

УДК 621.165.62-192

CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТИПУ ГАЗОРОЗДАЧІ В ПАЛЬНИКАХ НА ТЕПЛОАЕРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В КОТЛІ ДКВР 10-13

¹ **О. Ю. Черноусенко**, д-р техн. наук
chernousenko20a@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1427-8068

¹ **А. Ю. Рачинський**, канд. техн. наук
arturrachinskiy@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6622-1517

^{1,2} **О. В. Баранюк**, канд. техн. наук
olexandr.baranyuk@gmail.com
ORCID: 0000-0003-0610-1403

¹ **О. А. Сірий**, канд. техн. наук
Seruy_Alex@i.ua
ORCID: 0000-0001-5811-9037

¹ Національний технічний
університет України «Київський
політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
03056, Україна, м. Київ,
пр. Берестейський, 37

² Інститут теплоенергетичних
технологій НАН України
04070, Україна, м. Київ,
вул. Андріївська, 19

Теми, пов'язані зі згорянням палива та його впливом на навколишнє середовище, ніколи не втрачають своєї актуальності, оскільки питання ефективного згоряння й зменшення викидів є ключовими у виробництві електроенергії й охороні навколишнього середовища. Країни Європейського Союзу масово відмовляються від використання природного газу як палива для ТЕС. Проте в країнах Азії простою використання в промисловості природного газу як основного палива, його екологічність порівняно із вугіллям дали змогу ширше застосовувати природний газ у промисловості й енергетиці. Порівнюючи природний газ з альтернативними горючими газами (генераторним, доменним, шахтним, біогазом), можна зробити головний висновок про те, що він має найпривабливіші характеристики для використання в промисловості, зокрема і в енергетиці. Отже, у найближчий час заміна його на альтернативні палива в хімічній, важкій промисловості й енергетиці неможлива. Представлена робота присвячена CFD-моделюванню стабілізованого горіння без попереднього змішування в пальнику з низьким завихренням для двох режимів роботи котельного агрегату – номінального і на 60% потужності. Дослідження виконувалося за допомогою чисельних методів при використанні пакета прикладних програм Ansys-Fluent. Об'єкт дослідження – пальник, побудований за технологією, основою на використанні струменево-нішевих систем із газорозподілом палива круглими струменями, що подаються перпендикулярно в потік окислювача через однорядну систему отворів. Предметом дослідження обрано процеси гідродинаміки і теплообміну, на підставі результатів аналізу яких отримана модель генерації NO_x в струменево-нішевих системах. Автори роботи вважають, що заміна штатних пальників водогрійного котла типу ДКВР-10-13 на струменево-нішеві може сприяти більшому згорянню палива й повітря, а також забезпечити більшу повне згоряння. У даній роботі розглянуто два типи пальників. В одному з пальників паливо подається крізь прямокутні щілини, в іншому – через розташовані в ряд круглі отвори. Повітря в обидва пальники подається через прямокутні щілини. Визначено, що газороздача крізь круглі отвори посилює розпилення суміші і збільшує зону розпилення продуктів згоряння. Проведена візуалізація розподілу середньої швидкості, температури, шкідливих домішок типу NO_x і компонентів реакції. Отримані результати свідчать, що зміна режиму течії, зміщення полум'я або його нестабільності відсутні. Встановлено, що на поширення продуктів згоряння і шкідливих домішок типу NO_x впливають як осьова, так і тангенціальна швидкість потоку. Газороздача круглими струменями стабілізує горіння і зменшує розширення полум'я.

Ключові слова: газороздача, струменево-нішева технологія, ANSYS-Fluent, моделювання, газоподібне паливо, горіння, метан, паливня котла.

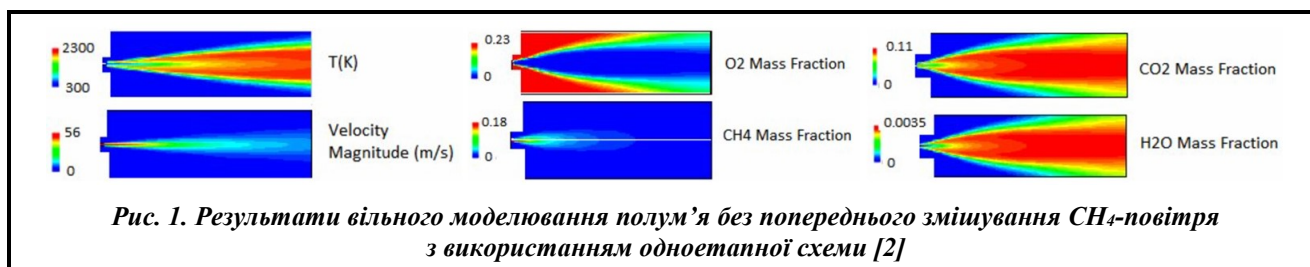
Вступ

На сьогодні існує необхідність в оптимізації конструкції та робочих параметрів пальників. Для цього необхідно дослідити процеси спалювання. Як відомо, горіння між паливом і повітрям передбачає перетворення хімічної енергії в теплову. З огляду на це для отримання максимальної теплової ефектив-

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.
© О. Ю. Черноусенко, А. Ю. Рачинський, О. В. Баранюк, О. А. Сірий, 2024

ності бажано мати повне згоряння, а отже, неповне, за якого в навколишнє середовище виділяються токсичні незгорілі вуглеводні, а також CO_2 , NO_x тощо [1], що призводить до забруднення довкілля і зниження ефективності спалювання палива, не підходить для того, щоб отримати потрібний результат.

Природний газ є основним паливом для промислових газових турбін. Додамо, що склад природного газу, попри переважання метану, різний. Крім того, розмір детальної хімічної кінетичної моделі занадто великий для використання в кодї CFD-Fluent. Виходячи з цього, мета дослідження [2] – пошук зменшення кількості видів і реакцій, щоб отримати швидкий і дієвий механізм розрахунку (рис. 1) і імплантувати його у Fluent. Вивчення реакції полум'я метан-повітря виконано на моделі без попереднього змішування з використанням k - ϵ турбулентної моделі і 8-етапної моделі реакції. Автори підтвердили результати обчислень експериментальними результатами.



Як свідчить аналіз доступної літератури, на сьогодні необхідно підвищити ефективність згоряння й мінімізувати викиди. Спираючись на це, дослідниками розроблено різноманітні конструкції пальників. Наприклад, автори роботи [3] засобами CFD-моделювання визначали температуру полум'я й температуру CO_2 за різних умов потоку суміші метан-повітря. Для моделювання процесу спалювання вони використовували модель горіння без попереднього змішування. У роботі [4] фізичний механізм розгоряння полум'я і межі стабільності при горінні без попереднього змішування вивчалися за допомогою теоретичного й чисельного моделювання. Одномірний розрахунок полум'я використовується для побудови діаграми стабільності, а три окремих межі стабільності – для дослідження механізму спалаху полум'я. У центрі уваги авторів [5] була поведінка горіння попередньо змішаної пропано-повітряної суміші за допомогою моделі k - ϵ і моделі зменшених хімічних речовин. Як показали результати, найвища температура спостерігається в областях із сильним завихренням.

Автори [6] використовували CFD-аналіз для вивчення горіння частково попередньо змішаної метано-повітряної суміші в камері згоряння 2D. Їх результати показали, що статична температура висока в зоні горіння, а знижується вона до виходу з пальника.

Однак зараз для дослідження процесів спалювання використовуються не тільки відомі експериментальні й числові методи, а і новітні технології у вигляді лазерної діагностики. Так, у роботі [7] вивчалися характеристики реакційних зон турбулентного горіння попередньої суміші. Вони показали, що товщина зони попереднього нагріву й реакції збільшується у багато разів, ніж ламінарний аналог. Автори зробили висновок, що енергетичні вихори можуть потенційно проникати в ядро полум'я і таким чином розширювати його товщину.

Із аналізу доступної літератури випливає, що для зниження емісії шкідливих речовин, крім вдосконалення конструкції пальника, слід враховувати можливість заміни метану на інші види палива. Так, автори [8] досліджували поведінку горіння пропану й метану за допомогою моделі горіння без попереднього змішування на основі CFD. Виходячи з отриманих результатів, вони для розробленої ними камери згоряння замість метану як ефективне паливо запропонували пропан.

Методика CFD-моделювання метано-повітряного палива для умов стаціонарного стану з використанням обчислювальної динаміки рідини з моделлю турбулентності k - ϵ наведена в роботі [9]. Таким чином, аналіз згаданих вище публікацій свідчить, що в розрахунковій практиці вже сформовані загальні риси комп'ютерних моделей процесів спалювання і транспорту газу, яких слід дотримуватися, щоб досягти коректного, з фізичної точки зору, результату, а саме: процес горіння слід моделювати з використанням моделі перенесення компонентів (Species Transport) і k - ϵ моделі турбулентності зі стандартними або масштабованими пристінними функціями.

Згадану методику можна застосувати при аналізі течії і теплообміну в паливній (газовому просторі) котельного агрегату шляхом зміни конструктивних і режимних параметрів встановлених в котельний агрегат пальників.

Мета і задачі дослідження

Мета роботи полягала у визначенні методів зниження викиду шкідливих речовин у навколишнє середовище з котла типу ДКВР-10-13.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

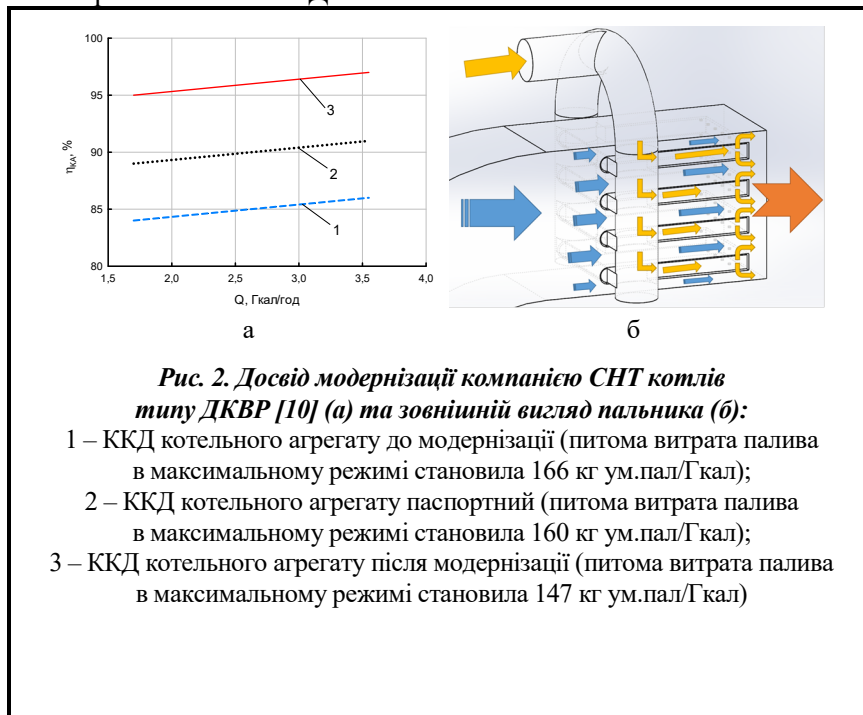
- розробити моделі паливного котла типу ДКВР-10-13, оснащеної пальниками, виготовленими з використанням струменево-нішевої технології;
- дослідити процеси гідродинаміки й сумішоутворення в паливній (газовому просторі) котла залежно від типу подачі газу і режимних параметрів течії в струменево-нішевому стабілізаторі полум'я;
- надати рекомендацій стосовно модернізації установки найбільш економічним методом.

Об'єкти дослідження й особливості геометричних моделей

Відомо, що основними засадами сучасної технології спалювання палива є раціональний початковий розподіл палива у потоці окислювача, стійка і керована аеродинамічна структура течії палива, окислювача і продуктів згоряння, а також саморегульованість складу паливної суміші у зоні стабілізації факела. Цим вимогам задовольняє струменево-нішева технологія спалювання природного газу [10], яка на сьогоднішній день впроваджена на багатьох типах обладнання. Так, до переліку модернізованого обладнання відносять: водогрійні й парові котли, зокрема енергетичні, потужністю до 200 МВт, мартенівські печі, сушильні печі та ін.

Дуже поширеними в малій енергетиці є котли типу ДКВР. Дослідження автора [10] свідчить, що майже на всіх модернізованих котельних агрегатах за рахунок зниження коефіцієнта надлишку повітря до 1,04–1,07 і значного зниження температури газів, що йдуть у широкому діапазоні навантаження, забезпечувалося високе, порівняно з паспортним, значення ККД бруто (близько 95%). На одному з котлів ДКВР-6,5, що працює у водогрійному режимі, були проведені порівняльні випробування пальників СНД-43 із системою з двох ніш (приструйної та торцевої) і штатних пальників ГМГ-4. Результати вимірювання параметрів роботи котла до і після модернізації наведено на рис. 2, з якого видно, що котел, який знаходився в експлуатації близько 40 років і дещо знизив свої економічні характеристики, після модернізації суттєво перевищив паспортні значення ККД.

Шлях реалізації ефективної технології – розташування струменево-нішевої системи на автономному пілоні-колекторі. Такий пальниковий модуль замикає на себе всі стадії робочого процесу: розподіл пального в потоці окислювача, сумішоутворення до необхідного рівня концентрації, займання паливної суміші, стабілізація факела і формування концентраційних, швидкісних і температурних полів продуктів згоряння, активно охолоджується потоками окислювача і палива, не вимагає додаткової автоматики керування. Усе згадане досягається за рахунок вдалого конструктивного розміщення системи на автономному колекторі, з яких складається пальник (рис. 2, б).



Дана конструкція дає змогу поєднати в собі усі стадії робочого процесу палиників, як-от: розподіл палива в потоці, утворення суміші з необхідними рівнями концентрацій палива, запалення горючої суміші, стабілізація факелу і формування продуктів згоряння необхідної якості й без шкідливих викидів, термічна підготовка палива і самоохолодження термічно навантажених елементів паличника.

Відомо, що результат моделювання залежить від багатьох параметрів, проте одними із найважливіших є щільність розрахункової сітки, скошеність і співвідношення сторін скінчених елементів, а також їх тип. В ANSYS існує можливість побудови розрахункової сітки на основі скінчених елементів у вигляді тетраедра, паралелепіпеда та їх комбінації, так званої гібридної скінчено-елементної сітки.

На рис. 3 представлена CFD-модель паливни з встановленим струменево-нішевим стабілізатором полум'я, який використовується як паличник. Для апроксимації розрахункової області застосовувалися неструктурована (тип скінченого елемента – тетраедр), структурована (тип скінченого елемента –

паралелепіпед) і гібридна скінченно-елементна сітка. Значення «якості» скінченно-елементної сітки – параметри співвідношення сторін (AspectRatio) скінченного елемента, ортогональна якість (Orthogonal Quality) і скошеність (Orthogonal Skew) – знаходяться по середині референтного інтервалу, що видає програма для перевірки. Щільність розрахункової сітки обрана максимальною, в рамках дозволеного версією ANSYS-Student.

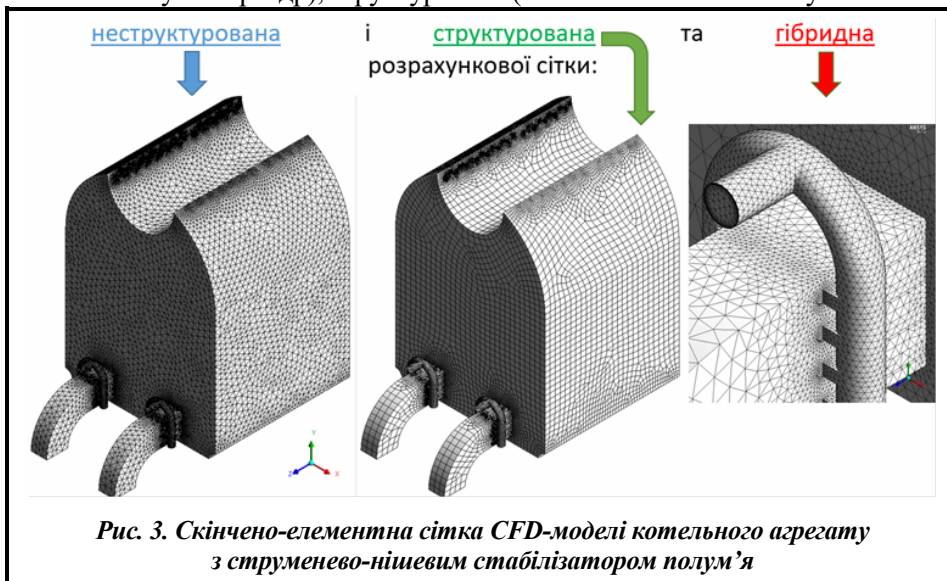


Рис. 3. Скінченно-елементна сітка CFD-моделі котельного агрегату з струменево-нішевим стабілізатором полум'я

Як керуючі рівняння, що використовуються в математичній моделі процесу, прийнято рівняння нерозривності, Нав'є-Стокса для течії в'язкої рідини, що стискається, зі змінними властивостями, рівняння енергії та рівняння збереження компонентів суміші [11], що вирішується числовими методами в середовищі Ansys-Fluent. При процесі моделювання також використовувалася стандартна методика Ansys-Fluent для прогнозування утворення NO_x , а саме розраховувалася генерація як теплових, так і швидких NO_x . Стандартна методика Ansys-Fluent бере до уваги турбулентно-хімічну взаємодію, що дозволяє обчислювати утворення NO_x з урахуванням впливу турбулентних пульсацій на усереднені за часом швидкості реакції. Для прогнозування концентрації радикала O, необхідної для прогнозування теплового NO_x , використовується модель часткової рівноваги.

Алгоритмом рішення обраний неявний алгоритм встановлення (Pressure Based Implicit). Розрахунок зроблено у стаціонарній постановці (Steady).

В якості розрахункової автори використовували Realizable k- ϵ модель турбулентності в модифікації realizable оскільки вона розроблена для потоків, що містять струмені (вприскування паливоповітряної суміші).

Як граничні умови на непроникних стінках задавалися умова рівності нулю всіх компонентів вектора швидкості і нерівномірний розподіл температури на поверхні стінок, для визначення якого задавався температурний напір між нижнім роздатковим колектором і барабаном, що вибирався з паспортних характеристик котла.

На вході в розрахункову область задаються масова витрата (Massflow inlet) і температура, на виході – статичний тиск (Pressure outlet). Значення параметрів реагуючих потоків представлені в табл. 1.

Таблиця 1. Числові значення граничних умов, що задавались в роботі і контрольні параметри

Параметр	Позначення	Розмірність	Навантаження, %	
			100	63
Теплове навантаження	Q_k	Гкал	9,39	5,86
Витрата газу	G_{Γ}	м ³ /год	1215	760
Температура газу	t_{Γ}	°С	18	18
За економайзером	NO_x	ppm	86	77
Коефіцієнт надлишку повітря	α	—	1,27	1,33
Витрата повітря	$G_{\text{пов}}$	м ³ /сек	4,11	2,69
Температура повітря	$t_{\text{пов}}$	°С	21	21

Результат CFD-моделювання течії та теплообміну в паливній котла ДКВР-10-13

Теплообмін в паливній котла передусім визначається режимом течії, що організована паливниками. Як і очікувалося, потік струменем із паливника направляється на «вихід» з паливни, де тиск найменший. Над струменем утворюється засгійна зона з циркуляційною течією, рух в якій підтримується рухомими масами газу внаслідок дії різниці температур між розжареним факелом полум'я (орієнтовно 1600 °С) і поверхнею барабана (середня температура стінки якого становить 120 °С).

На рис. 5 наведено розподіл температур потоку в поперечному перерізі площиною, яка перпендикулярна поширенню струменя розжареного газу і знаходиться на відстані 100 мм від «виходу» потоку з паливни. Аналіз даних рис. 5 свідчить, що при однаковому заповненні кольорами ізотерми у випадку використання структурованої і гібридної сітки плавні, на відміну від моделі, яка побудована з використанням неструктурованої сітки. Отже, для подальшого моделювання пропонується обрати гібридну сітку.

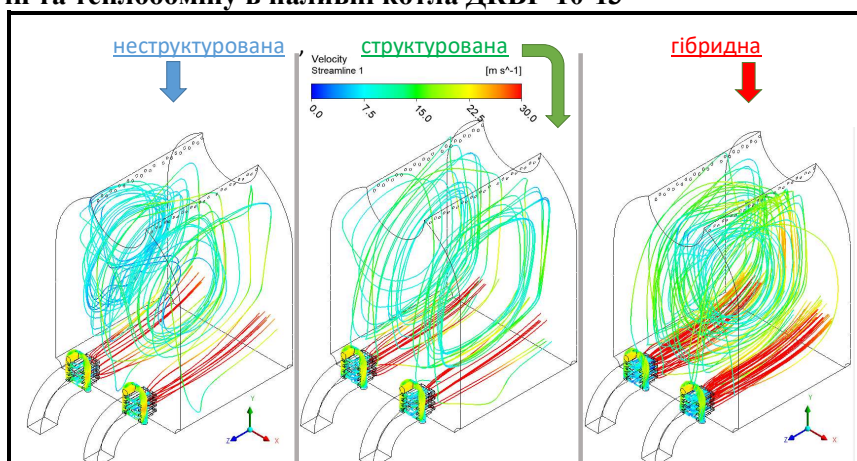


Рис. 4. Траєкторії руху частинок потоку в об'ємі паливни залежно від типу розрахункової сітки

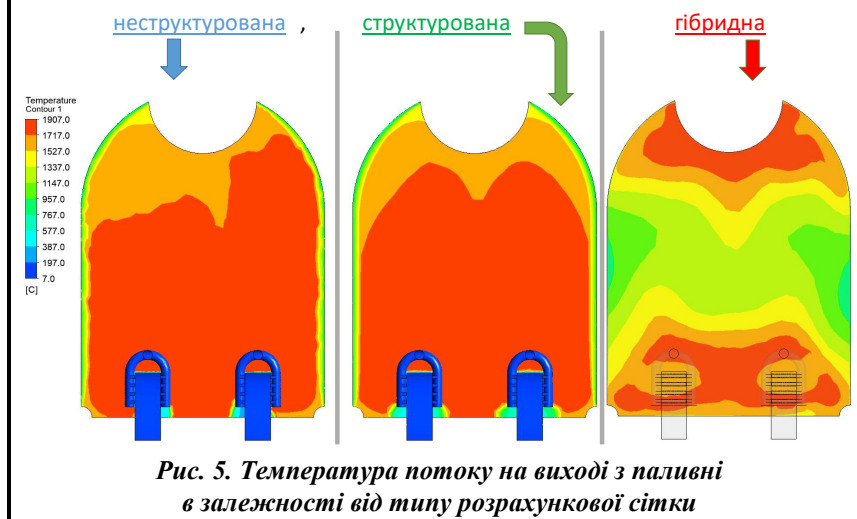


Рис. 5. Температура потоку на виході з паливни в залежності від типу розрахункової сітки

Вплив типу газороздачі (подача газу або крізь прямокутні щілини, або крізь розташовані в ряд круглі отвори) характеризується розподілом температур в об'ємі паливни (рис. 6). Аналіз рис. 6 свідчить, що в центрі паливни виникає зона пониженого тиску, відносно якої спостерігається циркуляційна течія. На периферії цієї течії спостерігаються зони, температура яких відповідає температурі факелу полум'я. Пояснюється це явище вільно-конвективним рухом мас газу внаслідок зміни густини. Довжину факелу полум'я можна визначити за допомогою параметру Mixture Fraction, який відображає інтенсивність процесу перемішування і найбільш повно характеризує ступінь змішування палива й окислювача (наприклад, у прореагованому полум'ї). Значення нуль відповідає 100% окислювача, а 1 – 100%

палива. Зона перемішеного з повітрям газу (рис.6) опосередковано зображає форму факелу розжарених газів, оскільки саме в цій області власне і відбувається реакція хімічної взаємодії метану з киснем.

Як свідчить рис. 6, а, довжина факелу полум'я не перевищує 1 м, що відповідає паспортним характеристикам для штатного пальника котла типу ДКВР. У випадку подачі газу крізь прямокутні щілини (рис. 6, б) факел «перетинає» весь переріз паливни. На практиці експлуатації котельних агрегатів таких випадків прагнуть уникати, оскільки виникає ризик перепалення труб заднього екрану котла.

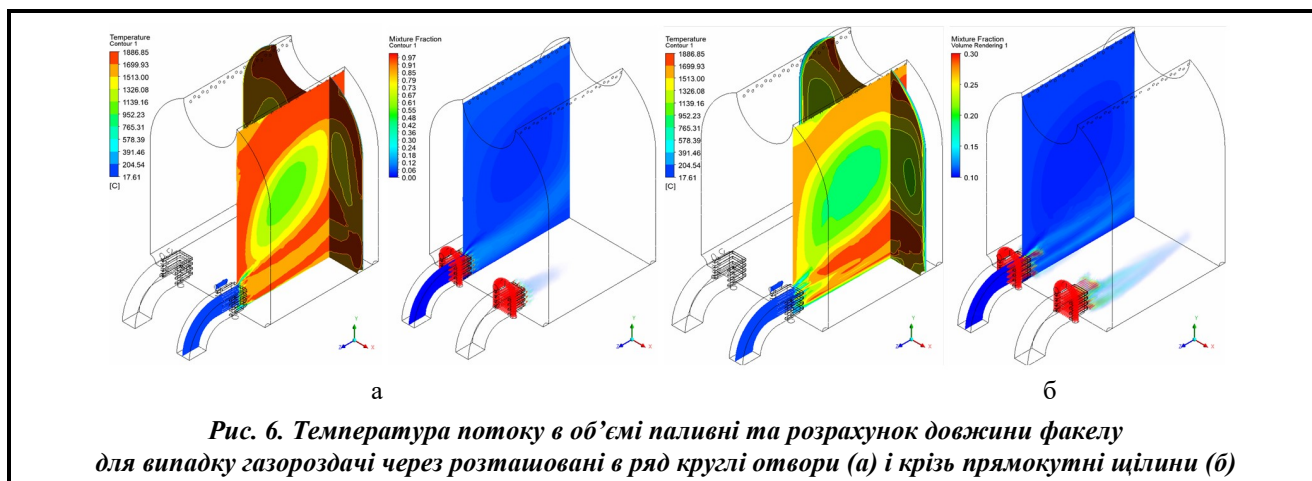


Рис. 6. Температура потоку в об'ємі паливни та розрахунок довжини факелу для випадку газороздачі через розташовані в ряд круглі отвори (а) і крізь прямокутні щілини (б)

Розподіл окислів азоту NO_x у двох взаємоперпендикулярних перерізах – крізь середину пальника і переріз «виходу» потоку з паливни приведений на рис. 7 свідчить, що максимальна концентрація забруднюючих речовин спостерігається в зонах із високими температурами. Ці зони формуються згідно з гідродинамічною структурою потоку в паливни і генерацією забруднюючих частинок у них, що безпосередньо залежить від часу перебування частинки повітря в зоні дії високих температур.

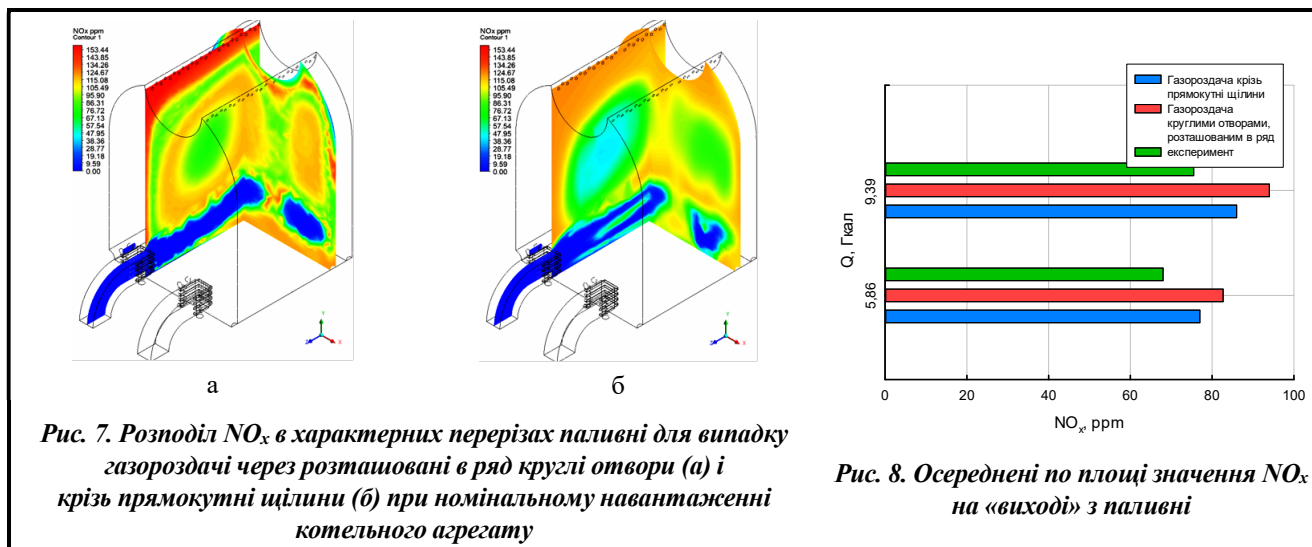
Аналіз рис. 7 свідчить, що у випадку газороздачі крізь прямокутну щілину загальний рівень генерації окислів азоту NO_x нижчий, чим у випадку газороздачі струменями. Відповідно до рис. 4–6 по периферії паливни потік рухається з достатньо низькими (4–7 м/с) локальними швидкостями. Тут же спостерігається зона з високою температурою (1800 °C для випадку газороздачі струменями і 1500 °C для газороздачі щілинами). Це ідеальні умови генерації окислів азоту NO_x , не суперечить існуючим уявленням про генерацію в паливни котла окислів азоту і, якщо не застосовувати міри по очистці (наприклад, окислення оксиду азоту до вуглекислого газу), можуть потрапити в атмосферу.

Згідно з табл. 1 за економайзером котла задано осереднене по площі «газового вікна» значення окислів азоту. Ці значення автори обрали для верифікації CFD-моделі. Так, засобами CFD-моделювання при номінальному навантаженні на «виході» з паливни у випадку газороздачі круглими струменями (власне струменево-нішевим пальником) встановлено рівень генерації NO_x – 94 ppm. Відповідно до експериментальних даних це значення становить 86 ppm. Похибка в 8,6% в даному випадку є допустимою і свідчить про верифікацію розрахункової моделі при чисельному дослідженні значень окислів азоту при горінні в паливни. Таке порівняння допускається, оскільки створені в зоні дії високих температур окисли азоту не руйнуються, із паливни потрапляють в конвективну шахту котельного агрегату і разом з потоком димових газів омивають економайзер котла, де є можливість провести експериментальні вимірювання.

Слід зауважити, що у випадку подачі газу через прямокутні щілини рівень генерації NO_x становить 79,5 ppm, що пов'язано із нижчим рівнем температур в паливни.

Розрахунок генерації NO_x при 60% тепловому навантаженні проводився також і його результати наведені на рис. 8.

Аналіз наданих на рис. 8 даних свідчить, що подача газу в прямокутні щілини зменшує генерацію NO_x , порівняно з експериментом на струменево-нішевому пальнику, на 12%. Це пов'язано з тим, що середня температура паливни значно нижча. Викликає також занепокоєння той факт, що температурне поле барабана, встановленого у верхній частині паливни, нерівномірне, що негативно вплине на його міцність.



Висновки

1. Проведена верифікація за допомогою осереднених по площі «газового вікна» значень NO_x свідчить, що відхилення розрахункових даних від експериментальних не перевищує 8,6%.
2. Визначено, що в паливні котла ДКВР-10-13 спостерігається нижчий рівень ($\approx 12\%$) генерації NO_x , якщо газороздачу в струменево-нішевому пальнику організувати крізь прямокутні щілини, а не через розташовані в ряд круглі отвори.
3. Встановлено, що по периферії паливні для газороздачі щілинами температура в паливні становить $1500\text{ }^\circ\text{C}$, а випадку газороздачі струменями температура дорівнює $1800\text{ }^\circ\text{C}$, що, у свою чергу, призводить до меншого рівня генерації NO_x .
4. Для струменево-нішевого пальника, газороздачу в якому організовано через розташовані в ряд круглі отвори, довжина факелу полум'я не перевищує 1 м, що відповідає паспортним характеристикам для штатного пальника котла типу ДКВР. У випадку подачі газу крізь прямокутні щілини факел «перетинає» весь переріз паливні. Ця ситуація є неприпустимою, оскільки виникає ризик перепалення труб заднього екрану котла.
5. Визначено, що в центрі паливні виникає зона пониженого тиску, відносно якої спостерігається циркуляційна течія. На периферії цієї течії спостерігаються зони, температура яких відповідає температурі факелу полум'я. Пояснюється це явище вільно-конвективним рухом мас газу внаслідок зміни густини.
6. Температурне поле барабана, встановленого у верхній частині паливні з пальником, в якому організована подача газу крізь прямокутні щілини, нерівномірне, що негативно впливає на його міцність.

Література

1. Hossain M. A. Computational study of methane-air combustion using the species transport model. *AIAA Science and Technology Forum and Exposition*, January 3–7, 2022, San Diego. Paper AIAA 2022-1102. <https://doi.org/10.2514/6.2022-1102>.
2. Guessab A., Aris A., Bounif A., Gökalp I. Reduced chemical kinetic mechanisms: Simulation of turbulent non-premixed CH_4 -Air flame. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. 2014. Vol. 8. No. 2. P. 66–74.
3. Eswara Kumar A., Janjanam N., Nagaraju M., Diwakar V. CFD analysis of combustion parameters of methane-air mixture. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2015. Vol. 4. Iss. 05. P. 92–95. <https://doi.org/10.17577/IJERTV4IS050217>.
4. Li D., Ihme M. Stability diagram and blow-out mechanisms of turbulent non-premixed combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2021. Vol. 38. Iss. 4. P. 6337–6344. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.225>.
5. Anetor L., Osakue E., Odetunde C. Reduced mechanism approach of modeling premixed propane-air mixture using ANSYS fluent. *Engineering Journal*. 2012. Vol. 16. Iss. 1. P. 67–86. <https://doi.org/10.4186/ej.2012.16.1.67>.
6. Rajak A., Datta A., Kureel V. Analysis of combustion characteristics of methane/air mixture in coaxial combustor. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*. 2016. Vol. 5. Iss. 10. P. 277–285.

7. Mohammadnejad S., An Q., Vena P. C., Yun S., Kheirkhah S. Thick reaction zones in non-flamelet turbulent premixed combustion. *Combustion and Flame*. 2020. Vol. 222. P. 285–304. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.08.047>.
8. Nair A. S., Mohan Krishna B., Ajith Kumar S. Study of non-premixed combustion of propane and methane using CFD. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 46. Part 10. P. 4593–4597. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.713>.
9. Rajak U., Verma T. N. Numerical investigation on cylindrical combustion chamber for methane-air fuel. *International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering (IJTARME)*. 2017. Vol. 6. Iss. 1–2. P. 148–150.
10. Абдулін М. З. Розроблення теплофізичних засад технологій спалювання палив з застосуванням струменевонішових систем. дис. ... док. техн. наук: 05.14.06 «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика» / Інститут технічної теплофізики НАН України. Київ, 2019. 390 с.
11. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide. ANSYS Inc. ANSYS Help, 2012. <https://ansyshelp.ansys.com>.

Надійшла до редакції 18.02.2024