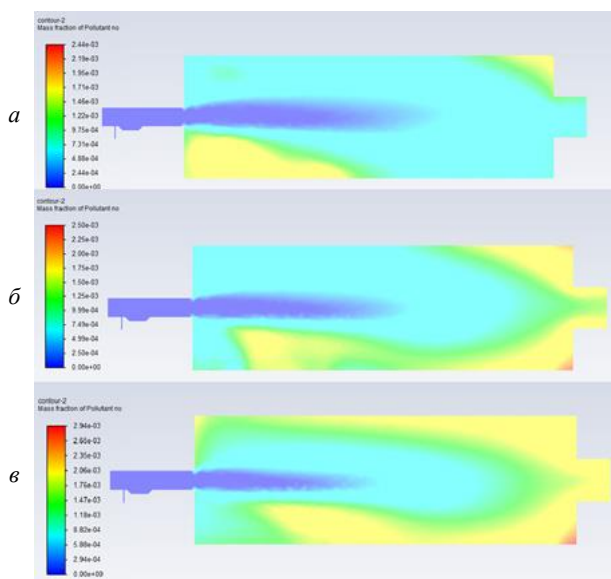


Рис. 5. Поле концентрації оксидів азоту в центральному перетині дослідної ділянки при $\alpha=1,1$, $s/d=4,3$, $d=3,0$ мм для співвідношення компонентів метан/водень
а) 0 / 100 %, б) 25 % / 75 %, в) 50 % / 50 %

високотемпературні продукти реакції. Вцілому, розрахунково отримані розподіли токсичних NO_x корелюються з результатами моделювання температурних полів і підтверджують превалюючу емісію термічних оксидів азоту.

Слід зазначити, що разом з режимними параметрами, геометричні параметри (у тому числі наявність нішевої порожнини) також мають вплив, як на гідродинамічну картину течії реагуючої суміші, так і на емісію викидів.

З ціллю надання рекомендацій щодо конструктивних особливостей пальникової системи в роботі проведено аналіз далекобійності неізотермічного струменю в перпендикулярному потоці повітря, що набігає, за наявності процесу горіння. Далекобійність визначалася шляхом аналізу профілів горизонтальних компонент швидкості у вертикальній осі каналу на різних відстанях від устя отворів для подачі газу. Так, наявність зони зворотних струмів в області нішевої порожнини, зокрема для ситуації з реагуванням метану була доведена присутністю як поступального руху так і зворотнього (окрім додатних значень швидкості є від'ємні). Виродження вихрової структури під струменями палива відбувалась при збільшенні витрати палива у наведеному діапазоні значень гідродинамічного параметру (більше 1,35), що характерно в ситуації спалювання суміші. У збідненій зоні суміші чітко проявлявся максимум горизонтальної компоненти швидкості, що відповідав розвитку системи струменів у потоці

окисника, а для метану вплив струмневої подачі майже не прослідковувався. Отже, з отриманих результатів можна зробити висновок, що існує певний вплив від різниці швидкості витікання палива з колектору газорозподілу (для досліджуваних умов – 8,0 м/с для метану і 10,4 м/с для його суміші з воднем), та значним пришвидшенням проходження реакції окиснення за рахунок реагування більш реакційно здатного водню.

Відомо, що глибина проникнення струменів трактується параметром далекобійності [13], який для ізотермічного витікання визначається як відстань у діаметрах струменя по нормалі від отвору газоподачі до точки на осі струменя де проекція на горизонтальну вісь буде не менше 5 % від швидкості в усті струменя. У ранніх роботах для визначення далекобійності струменів запропонована критеріальна залежність вигляду [5]:

$$D = k_c \cdot \sqrt{q} \cdot (L/H)^{0,13}, \quad (6)$$

де k_c – емпіричний коефіцієнт, q – гідродинамічний параметр, L і H – довжина і висота нішевої порожнини відповідно.

За результатами роботи пропонується ідентифікувати тип палива, тому для метану та його суміші з воднем запропоновано різні емпіричні коефіцієнти в залежності від надлишку повітря в системі.

Таким чином, для практичного застосування отриманих результатів слід використовувати показникову залежність при визначенні геометричних параметрів робочого каналу пальника для природного газу. У разі ж присутності домішок водню пропонується наступна залежність:

$$k_c = 2,0 \cdot \alpha^{-0,38} \cdot (0,65 + C_{H_2} / 100)^{0,75} \quad (7)$$

де C_{H_2} – об'ємна концентрація водню в пальній суміші, %. В даній залежності присутність коефіцієнту надлишку повітря пов'язана не тільки з режимом роботи пальника, але й призначенням, тобто розрахунки пальників для котельного устаткування проводяться в діапазоні 1,05...1,15, а для обладнання, що працює в зоні збіднених сумішей – підбирається згідно вимог технологічного процесу [14].

Важливим параметром паливорозподілу при проектуванні газопальникового обладнання є вибір кроку розташування газорозподільчих отворів S . Найчастіше цей параметр пов'язують з діаметрами отворів і називають відносним кроком: $\bar{S} = S/d$. Рекомендовані значення для умов спалювання природного газу становлять: $\bar{S} = 3,0...4,0$. Зменшення відносного кроку до зна-

чень менше 2,0 і більше 5,0 не рекомендовано у зв'язку з суттєвим погіршенням автотельності процесів сумішоутворення в зоні стабілізації факелу, що призводить до суттєвого звуження діапазону сталого горіння. Слід зазначити, що при спалюванні інших газів також бажано дотримуватися вказаного діапазону значень кроку розташування отворів, оскільки гідродинаміка взаємодії потоку окисника зі струменями палива відіграє важливу роль в процесі стабілізації горіння. Варіювання відносного кроку у допустимих межах розглядається одним зі способів забезпечення стехіометричної суміші в області стабілізації процесу горіння.

На рисунку 6 представлено розподіл температур по осі дослідної ділянки та в ніші при спалюванні суміші метан-водень у співвідношенні 50% на 50%, при $\alpha=1,1$ в залежності від параметру s/d .

Як видно з наведених результатів, параметр s/d не впливає на рівень максимальних температур, їх різниця коливається в межах $\pm 30^\circ\text{C}$. Певна відмінність розподілу температур спостерігається в області нішевої порожнини. Видно, що при $s/d = 2,5$ паливо повністю заповнює об'єм ніші, де і відбувається процес горіння (рис. 6 г). Стосовно інших випадків представлених на рис. 6, відбувається перебудова структури потоку, вихорова структура підіймається з ніші у зону за струмінєвим екраном палива нижче за потоком по мірі збільшення відносного кроку s/d . Схожим чином перебудовується зона горіння. Отримані результати достовірно підкреслюють фізику гід-

родинамічної картини взаємодії перпендикулярної струменевої подачі палива у потік окисника, що набігає. Так, зменшення кроку дещо зменшує далекобійність струменів за рахунок об'єднання їх пограничних шарів у спільний «струмінєвий екран». З іншого боку, збільшення кроку розташування отворів призводить до виокремлення кожного струменя, які глибше проникають у потік індивідуально, ніж спільною пеленою газу при злитті у спільну структуру.

На рисунку 7 наведено розподіл NO_x по осьовому перетину дослідної ділянки при спалюванні суміші метан-водень у співвідношенні 50% на 50%, при $\alpha=1,1$ при $s/d = 4,3$, та $s/d = 2,5$. Для випадку $s/d = 2,5$ спостерігається суттєве зменшення NO_x приблизно на 40% (при тому, що за результатами розрахунків температури як для $s/d = 4,3$, так і для $s/d = 2,5$ майже на одному рівні). Слід враховувати, що заміщення метану на 50% по об'єму знижує теплотворну здатність суміші на третину, максимальні ж розрахункові температури горіння при цьому навіть дещо більші. З іншого боку, зниження калорійності суміші потребує уточнення схеми паливорозподілу з точки зору забезпечення горючих концентрацій в зоні стабілізації факелу і в цілому показників автотельності при зміні витрат компонентів.

Таким чином, стосовно впливу кроку розташування отворів в СНС на процес горіння суміші метан-водень, розрахунки показують, що більш прийнятним з точки зору мінімізації емісії оксидів азоту є його зменшення в межах вказаного реко-

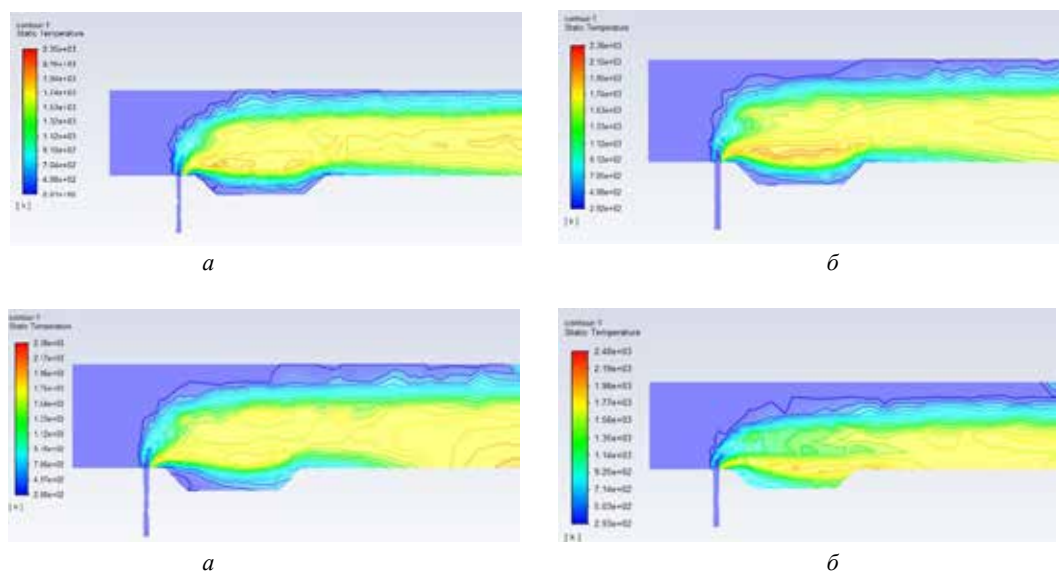


Рис. 6. Розподіл температур по осі дослідної ділянки та в ніші при спалюванні суміші метан-водень у співвідношенні 50% на 50%, при $\alpha=1,1$ в залежності від параметру s/d : а) $s/d = 5,0$, б) $s/d = 4,3$, в) $s/d = 3,75$, г) $s/d = 2,5$

мендованого діапазону значень. Оцінка теплового балансу процесу горіння в зоні стабілізації факелу вказує також на необхідність зменшення кроку в порівнянні з рекомендованим значенням для метану. Так, при горінні збіднених сумішей слід зменшувати крок і навпаки збільшувати його – при горінні збагачених сумішей (наприклад пропан). З іншого боку, нормальна швидкість розповсюдження полум'я для водню у 5 разів більша у порівнянні з метаном ($v_{\text{CH}_4} = 0,28$ м/с) при стехіометричних концентраціях і не може не впливати на стабілізаційні якості СНС, тому вибір параметру s/d потребує комплексної оцінки усіх робочих аспектів стабілізатора полум'я з обов'язковим експериментальним підтвердженням результатів моделювання.

Висновки

В даній роботі на основі математичного моделювання авторами проведено комплекс досліджень процесу мікрофакельного спалювання суміші палив метан-водень у пальникових пристроях струменево-нішевого типу. Розглянуто головні етапи побудови CFD-моделі процесу згоряння паливної суміші. Наведено методику CFD-моделювання в програмному середовищі ANSYS Fluent.

В результаті проведеного аналізу встановлено, що як для чистого метану, так і для суміші метан-водень, при збільшенні коефіцієнту надлишку повітря відбувається підвищення локальних температур горіння в об'ємі ніші, а отже й зменшення довжини факелу реагуючої суміші. Домішки водню збільшують швидкість витікання струменів палива та їх дальнобійність в середньому на 18%,

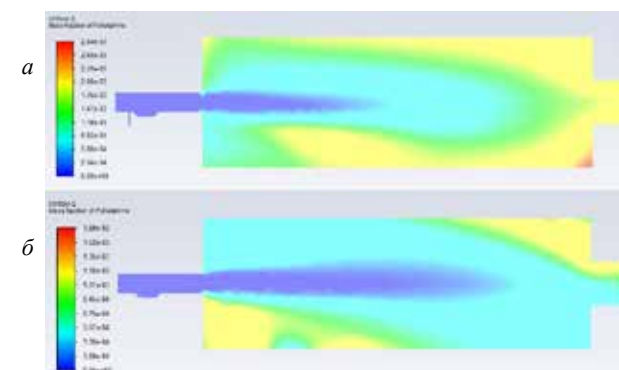


Рис. 7. Розподіл NO_x по осі дослідної ділянки при спалюванні суміші метан-водень у співвідношенні 50% на 50%, при $\alpha=1,1$ в залежності від параметру s/d : а) 4,3, б) 2,5

при забезпеченні робочого режиму пальника. Так, при спалюванні суміші дещо збільшується гідродинамічний показник, тому стабілізація та горіння факелу відбувається не тільки безпосередньо над нішею (як для випадку з чистим метаном), а й частково зміщується далі у потоці реагуючої суміші. За результатами роботи для метану та його суміші з воднем запропоновано емпіричні залежності для визначення параметру дальнобійності паливних струменів. З розрахунків встановлено, що додавання водню в об'ємі від $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{2}$ збільшує емісію NO_x на 27%. З огляду на отримані результати, рекомендованим діапазоном вибору відносного кроку розташування отворів з точки зору забезпечення сталості горіння і зниження викидів NO_x при горінні метановодневих сумішей $s/d = 2,0 \dots 3,5$.

Список літератури:

1. НЕК «УКРЕНЕРГО». URL: https://ua.energy/peredacha-i-yspetcheryzatsiya/zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchykh-potuzhnostej/#1538032249_011-abadd3b9-db7ca1e4-9e6d (дата звернення: 20.12.2021)
2. Сорока Б.С., П'яних К.Є., Згурський В.О., Горупа В.В., Кудрявцев В.С. Енергетичні та екологічні характеристики побутових газових приладів при використанні метано-водневої суміші, як паливного газу. Нафтогазова галузь України, № 6. 2020. С. 3–14. URL: <https://www.naftogaz.com/files/journal/Journal-Naftogazova-galuz-06-2020.pdf> (дата звернення 17.05.22)
3. Спеціалізований ресурс про відновлювану енергетику в Україні та світі. URL: <https://ecotown.com.ua/news/U-Britaini-vpersherochali-oral...-Ecotown,2020>. (дата звернення 12.02.22)
4. Кривенцов О.О., Сірий О.А. Особливості горіння метано-водневих сумішей у камерах згоряння ГТД. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: праці XIX міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів (Київ, 20–23 квітня 2021 р.)*, Київ, 2021р.
5. Абдулін М.З., Сірий О.А. Дослідження гідродинамічного стабілізатора полум'я з поперечною подачею палива. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів (Київ, 21–24 червня 2014 р.)* Київ, 2014 р. С. 101.
6. Вікіпедія: вільна енциклопедія URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Воднева_Енергетика
7. Haryanto A., Fernando S., Murali N., Adhikari S. Current Status of Hydrogen Production Techniques by Steam Reforming of Ethanol. *Energy and Fuels* 2005;19:2098-2106.

8. Інституційний репозитарій ТНТУ імені Івана Пулюя. URL: http://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/22174/2/NKTNTU_2017_Dranivskyi_N_I-Hydrogen_accessible_186-187.pdf (дата звернення 12.04.22)

9. R. K. Hanson and S. Salimian. "Survey of Rate Constants in H/N/O Systems". In W. C. Gardiner, editor. *Combustion Chemistry*. 361. 1984.

10. М.З. Абдулин, Г.Р. Дворцин, А.М. Жученко, О.В. Доманский, С.Ф. Порхун Универсальная технология сжигания – это реальность. Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем : сб. научн. тр., М. : НИУ МЭИ, 2010. С. 29–32.

11. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / пер. с англ. Г.Л. Агафонова ; под ред. П.А. Власова. М. : Физматлит, 2003. 352 с.

12. Микулин Г.А., Любчик Г.Н., Варламов Г.Б. Эмиссионные свойства трубчатых топливосжигающих элементов интенсификации горения и стабилизации пламени. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2005, № 2.

13. Абдулин М.З., Дворцин Г.Р., Жученко А.М., Серый О.А. Оптимизация гидротермохимических процессов – основа высокоэффективного сжигания топлива. *Единое информационное пространство*. Киев : КНУ им. Шевченка, 2013. С. 121–122.

14. Соколов Б.А. Котельные установки и их эксплуатация : учебник для нач. проф. образования. 2-е изд., испр. М. : Академия, 2007. 432 с.

Siryi O.A., Kobylanska O.O. ANALYSIS OF CFD-MODEL OF METHANE-HYDROGEN COMBUSTION PROCESS IN A JET-NICHE GAS BURNER

The development of hydrogen technologies by the industrialized countries of the world and their gradual involvement in the energy sector singles out this direction as promising in the context of the gradual transition to carbon-free technologies. The use of hydrogen as a partial replacement of traditional natural gas with fuel combustion equipment may be the first step towards ensuring current and future environmental standards. It should be noted that the determining factor in the emission of harmful substances is the technology of combustion. The authors consider the main stages of building a CFD-model of the combustion process of a mixture of methane-hydrogen fuels in the jet-niche system (JNS) of fuel stabilization and combustion. The technique of CFD-modeling in the Ansys Fluent software environment is given. The analysis of the obtained results is carried out, namely the influence of geometric and mode parameters of the stabilizer on the combustion process at different ratios of concentrations of methane-hydrogen components. The influence of hydrogen addition on the range and flow rate of fuel jets required to ensure the operating mode of the burner is shown. According to the results of mathematical modeling, the regularities of formation of nitrogen oxides at change of geometrical characteristics of fuel supply are analyzed. The effect of changes in the hydrogen content of the fuel mixture with methane on the NO_x concentration in the combustion products was also determined. Regularities of flow hydrodynamics in a jet-niche system with variation of hydrodynamic parameter q for nonisothermal flow are established. Dependences for the calculation of the empirical coefficient, which interprets the depth of penetration of methane-hydrogen jets into the flowing oxidant, are presented. Recommendations for determining the rational design parameters of the fuel distribution of the JNS are given.

Key words: methane-hydrogen mixture, CFD-model, Ansys Fluent, jet-niche system, temperature distribution.