

Черноусенко О.Ю.¹, докт. техн. наук, ORCID 0000-0002-1427-8068,
Рачинський А.Ю.¹, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0001-6622-1517,
Баранюк О.В.^{1,2}, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0003-0610-1403

¹ **Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

просп. Берестейський, 37, 03056 Київ, Україна, e-mail: chernousenko20a@gmail.com

² **Інститут теплоенергетичних технологій Національної академії наук України**
вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: arturrachinskiy@gmail.com

CFD моделювання паливні котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ)

Анотація. Основною метою роботи є аналіз доцільності заміни штатних пальників на пальники, що побудовані на основі струменево-нішевої технології, в енергетичних котлах, наприклад, таких як паровий котел ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ). Для досягнення цієї мети побудована комп'ютерна модель парового котла та штатних пальників. Дослідження виконувалося засобами програмного комплексу ANSYS Student. Застосування чисельного методу моделювання за допомогою програмного комплексу ANSYS Student дало можливість виконати детальний аналіз процесу спалювання палива у паровому котлі, оцінити його ефективність та вивчити вплив на екологічні показники. Об'єктом дослідження були процеси, які мають місце при спалюванні газоподібного палива, та їх вплив на показники роботи енергетичного котла ГМ-50. Предметом дослідження була CFD-модель паливні котла ГМ-50, штатні пальники якого здатні працювати як на рідкому, так і на газоподібному паливі. Як паливо був використаний метан. Як пальники використовувалися як штатні осьові пальники, так і пальники, побудовані на основі струменево-нішевої технології, які є більш екологічними. Верифікація CFD-моделі, яка відбувалася з використанням відомої аналітичної методики, свідчить, що розбіжність значень аналітичних розрахунків та розрахунків моделі не перевищує 6,7 %. Як параметр порівняння вибрана середня температура димових газів у вікні фєстона. Аналітично отримано значення температури 1117 °С. Розрахунок засобами CFD-моделі, яка розроблена в середовищі ANSYS-CFX, свідчить, що значення температури має становити 1042 °С. Визначено, що штатні пальники є менш екологічними, ніж, наприклад, сучасні струменево-нішеві. Так, для коефіцієнта надлишку повітря $\alpha = 1,2$ осереднене значення оксидів азоту на виході з паливні становить 187 ppm. Є сенс замінити штатні пальники, наприклад, на струменево-нішеві, які найбільш підходять для заміни штатних. *Бібл. 24, рис. 6.*

Ключові слова: горіння, котел, CFD моделювання, гідродинамічна взаємодія, факел, NO_x , тепловий потік.

На сьогоднішній день більша частина теплоенергетичного обладнання України відпрацювала призначений заводський ресурс, фізично та морально застаріла. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є здійснення його модернізації з впровадженням сучасного паливовикористовуючого обладнання. Визначальним напрямком в цій ситуації є орієнтація на вітчизняні технології,

які відрізняються від імпорتنих аналогів за рахунок кращої адаптованості до вітчизняного обладнання, а також більш сприятливою ціною політикою вітчизняних виробників.

Модернізація енергетичних котлів із встановленням сучасних пальників та автоматики, а також надійної запірно-регулюючої арматури є логічним кроком на шляху підвищення ефектив-

ності енерговикористання та культури експлуатації. Пальники на ТЕЦ в Україні здебільшого вдвічі відпрацювали проектний заводський ресурс та давно пережили момент морального зношування. Необхідно також враховувати і екологічні аспекти, що є критичним для сучасного паливовикористовуючого обладнання. Здатність прогнозувати емісії шкідливих речовин за різних умов експлуатації є важливим завданням для дотримання норм охорони навколишнього середовища.

На хвилі прагнення України інтегруватися в Європейський Союз [1] у нашій країні посилилися вимоги до екологічних параметрів роботи об'єктів, які використовують викопне паливо. Під впливом запровадження нормативно-правових документів (наприклад, Наказу Міністерства охорони навколишнього природного середовища України № 541 від 22.10.08 «Про затвердження технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин із теплосилових установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт» [2]), відповідно до Директиви 2010/75/ЄС [3], перед підприємствами стоїть завдання модернізації існуючих виробництв із впровадженням установок на викопних паливах з мінімальною кількістю викидів забруднюючих речовин та із застосуванням екологічно чистих джерел енергії. Ці питання вимагають комплексного підходу, який включає в себе не лише технічні рішення, але й стратегічне планування, інновації та співпрацю між галузевими гравцями та владою. Розв'язання цих проблем може значно покращати стан паливовикористовуючого обладнання та його відповідність сучасним стандартам.

Над рішенням згаданих вище проблем плідно працюють багато вчених та наукових організацій. Інститутом газу НАН України свого часу були розроблені котли з двосвітними екранами типу ТВГ-8 (ТВГ-8М), КВГ-7,56, КВГ-4,65 та інші потужністю 4–10 МВт, яких встановлено в Україні більше декількох тисяч, та подові щільніні пальники 3-го покоління, які забезпечують утворення та викиди оксидів азоту у відповідності до директиви ЄС для існуючих котлів середньої потужності [4, 5].

Реконструкцією вогнетривкого обладнання також займається ТОВ «Виробниче об'єднання “Струменеві-пішева технологія”». Здійснена модернізація великої кількості паливовикористовуючого обладнання України та зарубіжжя. Перевер-

нені за рахунок малозатратної модернізації міських тепломереж у містах Житомир, Луганськ, Алчевськ, Івано-Франківськ та інших. Основна наукова діяльність компанії пов'язана з розробкою нових типів пальників, робота яких спричинятиме найменше екологічне навантаження на навколишнє середовище.

Одним з методів зниження емісії шкідливих речовин є застосування пальникового пристрою зі збільшенням числа зон горіння, кожна з яких оптимізується на певний режим роботи. При цьому для забезпечення перспективних норм щодо емісії шкідливих речовин необхідно створення пальника, який би надав можливість одночасно знизити усі види шкідливих компонентів. Встановлено, що тільки в дуже вузькому діапазоні температур 1650–1900 К можна одночасно домогтися необхідних рівнів викидів NO_x та CO [6].

На сьогоднішній день технічна надійність та довговічність обладнання забезпечуються використанням сучасних комп'ютерних програм на етапі проектування. Наприклад, за допомогою ANSYS CFD [7] можливе докладне та максимально точне моделювання найскладніших процесів, пов'язаних із фізикою рідини та газу. Користувачі можуть вирішувати різні завдання, враховуючи в'язкі та турбулентні течії, зовнішнє обтікання, аналіз шумових характеристик, багатозанні течії, теплообмін, горіння, хімічні реакції та багато іншого. В ANSYS FLUENT вбудовані різні моделі хімічних реакцій, які дають можливість моделювати горіння як рідких та газоподібних, так і твердих видів палива. При виконанні цих розрахунків є можливість використовувати моделі дифузійного полум'я, горіння змішаних фракцій та реакцій між газовими середовищами та твердими тілами. Спільне моделювання горіння з моделями турбулентності дає можливість прогнозувати розвиток, інтенсивність та гасіння полум'я.

Аналіз робіт іноземних авторів свідчить, що з 2000-го року більшість науково-дослідних робіт виконана за допомогою комп'ютерного моделювання. Автори доводять, що комп'ютерне моделювання дає можливість коректно вивчити режими роботи та оптимізувати як знову проєктоване, так і реконструйоване енергетичне обладнання, проте слід пам'ятати, що одночасне використання комп'ютерного моделювання та фізичного експерименту дає можливість здобути найбільш повну та достовірну інформацію про предмет дослідження. При цьому суттєво скорочуються ви-

трати на виконання експериментальних та дослідних робіт, наприклад, щодо комп'ютерного моделювання одного з найрозповсюдженіших в Україні парового котла ДКВр 4-13 [8].

Проблема об'єктивної оцінки досконалості топкових та палинкових пристроїв сучасних котлів малої та середньої потужності особливо загострилася в останні два десятиліття. Однією з причин стало інтенсивне поширення котлів конденсаційного типу та посилення їхньої конкуренції з традиційними котлами на ринках збуту. Чисельне моделювання процесів горіння палива навіть у паливнях, де факели достатньо віддалені один від одного, становить певні труднощі. Одна з важливих труднощів — складність встановлення набору елементарних стадій радикально-ланцюгового механізму термоокислення горючих газів, близького до набору реакцій, що мають місце в реальних процесах паливні. У цьому напрямі останнім часом реалізуються досить просунуті чисельні моделі, аж до прямого моделювання гідродинаміки із докладною кінетикою реакцій горіння [9, 10]. Однак для виконання розрахунків у масштабах більших за товщину зони горіння використовуються значно менш точні розрахунки. У [11–13], наприклад, розглядаються умови чисельного моделювання процесів спалювання палива в топках досить габаритних печей та котлів.

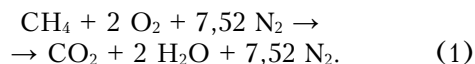
Моделюванню робочих процесів в топці парового водотрубного котла ДЕ-10-14 з метою пошуку шляхів зниження оксидів азоту присвячена робота [14]. Вона свідчить, що на утворення шкідливих викидів впливають надлишок повітря, пірометричний рівень в топковій камері, час знаходження палива та окислювача в зоні високих температур. У роботі використовувався паливник ГМГ-7 продуктивністю 728 м³/год природного газу, який реалізовував вихрову структуру факела з можливістю зміни його протяжності. Проте автори надають дані про викиди оксидів азоту з паливни котла та мало уваги приділяють процесам, що відбуваються саме в паливнику.

Найбільш близькою до тематики роботи є стаття [15], де автори, використовуючи ANSYS FLUENT, виконали чисельне та математичне моделювання процесів горіння та утворення NO_x у топці на різних навантаженнях при спалюванні природного газу в котлі ГМ-50-14-250. Однак використаний паливник ГМГ-5,5 потужністю 5,5 МВт з витратою природного газу 590 м³/год не є типовим для цього котла, оскільки при загальній

витраті природного газу на котел 4500 м³/год необхідно близько 8 таких паливників, а в базовій конструкції котла передбачено лише 4 паливники (місця для 4-х паливників), які встановлені по 2 на бокових стінках паливни [16].

Аналіз доступної літератури свідчить, що прогнозуванню утворення оксидів азоту при спалюванні природного газу в струменево-нішевому стабілізаторі полум'я приділялося мало уваги. Наявність широкого промислового впровадження та постійне підвищення вимог щодо екологічності обладнання потребує більш глибокого вивчення закономірностей екологічних характеристик вищеозначених паливників, у тому числі з використанням методів математичного моделювання.

Метою роботи [17] було випробування фізичної адекватності моделей, що приймаються далі в солвері (турбулентність, спалювання, граничні умови та початкові значення параметрів досліджуваних процесів) при порівняно невеликому обчислювальному ресурсі. Експортована в солвер модель [17] адаптована до усунення сіткової залежності (тобто знайдено рішення, що незалежне від щільності розрахункової сітки). У процесорі заданий тип газоповітряної суміші «Material Туре» (повітря + метан), встановлені початкові характеристики та граничні умови: початкова швидкість повітря $w = 2,18$ м/с, витрата $G = 0,67$ м³/с, температура суміші на виході з газової рампи 292 К. Співвідношення витрати метану з повітрям прийнято з розрахунку 1 : 10 (значення коефіцієнта надлишку повітря близько 1,05). Це відповідає масовому співвідношенню газу та повітря 1 : 18 та початкової масової концентрації метану в суміші 5,25 %. Процес горіння моделювався як перенесення компонентів (Species Transport). Дана модель має широке застосування щодо полум'я без та з попереднім перемішуванням палива та повітря [17]. Розрахунки горіння виконувалися відповідно до моделі розсіювання вихорів (Eddy-dissipation) за одноступінчастою реакцією окислення метану в повітрі до кінцевих продуктів без прогнозування утворення NO_x:



Рух потоку прийнято також турбулентним, модель турбулентності k – ϵ . Використано також і модель випромінювання Rosseland.

Отримані в результаті розрахунків поля швидкостей та температур, а також лінії току дали мож-

ливість зробити висновок про відсутність фізичної неадекватності побудованої та розрахованої моделі за теплотехнічними та аеродинамічними характеристиками.

Зроблений аналіз доступної літератури свідчить, що як в Європі, так і в Україні достатньо багато паливовикористовуючого обладнання, що орієнтоване на спалювання природного газу та яке потрібно модернізувати. Найдешевшим способом визначення перспективи модернізації обладнання є комп'ютерне моделювання процесів, що можуть мати місце до або після модернізації.

Аналіз публікацій дає можливість виділити загальні риси вже існуючих комп'ютерних моделей паливовикористовуючого обладнання ТЕЦ, щоб їх притримуватися при розробці майбутніх моделей:

- процес горіння дослідники [8–13, 17–19] зазвичай виконують за допомогою моделі перенесення компонентів (Species Transport). Дана модель має широке застосування щодо полум'я без та з попереднім перемішуванням палива та повітря;

- найбільш популярною для розрахунків паливовикористовуючого обладнання є k-ε модель турбулентності зі стандартними пристінковими функціями;

- у всіх наведених з доступної літератури роботах для моделювання розрахункової області паливни котла використана гібридна розрахункова сітка з лінійним розміром елементів близько 5 мм;

- у випадку, коли у паливнях котлів газоповітряна суміш проходить до зони запалення через велику кількість дрібних отворів жарової сітки та фронт горіння розбивається на безліч невеликих факелів, то пальникову насадку моделюють як пористе тіло. Для цього у препроцесорі будуються дві циліндричні зони (interior), простору між якими були задані властивості пористої речовини [10].

Обов'язково потрібно прогнозувати емісії шкідливих речовин при різних умовах експлуатації для дотримання норм охорони навколишнього середовища.

Опис CFD-моделі котла ГМ-50-1А

Для створення моделі котельного агрегату автори скористалися загальним описом котла ГМ-50-1 (Е-50-3,9-440ГМ) [16]. Його характеристики наведено нижче:

Тип котла	— ГМ-50
Номинальна паропродуктивність	— 50 т/год
Робочий тиск в барабані котла	— 44 кгс/см ²
Робочий тиск на виході з пароперегрівача	— 40 кгс/см ²
Температура перегрітої пари	— 440 °С
Температура живильної води	— 140 °С
Температура газів, що відходять	— 160 °С
Температура гарячого повітря	— 190 °С
Вид палива	— метан

Перед виконанням числових розрахунків за допомогою пакету прикладних програм ANSYS-CFX необхідно визначити розрахункову область, що є топковою камерою парового котла. Паливня є об'ємним паралелепіпедом, обшитим по площині стін парогенеруючими трубами, та призначається для факельного спалювання палива. На фронтівій стіні паливні розміщено вихрові пальники, через які газоподібне паливо подається в паливню. Введення палива в топку здійснюється за допомогою дифузійних вихрових пальників з тангенційним підведенням повітря, розташованих на бічних стінах паливни. Подача в топку необхідного для горіння повітря здійснюється за допомогою дуттєвого вентилятора. Перевагами таких пальників є простота у виготовленні, безшумність роботи, висока стійкість горіння.

У даній роботі для моделювання процесу горіння в паливни котла ГМ-50-1А в середовищі CFX використана хімічна модель скінченної інтенсивності (finite-rate chemistry model). Згоряння моделювалося з використанням загального однокрокового механізму реакції (one-step reaction mechanism), яка буде визначатися стехіометричними коефіцієнтами, ентальпіями реагентів та параметрами, від яких залежить ступінь реакції. Ступінь реакції визначалася з припущення, що турбулентне перемішування реагентів є фактором, який обмежує швидкість реакції. Турбулентно-хімічна взаємодія (turbulence-chemistry interaction) моделювалася з використанням моделі вихорової дисипації (eddy-dissipation model).

У даній роботі моделювання реакції здійснено за допомогою моделі перенесення реагентів (species transport model).

Скінченно-елементна сітка моделі (рис. 1) враховувала розвиток примежового шару на поверхнях стінок пальників та паливни котельного агрегату. Область поза примежовим шаром моделювалася за допомогою нерівномірної тетраедричної сітки. При цьому скошеність (Skewness) не пе-

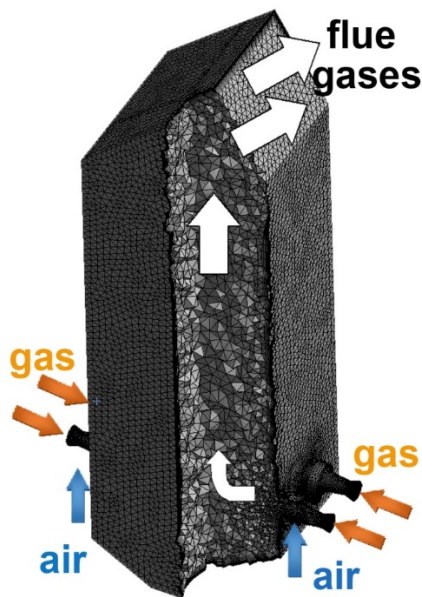


Рис. 1. Зовнішній вигляд з розрізом скінченно-елементної сітки із зображенням руху потоків газів.

Figure 1. External view with a section of the finite-element mesh with an image of the movement of gas flows.

ревищувала 0,8, а співвідношення сторін (Aspect Ratio) кінцевих елементів не перевищувало 40.

У даній роботі відстань між сусідніми вузлами сітки регулювалася параметром Relevance Center зі значенням Fine, що визначає найвищу щільність сітки. Розмір елементів сітки задавався в полі Element Size параметром Relevance Center. Поеднання структурованої та неструктурованої розрахункових скінченно-елементних сіток здійснювалося за допомогою методу MultiZone.

У результаті налагоджувальних експериментів було знайдено значення щільності розрахункової сітки, яке не впливає на рішення.

Комп'ютерна модель спалювання газоподібного палива в середовищі програмного комплексу ANSYS містить рівняння нерозривності, осереднені по Рейнольдсу рівняння збереження енергії, імпульсу та маси (Нав'є-Стокса), а також рівняння переносу i -го компонента суміші. Для замикання осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса використовувалася Realizable k - ϵ модель турбулентності. Як керуючі рівняння використовуються система рівнянь нерозривності, Нав'є-Стокса для течії в'язкої рідини, що стискається, зі змінними властивостями, рівняння енергії та збереження компонентів суміші [20].

Засобами ANSYS FLUENT розраховуються рівні термічних та швидких NO_x . Модель враховує турбулентно-хімічну взаємодію компонентів та дає можливість обчислювати рівні NO_x з урахуванням впливу турбулентних пульсацій при осередненій за часом швидкості реакції. Для прогнозування концентрації радикала O , необхідного для прогнозування температурних NO_x , використовується модель часткової рівноваги.

Як граничні умови стінці котельного агрегату задавався нерівномірний розподіл температури, що змінювався за лінійним законом — від температури теплоносія в нижньому роздатковому колекторі до температури, яку має теплоносії перед входом в барабан котла. На вході в пальник задавалася масова витрата газу, що відповідає штатній витраті газу для котла ГМ-50-1 (4500 $\text{m}^3/\text{год}$). Витрата окислювача розраховувалася відносно значення коефіцієнта надлишку повітря $\alpha = 1,2$. На виході з паливни враховувалося, що всі потоки, які потрапили в паливню крізь пальники, полишають її крізь вікно фєстону (див. рис. 1).

Тепловий стан котельного агрегату формується завдяки гідродинамічній структурі потоку, яка, в свою чергу, сформована гідродинамічною взаємодією струменів потоку газу, на який накладається обертальний рух потоку повітря. Після запалення газо-повітряної суміші факели розжареного газу направляються назустріч один одному.

Найбільш інтенсивний процес перемішування газу та первинного повітря спостерігається в пальнику. Закручений равликом потік повітря захоплює в свій обертний рух струмінь потоку газу, що рухається перпендикулярно до поздовжньої осі пальника, а потім розвертається по напрямку руху повітря. Про інтенсивність процесу перемішування свідчить параметр Mixture Fraction (рис. 2). Цей параметр найбільш повно характеризує ступінь змішування палива й окислювача (наприклад, у прореагованому полум'ї). Значення 0 відповідає 100 % окислювача, а значення 1 відповідає 100 % палива. Як свідчить рис. 2, незмішаний з повітрям потік газу існує тільки на короткій ділянці конфузору пальника. У дифузорі струмінь потоку газу починає розчинятися в оточуючому повітрі, а по довжині, що відповідає ширині патрубка равлика, повністю перемішується з оточуючим його повітрям. Зона перемішеного з повітрям газу опосередковано зображає форму факела розжарених газів (див. рис. 2),

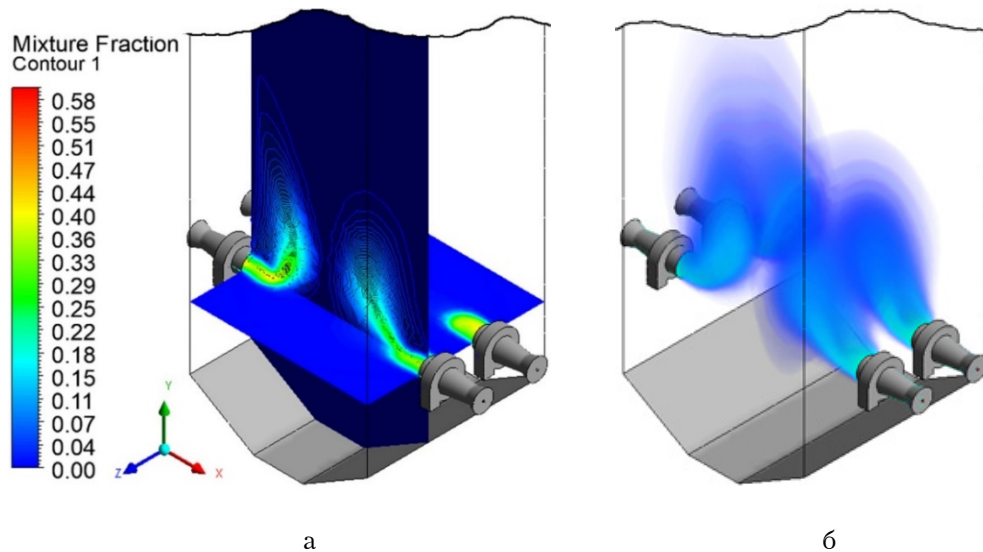


Рис. 2. Значення параметра Mixture Fraction в поздовжньому та поперечному перерізі крізь пальники (а) та зображення розподілу Mixture Fraction в об'ємі паливні (б).

Figure 2. The value of the Mixture Fraction parameter in the longitudinal and transverse sections through the burners (a), and the image of the Mixture Fraction distribution in the volume of the fuel tank (b).

оскільки саме в цій області власне і відбувається реакція хімічної взаємодії метану з киснем.

На рис. 3 наведено розподіл теплових потоків на стінках котельного агрегату. Очевидно, що найбільше теплове напруження спостерігається в області розташування пальників.

Якщо розглядати грані паливні окремо, то можна чітко виділити області з максимальним тепловим навантаженням. Рис. 3 свідчить, що спостерігається деяка асиметрія в розподілах теплових потоків на задній та на фронтальній гранях паливної котельного агрегату.

Аналіз наведених на рис. 3,а даних дає можливість зробити висновок, що факел від пальників, розташованих на фронтальній стінці, притиснутий до неї, а факели від пальників задньої стінки направлені до центру паливни та деформують поле температур в центрі паливни. Шкала значень теплових потоків змінюється в діапазоні 30–380 кВт/м². Саме така шкала дала можливість відокремити проекції факелів на грані паливни.

Рис. 3, б також свідчить, що розподіли теплових потоків на бічних гранях паливни котельного агрегату майже однакові та не перевищують 300 кВт/м². Зони з максимальним тепловим напруженням є проекцією рухомого потоку розжарених димових газів на вихід з паливни.

Про конфігурацію факела полум'я та напрям поширення димових газів в центрі паливни більш

красномовно свідчить розподіл температур (рис. 4). Зроблені раніше висновки про домінуючий характер пальників, які розташовувалися на задній стінці, підтверджено розподілом температури в об'ємі паливни (рис. 4, а). Згаданий домінуючий характер виражається в тому, що їхні факели мають більшу протяжність та ширину, що призводить до притискання факелів полум'я від пальників фронтальної стінки до її поверхні, як показано на рис. 4, а. Це ж показано і на рис. 4, б, де температура потоків димових газів зображена на плоскій площині. Як перерізи, на яких показана візуалізація поля температур паливни, вибрано поздовжній переріз, який проходить по центру пальників.

Відомо, що результати комп'ютерного моделювання необхідно верифікувати з експериментальними або надійними теоретичними даними. Для розрахунку теплообміну та гідродинаміки в топці таких котлів вже існують перевірені часом розрахункові методики [21]. З огляду на специфіку задачі, найбільш адекватним параметром для верифікації розробленої CFD-моделі буде розрахована за методикою [19] температура на виході з паливни. Розрахунок з аналітичними залежностями Нормативного методу розрахунку котельних агрегатів, який здійснювався безпосередньо перед виконанням чисельного моделювання, свідчить, що середня температура димових

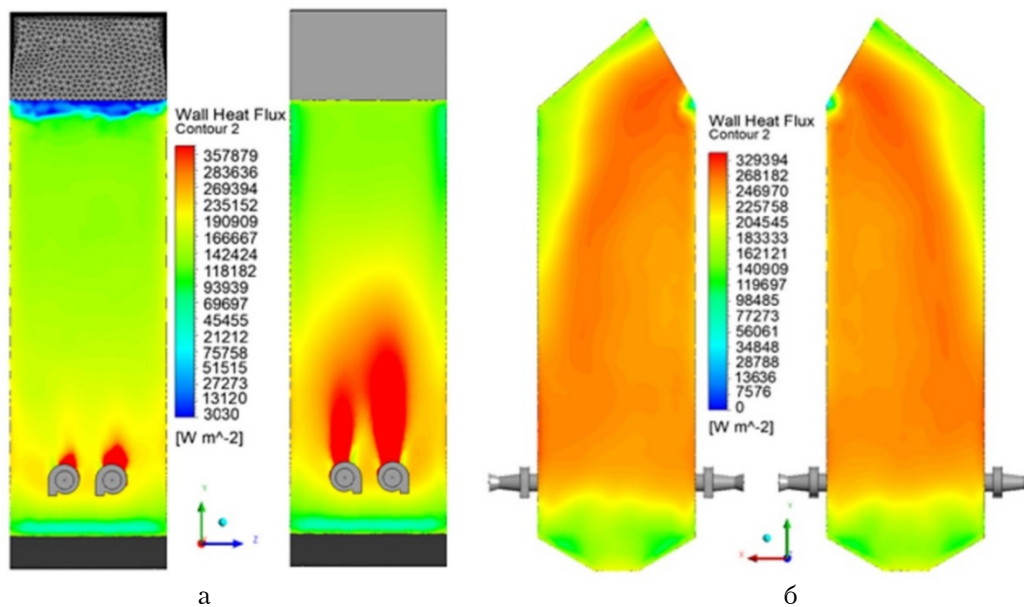


Рис. 3. Розподіл теплових потоків на задній та фронтальній (а), правій та лівій (б) відносно фронтальної бічних стінках котельного агрегату.

Figure 3. Distribution of heat flows on the rear and front (a), right and left (b) relative to the front side walls of the boiler unit.

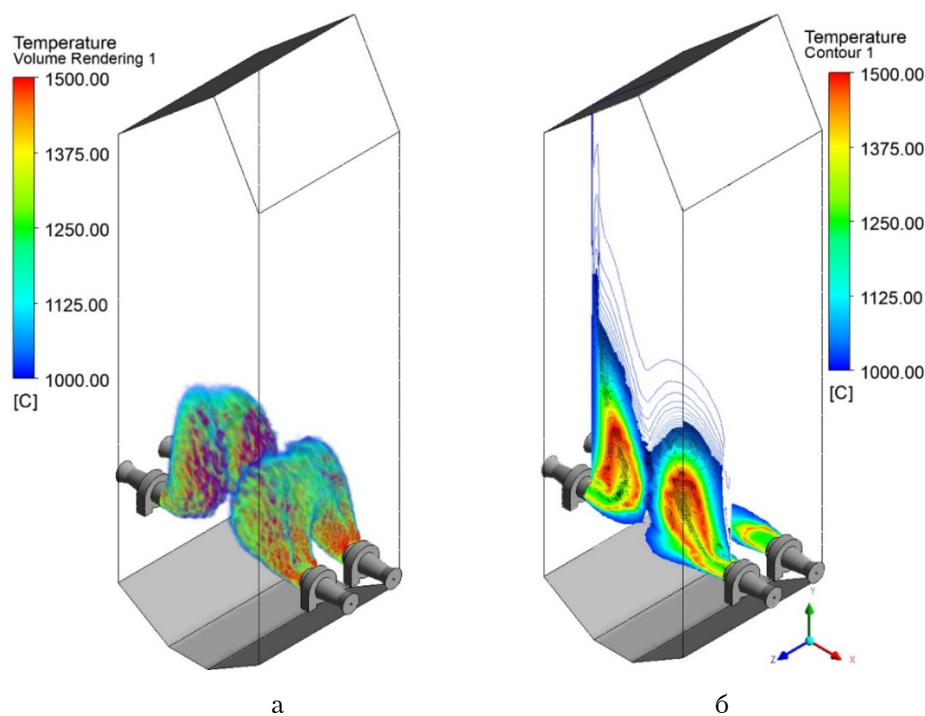


Рис. 4. Розподіл температур в об'ємі (а) та в плоских перерізах відносно центрів пальників паливні (б) котельного агрегату.

Figure 4. Temperature distribution in the volume (a) and in flat sections relative to the centers of the fuel burners (b) of the boiler unit.

газів у вікні фесто́на має становити 1117 °С. Розрахунок засобами CFD-моделі, яка розроблена в середовищі ANSYS-CFX, свідчить, що це значення має становити 1042 °С. Розбіжність у цьому випадку становить 6,7 %

Розподіл оксидів азоту NO_x , наведений на рис. 5, свідчить, що максимальна концентрація забруднюючих речовин спостерігається в зонах високих температур. Це не суперечить існуючим уявленням про генерацію в паливні котла оксидів азоту. Оскільки в даній роботі коефіцієнт надлишку повітря становить 1,2, максимум інтенсивності генерації NO_x зміщується на кінець факела. Аналіз даних рис. 5 дає можливість зробити висновок, що створені в зоні дії високих температур оксиди азоту не руйнуються та з паливні потрапляють у конвективну шахту котельного агрегату. Якщо не застосовувати заходи з очистки димових газів (промислові технології азотоочищення димових газів гуртуються на відновленні NO_x до молекулярного азоту N_2 — це селективне каталітичне та некаталітичне відновлення, які ґрунтуються на хімічній реакції NO_x з аміаком NH_3 або аміакопохідною речовиною, наприклад, кар-

бамідом, що вводиться у потік димових газів [22]), буде відбуватися перевищення допустимих питомих викидів NO_x до атмосфери [22].

Розподіл утворення NO_x в паливні обчислювався у вигляді кількості частин на мільйон (проміле) — NO [ppm]. У даній роботі NO [ppm] обчислювався за допомогою рівняння (сухі газ):

$$\text{NO ppm} = \frac{\text{NO mole fraction} \times 10^6}{1 - \text{H}_2\text{O mole fraction}}. \quad (2)$$

Для того, щоб зробити висновок про доцільність подальшої заміни штатних пальників на більш сучасні, визначено середнє значення оксидів азоту на виході з паливні (рис. 6, а), що становить 187 ppm. Це значення достатньо узгоджується з результатами експериментального дослідження, отриманими службою енергоресурсів ПАТ «Київенерго» [15] (рис. 6, б). Експеримент [15] свідчить, що середнє значення оксидів азоту на виході з паливні котла ГМ-50 має становити 280 ppm при номінальному навантаженні. Зазначені відхилення між даними CFD моделювання та експериментом ПАТ «Київенерго» можуть бу-

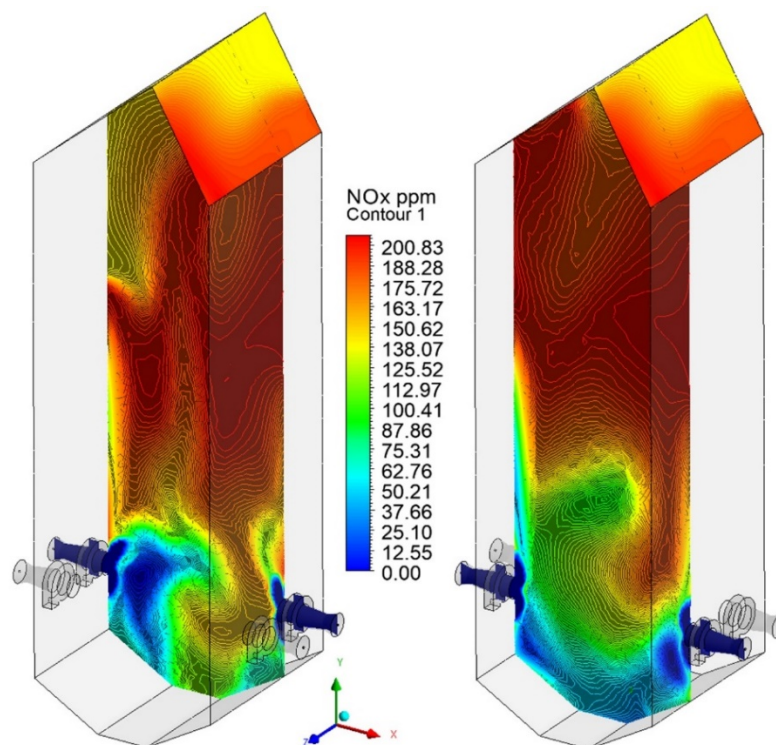
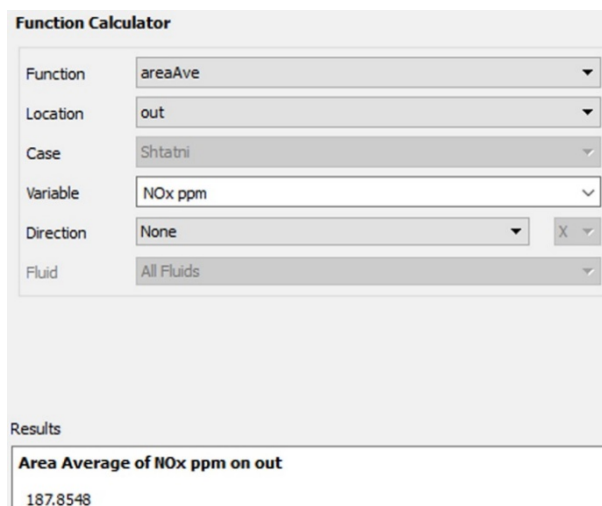
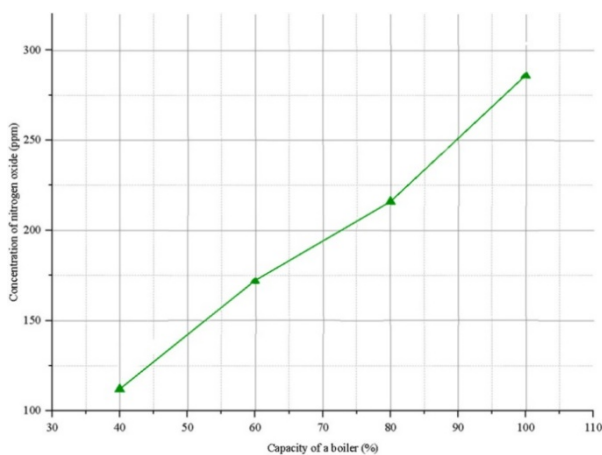


Рис. 5. Розподіл оксидів азоту в об'ємі паливні у двох поперечних перерізах крізь пальники.

Figure 5. Distribution of nitrogen oxides in the fuel volume in two cross-sections through the burners.



а



б

Рис. 6. Осереднене по площі вихідного перерізу з паливної котла значення NO_x (а) та графік залежності концентрації NO_x (б) на виході з паливної в залежності від потужності котла [15].

Figure 6. The NO_x value (a) averaged over the area of the exit section from the boiler fuel tank and the NO_x concentration graph (b) at the outlet of the fuel tank depending on the boiler power [15].

ти наслідком відмінності в граничних умовах, що задаються, а також у тому, що автори [15] не вказали, при якому коефіцієнті надлишку повітря виконані їх дослідження.

Вважаємо, що використання пальників, побудованих на основі струменево-нішевої технології, у такому типі котла є найбільш перспективним через низький рівень викидів оксидів азоту, що отримано на лабораторних стендах [23, 24].

Висновки

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання процесів спалювання метану в паливній парового котла ГМ-50-1А з використанням пакета програм ANSYS надав можливість зробити наступні висновки.

На основі аналізу літератури встановлено, що в Україні достатньо багато паливовикористовуючого обладнання, що орієнтоване на спалювання природного газу та яке потрібно модернізувати. Найдешевшим способом визначення перспективи модернізації обладнання є комп'ютерне моделювання процесів, що можуть мати місце до або після модернізації. Згідно літератури визначено, що своєрідним стандартом комп'ютерних моделей паливовикористовуючого обладнання ТЕС є застосування моделі перенесення компонентів (Species Transport). Дана модель має широке застосування щодо полум'я без та з попереднім перемішуванням палива та повітря. Найбільш популярною для розрахунків вогнетехнічного обладнання є k-ε модель турбулентності зі стандартними пристінковими функціями.

Верифікація CFD-моделі, яка здійснювалася з використанням відомої аналітичної методики, свідчить, що розбіжність значень аналітичних розрахунків та розрахунків моделі не перевищує 6,7 %. Як параметр порівняння вибрана середня температура димових газів у вікні фєстона. Аналітично отримано значення 1117 °C. Розрахунок засобами CFD-моделі, яка розроблена в середовищі ANSYS-CFX, свідчить, що це значення має становити 1042 °C.

Встановлено, що штатні пальники котла ГМ-50-1 є такими, що не відповідають нормам щодо викидів оксидів азоту, та пропонується їх заміна на струменево-нішеві.

Як загальний висновок можна констатувати, що комп'ютерне моделювання дає можливість виконувати попередню, досить точну оцінку емісійних характеристик паливовикористовуючого обладнання при спалюванні газоподібних палив.

Список літератури

1. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони : Закон України № 1678-VII від 16.09.2014. — https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text (Дата звернення: 10.05.2024).
2. Про затвердження технологічних нормативів до-

пустимих викидів забруднюючих речовин із теплосилових установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт : Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 22.10.2008 р. № 541. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1110-08> (Дата звернення: 10.05.2024).

3. Directive 2010/75/EU of the European parliament and of the council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control): *Official Journal of the European Union*. 2010. 17 December. 119 p. — <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0075> (Дата звернення: 10.05.2024).

4. Лавренцов Є.М., Сігал І.Я., Сміхула А.В., Домбровська Е.П., Кернажицька О.С., Марасін А.В. Досвід розробки, впровадження та модернізації водогрійних котлоагрегатів з двосвітними екранами та щільними подовими пальниками. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2019. № 3. С. 17–26. DOI: 10.33070/etars.3.2019.02.

5. Directive (EU) 2015/2193 of the European parliament and of the council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants : *Official Journal of the European Union*. 2015. 28 November. 19 p. — <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L2193> (Дата звернення: 10.05.2024).

6. Абдулін М.З., Дворцин Г.Р., Тепляков І.Б., Строкин В.Н. Горелочное устройство на основе саморегулирующейся системы смесеобразования и стабилизации пламени. *Труды IV Международной научнотехнической конференции «Комплексная автоматизация промышленности»*. 1990. С. 12–16.

7. ANSYS. Найкращі інструменти для інженерних розрахунків. — <https://www.ansys.soften.com.ua> (Дата звернення: 10.05.2024).

8. Кобзарь С.Г., Халатов А.А. Снижение выбросов оксидов азота в газовых котлах методом рециркуляции дымовых газов. *Промышленная теплотехника*. 2009. Т. 31, № 4. С. 5–11.

9. Aspden A.J., Day M.S., Bell J.B. Three-dimensional direct numerical simulation of turbulent lean premixed methane combustion with detailed kinetics. *Combust Flame*. 2016. № 166. P. 266–283.

10. Wang H., Hawkes E.R., Savard B., Chen J.H. Direct numerical simulation of a high Ka CH₄/air stratified premixed jet flame. *Combust. Flame*. 2018. Vol. 193. P. 229–245.

11. Chen W., Liu G. Numerical Investigation on the Flow, Combustion and NO_x Emission Characteristics in a 10 MW Premixed Gas Burner. *The Open Fuels & Energy Science Journal*. 2015. № 8. P. 1–13.

12. Trisjono P., Kleinheinz K., Kang S., Pitsch H. Large eddy simulation of stratified and sheared flames of a premixed turbulent stratified flame burner using a flamelet model with heat loss. *Flow Turbulence Combust*. 2014. № 92. P. 201–235.

13. Vascellari M., Schulze S., Nikrityuk P., Safronov D., Hasse C. Numerical simulation of pulverized coal MILD combustion using a new heterogeneous combustion sub-model. *Flow Turbulence Combust*. 2014. № 92. P. 319–345.

14. Редько А.А., Давиденко А.В., Павловский С.В., Куликова Н.В., Павловская А.А., Редько И.А. Моделирование рабочих процессов в топке парового водотрубного котла с целью снижения выбросов оксида азота. *Problemele energeticii regionale*. 2017. Т. 1 (33). С. 54–65. DOI: 10.5281/zenodo.1193591.

15. Maksym Lohvyniuk, Yevhen Novakivskyi. CFD modeling of thermal processes in the firebox and heat load distribution on the screen surface firebox. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, № 5. e27324. P. 1–24. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27324.

16. Роддатис К.Ф., Полтарецкий А.Н. Справочник по котельным установкам малой производительности / Под ред. К.Ф. Роддатиса. Москва : Энергоатомиздат, 1989. 488 с.

17. Aspden A.J., Day M.S., Bell J.B. Towards the distributed burning regime in turbulent premixed flames. *Journal of Fluid Mechanics*. 2019. Vol. 871. P. 1–21. DOI: 10.1017/jfm.2019.316.

18. Wu H., Wu J., Li Y., Shen J. Study on the Key Technology of CO₂ Compression and Purification in Oxy-Fuel Combustion Coal-Fired Power Plant. *Energy Fuels*. 2019. Vol. 33, № 4. P. 3349–3356.

19. Wang Ch., Sun R., Liu Ch., Han T., Zhu Ch., Liu Y., Che D. Experimental Study on Morphology and Chemical Composition of Ash Deposition during Oxy-fuel Combustion of High-Alkali Coal. *Energy Fuels*. 2019. Vol. 33, № 4. P. 3403–3420.

20. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide, (2012). ANSYS Inc. ANSYS Help. — <https://ansyshelp.ansys.com> (Дата звернення: 10.05.2024).

21. Туз В.О., Мариненко В.І., Васечко О.О. Розрахунок паливних котельних установок. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2020. 36 с. [Електронний ресурс]. — <https://ela.kpi.ua/items/92a8bce5-c682-47b2-b8b4-83ded67405d9> (Дата звернення: 10.05.2024).

22. Вольчин І.А., Дунаєвська Н.І., Гапонич Л.С., Чернявський М.В., Топал О.І., Засядько Я.І. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України. Київ : ГНОЗІС, 2013. 308 с.

23. Сірий О.А., Абдулін М.З., Баранюк О.В. Дослідження гідродинаміки потоку повітря в струменево-нішевій системі спалювання палива. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2016. № 9. С. 94–100. DOI: 10.20998/2078-774X.2016.09.14.

24. Сірий О.А. Вплив параметрів струменево-нішевої системи на робочий процес паликових пристроїв : Дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14. Київ, НТУУ “КПІ”, 2016. 183 с.

Надійшла до редакції 26.05.2024

Chernousenko O.Yu.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,
 ORCID: 0000-0002-1427-8068, **Rachynskiy A.Yu.¹**, Candidate
 of Technical Sciences, ORCID: 0000-0001-6622-1517, **Baranyuk O.V.^{1,2}**,
 Candidate of Technical Sciences, ORCID: 0000-0003-0610-1403

¹ **National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**
 37, Beresteyskiy Ave., 03056 Kyiv, Ukraine, e-mail: chernousenko20a@gmail.com

² **Institute of Thermal Energy Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine**

19, Andriivska Str., 04070 Kyiv, Ukraine, e-mail: arturrachinskiy@gmail.com

CFD Modeling of the GM-50 (E-50-3.9-440GM) Boiler Furnace

Abstract. The main purpose of the work is to analyze the feasibility of replacing standard burners with burners that operate using jet niche technology burners in power boilers, such as the GM-50 steam boiler (E-50-3.9-440GM). To achieve this goal, a computer model of the steam boiler and burners was built. The study was conducted using the ANSYS Student software suite. The application of numerical modeling methods using the ANSYS Student software suite allowed for a detailed analysis of the fuel combustion process in the steam boiler, evaluate its efficiency, and examine its impact on environmental indicators. The object of the study is the processes occurring during the combustion of gaseous fuel and their impact on the performance indicators of the GM-50 power boiler. The subject of the study is the CFD model of the fuel boiler GM-50, whose standard burners are capable of operating on both liquid and gaseous fuel. Methane was used as the fuel, and both standard axial burners and jet niche technology burners were used, which are more environmentally friendly. Verification of the CFD model, which was performed using a known analytical method, indicates that the discrepancy between the analytical calculations and the model calculations does not exceed 6.7 %. The average temperature of the flue gases in the “festoon window” was chosen as the comparison parameter. Analytically, the temperature value was obtained to be 1117 °C. The calculation using the CFD model, developed in ANSYS-CFX, indicates that the temperature value should be 1042 °C. It was determined that standard burners are less environmentally friendly than, for example, modern jet niche technology burners. For an air excess coefficient $\alpha = 1.2$, the average value of nitrogen oxides at the outlet from the burner is 187 ppm. There is sense in replacing standard burners, for example, with jet niche technology burners, which are the most suitable for replacing standard ones. *Bibl. 24, Fig. 6.*

Keywords: combustion, boiler, CFD modeling, hydrodynamic interaction, flame, NO_x, heat flow.

References

1. [Association Agreement between Ukraine, on the one hand, and the European Union, the European Atomic Energy Community and their member states, on the other hand : Law of Ukraine No. 1678-VII of 16.09.2014]. — https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text (Date of application: May 10, 2024). (Ukr.)
2. [On the approval of technological standards for permissible emissions of pollutants from thermal power plants, the nominal thermal power of which exceeds 50 MW : Order of the Ministry of Environmental Protection of Ukraine dated 10/22/2008 No. 541]. — <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1110-08> (Date of application: May 10, 2024). (Ukr.)
3. Directive 2010/75/EU of the European parliament and of the council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control): *Official Journal of the European Union*. 2010. 17 December. 119 p. — <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0075> (Date of application: May 10, 2024).
4. Lavrentsov E.M., Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Dombrovskaya E.P., Kernazhitska O.S., Marasin A.V. (2019). Dosvid rozrobky, vprovadzhennya ta moderni-

zatsiyi vodohriynykh kotloahrehativ z dvosvitnyimi ekranamy ta shchilynnymy podovymy pal'nykamy. [Experience in the development, implementation and modernization of water heating boiler units with two-light screens and slotted floor burners]. *Energy Technologies and Resource Saving*. No. 3. pp. 17–26. DOI: 10.33070/etars.3.2019.02. (Ukr.)

5. Directive (EU) 2015/2193 of the European parliament and of the council of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants : *Official Journal of the European Union*. 2015. 28 November. 19 p. — <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L2193> (Date of application: May 10, 2024).

6. Abdulin, M.Z., Dvortsin G.R., Teplyakov I.B., Strokin V.N. (1990). Gorelochnoye ustroystvo na osnove samoreguliruyushcheyssya sistemy smeseobrazovaniya i stabilizatsii plameni. [Burner device based on a self-regulating system for mixture formation and flame stabilization]. *Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference "Integrated Automation of Industry"*. pp. 12–16. (Rus.)

7. ANSYS. The best tools for engineering calculations. [Electronic resource]. — <https://www.ansys.com> (Date of application: May 10, 2024). (Ukr.)

8. Kobzar, S.G., Khalatov, A.A. (2009). Snizheniye vybrosov oksidov azota v gazovykh kotlakh metodom retsirkulyatsii dymovykh gazov. [Reducing nitrogen oxide emissions in gas boilers using flue gas recirculation]. *Industrial Heat Engineering*. 31 (4). pp. 5–11. (Ukr.)

9. Aspden A.J., Day M.S., Bell J.B. (2016). Three-dimensional direct numerical simulation of turbulent lean premixed methane combustion with detailed kinetics. *Combust Flame*. No. 166. pp. 266–283.

10. Wang H., Hawkes E.R., Savard B., Chen J.H. (2018). Direct numerical simulation of a high Ka CH₄/air stratified premixed jet flame. *Combust. Flame*. Vol. 193. pp. 229–245.

11. Chen W., Liu G. (2015). Numerical Investigation on the Flow, Combustion and NO_x Emission Characteristics in a 10 MW Premixed Gas Burner. *The Open Fuels & Energy Science Journal*. No. 8. pp. 1–13.

12. Trisjono P., Kleinheinz K., Kang S., Pitsch H. (2014). Large eddy simulation of stratified and sheared flames of a premixed turbulent stratified flame burner using a flamelet model with heat loss. *Flow Turbulence Combust*. No. 92. pp. 201–235.

13. Vascellari M., Schulze S., Nikrityuk P., Safronov D., Hasse C. (2014). Numerical simulation of pulverized coal MILD combustion using a new heterogeneous combustion sub-model. *Flow Turbulence Combust*. No. 92. pp. 319–345.

14. Redko A.A., Davidenko A.V., Pavlovsky S.V., Kulikova N.V., Pavlovskaya A.A., Redko I.A. (2017). Modelirovaniye rabochikh protsessov v topke parovogo

vodotrubnogo kotla s tsel'yu snizheniya vybrosov oksida azota. [Simulation of operating processes in the furnace of a steam water tube boiler to reduce nitrogen oxide emissions]. *Problemele Energeticii Regionale*. Vol. 1 (33). pp. 54–65. DOI: 10.5281/zenodo.1193591. (Rus.)

15. Maksym Lohvyniuk, Yevhen Novakivskyi. (2024). CFD modeling of thermal processes in the firebox and heat load distribution on the screen surface firebox. *Heliyon*. 10 (5). e27324. P. 1–24. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27324.

16. Roddatis K.F., Poltaretsky A.N. Spravochnik po kotel'nyim ustanovkam maloy proizvoditel'nosti. [Handbook of low-capacity boiler installations]. Ed. K.F. Roddatis. Moscow : Energoatomizdat, 1989. 488 p. (Rus.)

17. Aspden A.J., Day M.S., Bell J.B. (2019). Towards the distributed burning regime in turbulent premixed flames. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 871. P. 1–21. DOI: 10.1017/jfm.2019.316.

18. Wu H., Wu J., Li Y., Shen J. (2019). Study on the Key Technology of CO₂ Compression and Purification in Oxy-Fuel Combustion Coal-Fired Power Plant. *Energy Fuels*. 33 (4). pp. 3349–3356.

19. Wang Ch., Sun R., Liu Ch., Han T., Zhu Ch., Liu Y., Che D. (2019). Experimental Study on Morphology and Chemical Composition of Ash Deposition during Oxy-fuel Combustion of High-Alkali Coal. *Energy Fuels*. 33 (4). pp. 3403–3420.

20. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide, (2012). ANSYS Inc. ANSYS Help. — <https://ansyshelp.ansys.com> (Date of application: May 10, 2024).

21. Tuz V.O., Marynenko V.I., Vasechko O.O. Rozrakhunok palyvni kotel'nykh ustanovok. [Calculation of fuel for boiler plants]. Kyiv: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2020. 36 p. [Electronic resource]. — <https://ela.kpi.ua/items/92a8bce5-c682-47b2-b8b4-83ded67405d9> (Date of application: May 10, 2024).

22. Volchyn I.A., Dunaevska N.I., Gaponych L.S., Chernyavskiy M.V., Topal O.I., Zasyadko Ya.I. Perspektyvy vprovadzhennya chystykh vuhil'nykh tekhnolohiy v enerhetyku Ukrayiny. [Prospects for the introduction of clean coal technologies in the energy industry of Ukraine]. Kyiv : GNOZIS, 2013. 308 p. (Ukr.)

23. Siry O.A., Abdulin M.Z., Baranyuk O.V. (2016). Doslidzhennya hidrodynamiky potoku povitrya v strumenevo-nisheviy systemi spalyuvannya palyva. [Study of the hydrodynamics of the air flow in the jet-niche system of fuel combustion]. *[Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Series: Energy and heat engineering processes and equipment]*. No. 9. pp. 94–100. DOI: 10.20998/2078-774X.2016.09.14. (Ukr.)

24. Siry O.A. (2016). [The influence of jet-niche system parameters on the working process of burner devices: Thesis ... Candidate of Technical Sciences: 05.14.14]. Kyiv : NTUU "KPI". 183 p. (Ukr.)