

МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ ТЕПЛООВОГО НАВАНТАЖЕННЯ КОТЛА Е-50-3,9-440ГМ (ГМ-50) НА ТЕПЛОВІ І ЕКОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Дана стаття присвячена чисельному прогнозуванню емісії забруднюючих речовин у котлоагрегатах типу ГМ-50. Шляхом застосування методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) у середовищі ANSYS проаналізовано взаємозв'язок між режимом роботи пальникових пристроїв та рівнем генерації азотних сполук. В основу предмета дослідження покладено імітаційну модель топки, яка відтворює процеси горіння при різних рівнях потужності. Високий ступінь збіжності результатів (похибка до 6,7%) підтверджено порівняльним аналізом із натурними даними служби енергоресурсів та аналітичними розрахунками. Порівняння проводилося за показником середньої температури продуктів згорання на межі топки та конвективної частини котла.

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

Вступ

Енергетичний фундамент промисловості України складають теплові електростанції, що функціонують у складі об'єднаних енергосистем. Більшість генеруючих потужностей представлена паровими котлами великої продуктивності, що використовують органічне паливо. З огляду на значний ступінь зносу та вичерпання розрахункового ресурсу цього парку агрегатів, критично актуальним стає питання наукового обґрунтування продовження терміну їх експлуатації [1]. У даній роботі досліджується котел типу Е-50-3,9-440ГМ (ГМ-50) у контексті його технологічного оновлення шляхом впровадження високоефективного паливовикористовуючого обладнання [2]. Пріоритет надається вітчизняним розробкам, які, на відміну від іноземних рішень, максимально адаптовані до конструктивних особливостей українських котлів та мають суттєві переваги за критерієм «вартість-ефективність».

Прогнозування емісії токсичних компонентів за різних режимів роботи є обов'язковою умовою дотримання природоохоронного законодавства. Вектор на інтеграцію України до ЄС зумовив суттєве посилення вимог до екологічності енергооб'єктів [3]. Зокрема, Наказ Мінприроди № 541 [4] та Директива 2010/75/ЄС [5] ставлять перед галуззю завдання радикального зниження викидів при спалюванні вихисних палив. Реалізація цих вимог потребує системного підходу, що поєднує інноваційні технічні рішення, стратегічне планування та консолідацію зусиль науки, бізнесу і державних інституцій. Такий підхід дозволить привести існуюче обладнання у відповідність до актуальних міжнародних стандартів.

Вагомий внесок у вирішення зазначених проблем зробили провідні наукові установи, зокрема Інститут газу НАН України. Його фахівцями розроблено серію котлів потужністю 4...10 МВт (ТВГ-8, КВГ-7,56 та інші), яких в Україні налічується понад кілька тисяч, а також впроваджено щільніні подові пальники 3-го покоління. Ці технології забезпечують рівень викидів окислів азоту, що відповідає європейським екологічним лімітам для обладнання середньої потужності [6, 7]. Аналіз світового досвіду показує, що з початку 2000-х років більшість досліджень базується на методах обчислювальної гідродинаміки, зокрема з використанням платформи ANSYS CFD [8]. Сучасний інструментарій дозволяє відтворювати складні фізико-хімічні явища, включаючи пряме моделювання гідродинаміки з деталізованою кінетикою горіння [9, 10]. Проте при переході до розрахунків у промислових масштабах точність моделювання часто знижується. Хоча в літературі описані умови чисельного аналізу горіння у великогабаритних агрегатах [11, 12], невирішеною залишається проблема ідентифікації повного набору елементарних стадій радикально-ланцюгового окиснення газів, який би максимально точно відповідав реальним процесам в паливній топці.

Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є оцінка висоти дзеркала випаровування в сепараційному об'ємі барабана котла ГМ-50 залежно від його потужності. Паралельно вирішується задача чисельного прогнозування вмісту азотних сполук у димових газах, що утворюються в паливній топці при різних рівнях навантаження.

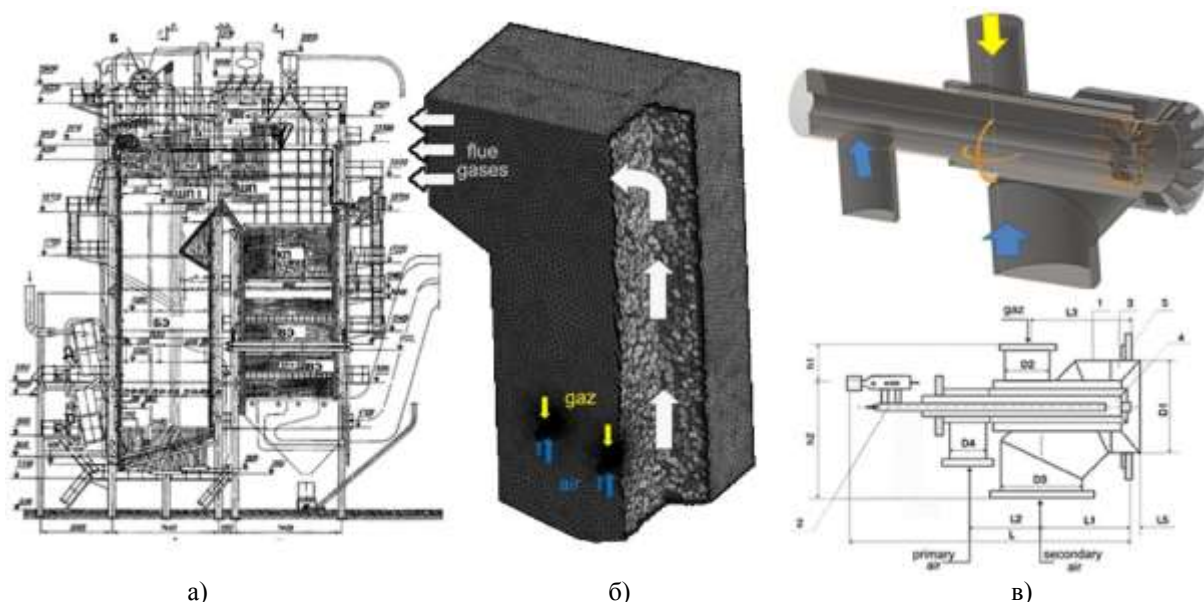
Основні завдання дослідження:

- визначити основні характеристики процесів горіння під час «спалювання» метану в комп'ютерній моделі паливної котла ГМ-50 за допомогою CFD-моделювання ANSYS CFX;
- визначити розподіл температур і теплових потоків по висоті паливної та теплове навантаження на екранні панелі;
- розрахувати локальні швидкості та об'ємні частки пари у вихідних перерізах екранних труб котла ГМ-50, а також визначити фактичні рівні розділу фаз у барабані-сепараторі. Ці параметри безпосередньо впливають на стабільність сольового режиму та якість пари в котельному агрегаті;
- виконати моделювання процесів горіння та утворення окислів азоту у паливній котла при різних навантаженнях;
- запропонувати рекомендації щодо покращення теплового стану екранних поверхонь котла і його екологічних характеристик.

Матеріал і результати досліджень

У вітчизняній теплоенергетиці для покриття пікових навантажень широко застосовуються парові котли з природною циркуляцією моделі Е-50-3,9-440ГМ (ГМ-50) [13, 14]. Дана установка (рис. 1а) спроектована для отримання пари з робочим тиском $P = 4,1$ МПа та температурою перегріву $t = 435$ °С при номінальному виході робочого тіла $D = 48$ т/год. Технологічний цикл передбачає подачу живильної води з температурою 160 °С до економайзера, де за рахунок теплоти димових газів вона нагрівається до стану насичення (254,5 °С). Економайзер виконаний у вигляді змієвикових пакетів, розташованих у конвективній шахті за шаховою схемою, що інтенсифікує тепловіддачу та дозволяє оптимізувати габарити поверхні нагріву. Циркуляційний контур котла базується на різниці густин середовища в опускній системі та обігрівальних екранних трубах. Пароводяна суміш надходить у барабан, де відбувається сепарація фаз. Контроль якості води та солемісту реалізовано через двоступеневу схему випаровування з використанням виносних циклонів. Перегрів пари до заданих параметрів (435 °С) здійснюється у двоступеневому пароперегрівачі, обладнаному впорскувальним пароохолоджувачем для точного регулювання температури. Під час розробки комп'ютерної моделі було використано оригінальну технічну документацію та кресленики агрегату [13, 14].

Для дискретизації розрахункового простору топочної камери (рис. 1б) авторами застосовано гібридну скінченно-елементну сітку, що дозволяє раціонально використовувати обчислювальні ресурси без втрати точності. Налаштування щільності сітки виконувалося через параметр Relevance Center у режимі Fine. Оптимальний розмір елементів (Element Size) було встановлено в результаті попередніх ітерацій моделювання для виключення впливу сітки на кінцевий результат. Геометрія паливної системи відтворює штатні газомазутні вихрові пальники ГМГ-5.5 тепловою потужністю 5,5 МВт (рис. 1в), розміщені на фронтальній стіні котла.



а)

б)

в)

← потік газу; ← потік повітря;

1 – корпус; 2 – форсунка паромеханічна; 3 – завихрювач вторинного повітря; 4 – завихрювач первинного повітря; 5 – плита монтажна.

Рисунок 1 – Поздовжній переріз котла ГМ-50 (а), зображення скінченно-елементної сітки (б) та поздовжній переріз пальника ГМГ-5.5, що використаний в моделі (в)

Чисельна симуляція процесів горіння в середовищі ANSYS базується на розв'язанні системи фундаментальних рівнянь збереження маси (рівняння нерозривності), імпульсу (Нав'є-Стокса) та енергії. Для опису турбулентної структури потоку осереднені за Рейнольдсом рівняння (RANS) замикалися за допомогою моделі Realizable k-ε. Математичний опис також включає рівняння переносу компонентів газової суміші, що враховують змінність теплофізичних властивостей в'язкого робочого тіла, яке стискається [15].

Для оптимізації обчислювальної моделі та спрощення крайових умов, у якості паливного компонента при CFD-моделюванні було обрано метан. Таке рішення базується на тому, що природний газ, який постачається енергогенеруючим підприємствам України, згідно з [16] на 99% складається з CH_4 , а вміст азоту в ньому не перевищує 1%. Порівняльний аналіз теплофізичних характеристик підтверджує правомірність такої заміни: нижча теплота згорання метану ($35,9 \text{ МДж/м}^3$) та природного газу ($35,59 \text{ МДж/м}^3$) відрізняється менш ніж на 1%. Аналогічна подібність спостерігається і в об'ємних показниках продуктів окиснення: для метану цей показник становить $9,41 \text{ м}^3/\text{м}^3$, а для природного газу – $9,44 \text{ м}^3/\text{м}^3$ (відхилення лише 0,3%). В обох розрахункових сценаріях підтримувався ідентичний коефіцієнт надлишку повітря ($\alpha = 1,05$). Наведені дані свідчать про високий ступінь адекватності прийнятого спрощення.

Прогнозування концентрацій термічних та швидких NO_x реалізовано за допомогою програмного інструментарію ANSYS CFX. Використана модель турбулентно-хімічної взаємодії дозволяє враховувати вплив пульсаційної складової швидкості на інтенсивність реакцій усередненого за часом потоку. Для ідентифікації вмісту радикала O, що є ключовим для розрахунку температурних оксидів азоту, застосовано підхід часткової рівноваги (partial equilibrium model). При налаштуванні граничних умов для огорожувальних поверхонь котла було задано лінійний градієнт температур: від значень теплоносія в нижньому колекторі до температури робочого тіла на вході в барабан-сепаратор. Умови на виході з топочного простору визначалися виходячи з принципу неперервності: сумарний потік маси, що надходить через палинкові пристрої, повністю евакуюється через вихідний переріз – «вікно» фестона (рис. 16).

Витрата газу через палиник V_{Γ} автори визначали за формулою, $\text{нм}^3/\text{с}$:

$$V_{\Gamma} = \frac{Q_n}{Q_n^p \cdot N \cdot \eta}, \quad (1)$$

де Q_n – номінальна теплова потужність палиника, кВт; Q_n^p – нижча теплота згорання газу, кДж/нм³; N – кількість однотипних палиників, що приймаються до встановлення з однаковою витратою газу (в представленій роботі використано 4-ри палиники розташованих на фронтальних стінах котла); η – ККД палиника.

Необхідна витрата повітря через палиник розраховувалась за формулою, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V_n = \alpha \cdot V_{\Gamma} \cdot V_n^0, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт надлишку повітря, що подається в топкову камеру. При горінні газового палива прийнятий рівним 1,05; V_n^0 – витрата повітря, необхідна для горіння 1 нм³ газу, $\text{м}^3/\text{нм}^3$:

$$V_n^0 = 0,0476 \left[0,5\text{CO} + 0,5\text{H}_2 + 1,5\text{H}_2\text{S} + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - \text{O}_2 \right], \quad (3)$$

В роботі, навантаження котельного агрегату становило 100, 80, 60 і 40 відсотків від номінального навантаження. Для забезпечення такого навантаження, змінювались витрати газу і повітря, розраховані згідно формул (1 – 3).

Відомо, що результати комп'ютерного моделювання необхідно верифікувати з експериментальними або надійними теоретичними даними. Для верифікації результатів моделювання вибрані дані експериментального дослідження, що отримані службою енергоресурсів ПАТ «Київенерго», Україна [17]. Це розподіл температур і емісія оксидів азоту в паливній котла.

На рис. 2 зображено температурне поле центрального поздовжнього перерізу паливни в залежності від навантаження котельного агрегату. На рис. 3 показано зміну температури димових газів в зоні активного горіння та в зонах горіння основного палива в залежності від висоти паливни.

Зіставлення отриманих даних із результатами натурних випробувань [17], наведених на рис. 3, підтверджує високу достовірність розробленої моделі. У зоні інтенсивної генерації теплоти та у вихідному перерізі топочної камери розбіжність температурних показників не перевищує 3%. Найбільша відповідність (похибка менше 1%) зафіксована у нижньому ярусі топки. Певне відхилення розрахункових значень від експериментальних (до 10%) спостерігається на висоті 5–8 метрів, що відповідає зоні завершення хімічних реакцій (допалювання). Така точність є цілком прийнятною, враховуючи використання академічної версії програмного комплексу ANSYS CFX. Слід зазначити, що попри очікувану за експериментальними точками рівномірність температурного поля, як у поточному дослідженні, так і в роботі [17], зафіксовано інтенсивніший відвід теплоти від димових газів саме в зоні допалювання.

Успішна апробація моделі дозволила деталізувати параметри, пряме вимірювання яких експериментальними методами є технічно складним. Зокрема, було ідентифіковано характер розподілу

теплових навантажень на екранованих поверхнях (рис. 4) та візуалізовано геометричну структуру і просторове положення факела (рис. 5).

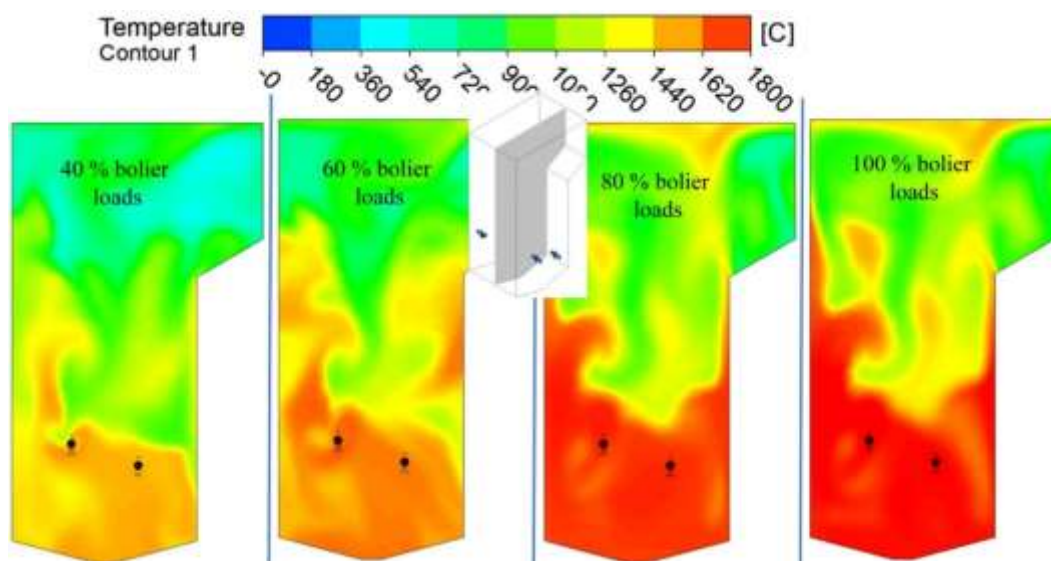


Рисунок 2 – Температурне поле центрального поздовжнього перерізу паливни в залежності від навантаження котельного агрегату

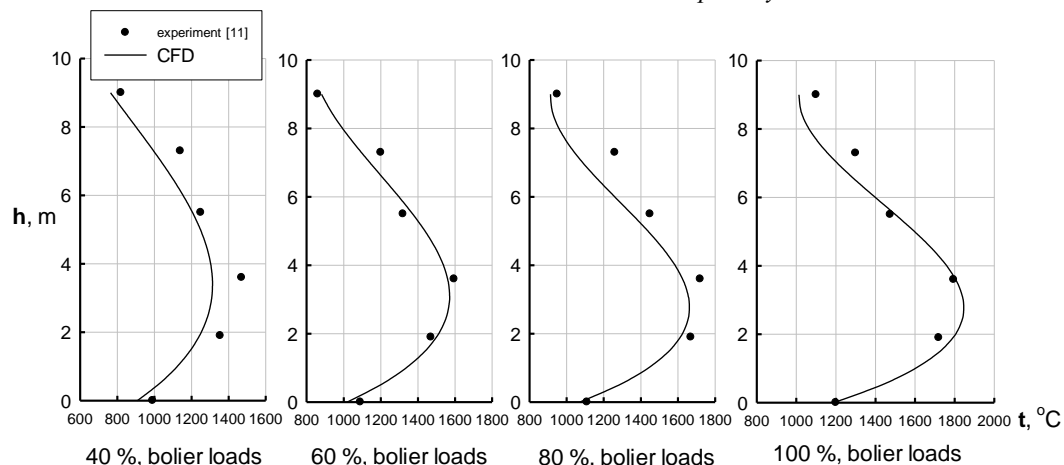


Рисунок 3 – Зміна температури продуктів згоряння по центральній осі по висоті паливни котла

Аналіз топографії теплових потоків (рис. 4) вказує на те, що зони максимального термічного напруження зосереджені в радіусі дії пальникових пристроїв — в області активного горіння. Ця ділянка охоплює близько 50% загальної висоти агрегату, починаючи від поду топки. Цілком закономірно, що при переході на режими зі зниженою тепловою потужністю інтенсивність термічного впливу на огорожувальні конструкції пропорційно зменшується.

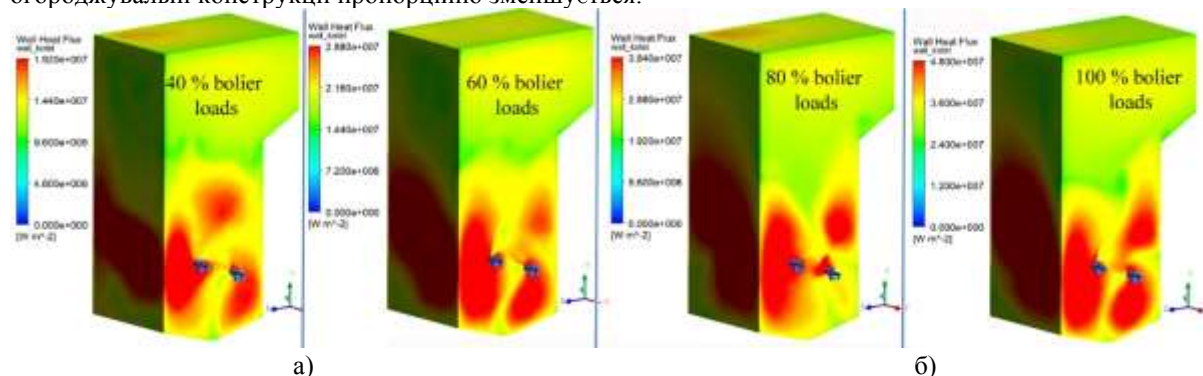


Рисунок 4 – Розподіл теплових потоків на задній і фронтальній (а), правій і лівій (б) (відносно фронтальної) бічних стінках котельного агрегату

Формування температурного поля в котлі безпосередньо залежить від гідродинаміки потоків, зумовленої турбулентною взаємодією закручених факелів. Повітряний потік, що обертається, захоплює газ, який подається трансверсально до поздовжньої осі пальника, забезпечуючи ефективне сумішоутворення. Якісну та кількісну оцінку цього процесу дозволяє надати аналіз масової частки суміші (Mixture Fraction), наведений на рис. 5.

Параметр Mixture Fraction є ключовим індикатором якості змішування паливного газу з окислювачем (зокрема у зоні завершених хімічних реакцій). У межах прийнятої шкали значення «0» відповідає чистому окислювачу, тоді як «1» вказує на нерозбавлений потік палива. Аналіз результатів (рис. 5) засвідчує, що паливо у чистому вигляді локалізоване лише у вихідних каналах пальника. Безпосередньо на виході з амбразури осьовий струмінь газу починає активно дифундувати у тангенціальний повітряний потік. Геометрія зони змішування (рис. 5) є непрямым відображенням форми високотемпературного факела, оскільки саме в цьому об'ємі відбувається інтенсивне окиснення метану киснем повітря.

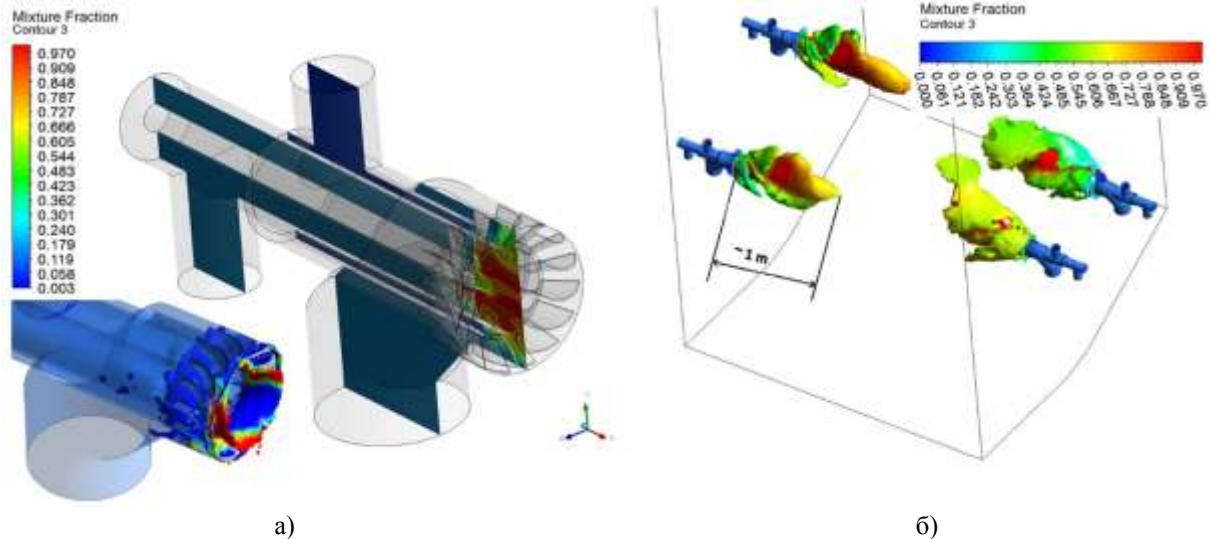


Рисунок 5 – Значення параметру Mixture Fraction в поздовжньому перерізі пальника (а) і зображення розподілу Mixture Fraction в об'ємі паливні (б) для візуалізації розмірів «факелів» з пальників

Просторові профілі концентрації окислів азоту наведені на рис. 6. Отримані дані демонструють чітку кореляцію між зонами максимального вмісту забруднюючих речовин та областями з найвищими температурами, що повністю узгоджується з класичними теоріями утворення оксидів азоту в топочних камерах. Зміщення піка генерації NO_x до периферійної (кінцевої) частини факела пояснюється тривалим часом перебування молекул повітря в зоні інтенсивного тепловиділення.

Результати візуалізації (рис. 6) дають підстави стверджувати, що утворені в ядрі факела оксиди азоту не піддаються термічній дисоціації і підспортуються з топки до конвективної шахти агрегату. Без впровадження спеціальних заходів із очищення димових газів (таких як селективне відновлення або адсорбція на пористих структурах – цеолітах, коксі чи торфі) ці сполуки безперешкодно потрапляють у навколишнє середовище.

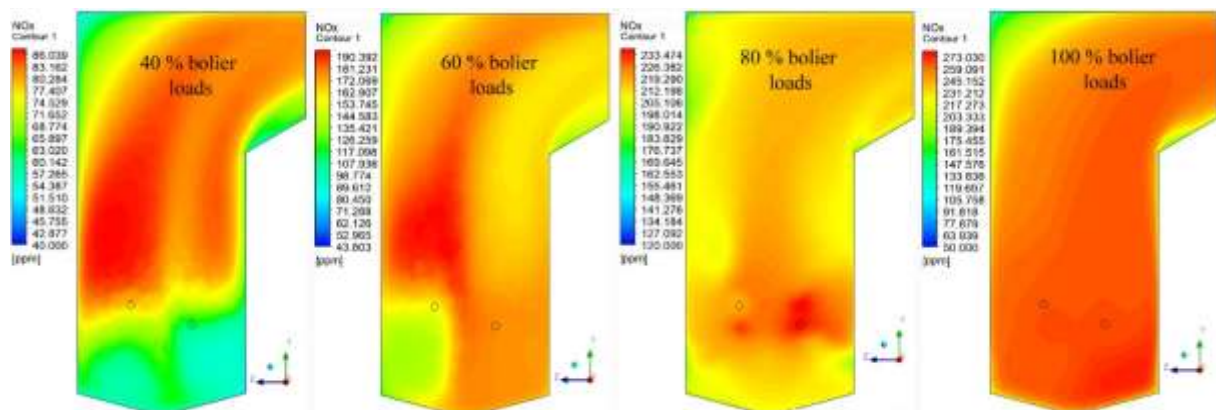


Рисунок 6 – Розподіл NO_x в центральному поздовжньому перерізі паливні

Для обґрунтування необхідності модернізації паливної системи було розраховано середній вміст NO_x на виході з топочного простору (рис. 7), який склав 359 ppm. Отримане значення демонструє задовільну збіжність із результатами натурних випробувань, проведених фахівцями ПАТ «Київенерго» [17]. Згідно з даними експлуатації [17], при роботі котла ГМ-50 на номінальній потужності середня концентрація оксидів азоту становить близько 280 ppm. Певна розбіжність між чисельним прогнозом та експериментальними показниками може бути зумовлена ідеалізацією граничних умов у моделі порівняно з реальними режимами теплообміну на внутрішніх поверхнях агрегату.

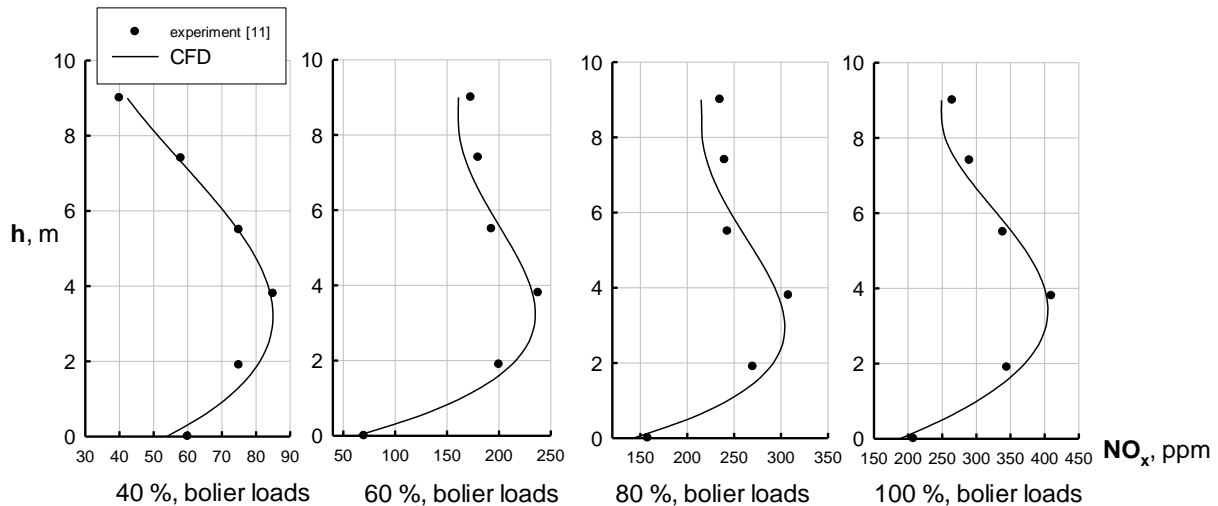


Рисунок 7 – Зміна значень NO_x продуктів згоряння по центральній осі по висоті паливни котла

Візуалізація полів концентрації оксидів азоту (рис. 6 та 7) демонструє, що найбільша інтенсивність утворення забруднюючих речовин зосереджена в областях з максимальною температурою смолоскипа. Даний розподіл повністю узгоджується з фундаментальними теоріями генерації термічних оксидів азоту в топочних камерах. Аналіз результатів (рис. 7) дає підстави стверджувати, що утворені азотні сполуки практично не піддаються дисоціації і транспортуються з димовими газами до конвективної частини агрегату. Без впровадження ефективних систем очищення (зокрема, технологій відновлення NO_x до молекулярного азоту N_2) концентрація шкідливих викидів у атмосферу перевищуватиме встановлені гранично допустимі нормативи [18].

Для суттєвого зниження рівня генерації NO_x у агрегатах такого типу автори вбачають перспективним рішенням заміну штатних паливних пристроїв на сучасні системи, що базуються на струменево-нішевій технології спалювання. Даний підхід є найбільш раціональним з огляду на підтвержену можливість досягнення низьких показників емісії шкідливих речовин [19].

Розраховані значення локальних теплових потоків (рис. 4) було використано як вхідні параметри для наступного етапу дослідження – чисельного аналізу багатофазної течії та процесів пароутворення в контурі природної циркуляції котла ГМ-50. Через ліміти обчислювальних ресурсів академічної версії ANSYS CFX, розрахункову область було обмежено фрагментом, що включає три суміжні екранні труби паливни (рис. 2а) та відповідний сегмент барабана-сепаратора (рис. 2б), куди надходить пароводяна суміш.

Для відтворення динаміки вологи в паровому середовищі застосовано підхід DPM (Discrete Phase Model), де краплі води розглядалися як сферичні об'єкти дискретної фази, розподілені в континуумі пари. Функціонал програмного комплексу ANSYS CFX [15] дозволив не лише розрахувати вектори руху цих частинок, а й змоделювати інтенсивність тепломасообмінних процесів між фазами.

Розподіл об'ємної частки пари вздовж випаровувальних поверхонь наведено на рис. 8б, в. З метою підтвердження достовірності чисельного розрахунку було проведено порівняльний аналіз із результатами, отриманими за нормативним методом [16]. На відповідних ділянках труб (позначених цифрами на рис. 8) зіставлено середні значення паровмісту: чорним кольором вказано аналітичні дані, а червоним – результати CFD-моделювання (Vapour Volume Fraction). Відхилення між результатами імітаційного моделювання та розрахунками за методикою [20] варіюється в діапазоні 9...18%.

Аналіз отриманих профілів (рис. 8б) демонструє нерівномірність розподілу парової фази за висотою труб [20]. У зоні інтенсивного тепловиділення спостерігається активне пароутворення, що призводить до значного заповнення перерізу труб парою. Водночас у кутових зонах паливни, де температури газів нижчі, фіксуються ознаки поверхневої конденсації, що знижує ступінь сухості середовища. Встановлено, що зменшення теплової потужності агрегату сприяє підйому точки початку кипіння теплоносія. Проте цей фактор практично не впливає на масову швидкість та кінцевий об'ємний паровміст на виході з труб, який стабільно тримається на рівні 0,85...0,86.

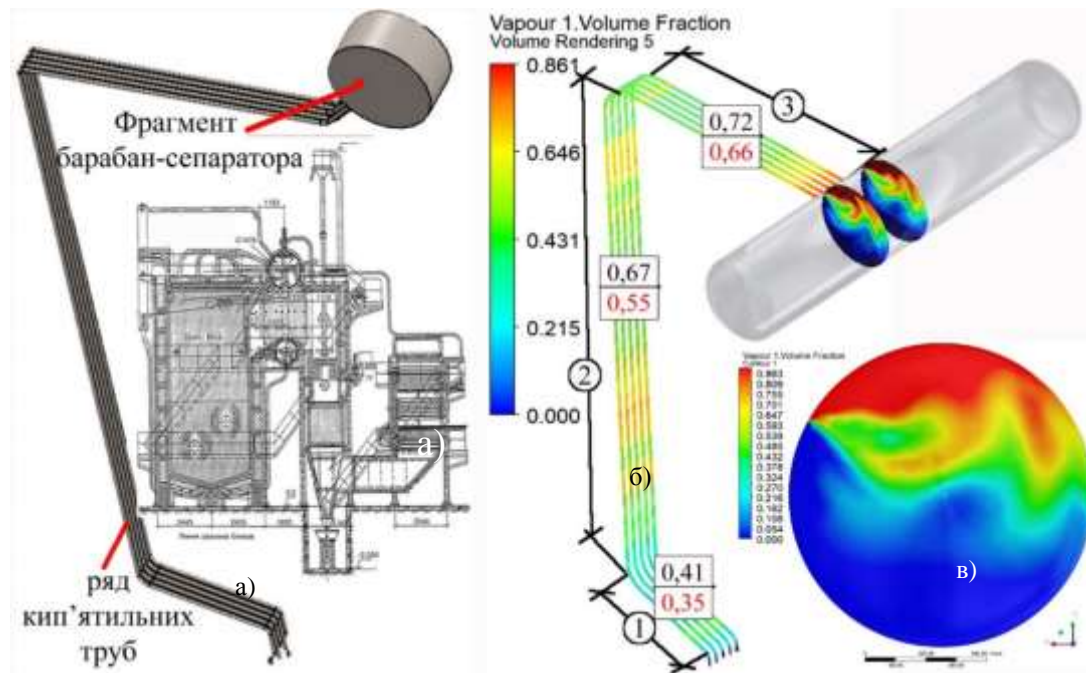


Рисунок 8 – Поздовжній переріз котла ГМ-50 і розрахункова область задачі (а) та візуалізація середнього об'ємного паровмісту в контурі природної циркуляції котла ГМ-50 при номінальному тепловому навантаженні (б) і збільшене зображення перерізу барабану для візуалізації розподілу пари в об'ємі барабан-сепаратора (в)

Деталізована структура розподілу фаз у барабані наведена на рис. 4б. Робочий об'єм барабану (рис. 7) заповнений рідкою фазою приблизно до середньої лінії («екватора»), при цьому спостерігаються постійні коливання рівня. Результати моделювання (рис. 4в) підтверджують чітке розділення середовищ: нижня частина об'єму заповнена водою, що спрямовується до опускної системи, тоді як пара, завдяки значній різниці густин, акумулюється у верхній частині та відводиться до пароперегрівача.

Верифікація моделі здійснювалася шляхом зіставлення з класичною схемою гравітаційної сепарації [21]. Як і в роботі [22], встановлено, що фактичний рівень води стабілізується приблизно на 150 мм нижче осевої лінії барабану (рис. 5). Поверхня розділу фаз (дзеркало випаровування) характеризується складною хвилеподібною геометрією та динамічною нестабільністю. Проте середнє положення цього рівня залишається поблизу «екватора» сепараційного пристрою і демонструє автономність від загальних змін теплового навантаження котла.

Висновки: виконана робота дозволяє зробити наступні висновки:

1. Результати апробації розробленої CFD-моделі продемонстрували задовільну збіжність із даними натурних вимірювань температурних полів та концентрацій NO_x , наданими службою енергоресурсів ПАТ «Київенерго» [17]. Максимальне відхилення не перевищує 10%. Розбіжність між чисельним прогнозуванням середнього паровмісту та аналітичними розрахунками становить 9–18%. Такий рівень похибки зумовлений як ідеалізацією теоретичних методик, так і апаратними лімітами академічної версії програмного комплексу ANSYS.

2. Аналіз роботи штатних пальникових пристроїв котла ГМ-50 підтвердив їхню невідповідність сучасним екологічним стандартам щодо емісії азотних сполук. Для приведення агрегату у відповідність до нормативних вимог обґрунтовано необхідність впровадження низькоемісійних пальників, що функціонують на основі струменево-нішевої технології.

3. Ідентифіковано фактичні параметри швидкості та витрати робочого середовища в екранних трубах. Ці дані використано як вихідні граничні умови для подальшого циклу досліджень, присвяченого моделюванню сепараційних процесів у барабані котла Е-50-3,9-440ГМ.

4. Встановлено, що пряма подача пароводяної суміші на поверхню розділу фаз призводить до інтенсивного хвилювання та динамічної нестабільності дзеркала випаровування. З метою стабілізації гідродинамічного режиму рекомендовано реалізувати подачу двофазного потоку під спеціальні конструктивні елементи (занурені дірчасті листи). Розробка та верифікація уточненої моделі з урахуванням цих внутрішньобарабанних пристроїв є пріоритетним напрямком наступних етапів роботи.

O. Baranyuk^{1,2}, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-0610-1403

O. Chernousenko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-1427-8068

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

²Thermal Energy Technology Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

CFD MODELING OF THE CHANGE IN THE HEAT LOAD OF THE N-50-3.9-440GM (GM-50) BOILER ON ITS THERMAL AND ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

The article presents the results of the study of the process of burning natural gas in the fuel of the GM-50 steam boiler, to assess its efficiency and study the impact on environmental indicators, which were performed using CFD modeling in the free student version of ANSYS Student. The aim of the work is to predict the formation of NO_x in the GM-50 fuel boiler at different loads by CFD modeling of combustion processes. The object of the study is the processes that occur during the combustion of gaseous fuel and their impact on the performance of the GM-50 steam boiler. The subject of the study is the CFD model of the GM-50 fuel boiler, the standard burners of which are capable of operating on both liquid and gaseous fuel. The application of numerical modeling methods using the ANSYS Student software package made it possible to analyze in detail the process of fuel combustion in the steam boiler, assess its efficiency and investigate its impact on environmental indicators. Verification of the CFD model, which was carried out using both the known analytical method and experimental data obtained by the energy resources service of PJSC «Kyivenergo», shows that the discrepancy between the values of analytical calculations and model calculations does not exceed 6,7%. The average temperature of flue gases in the «festoon window» was chosen as a comparison parameter. It was established that the standard burners of the GM-50 boiler are recognized as not meeting the standards for nitrogen oxide emissions and their replacement with jet-niche ones is proposed. The developed CFD model shows a 20% decrease in the average value of NO_x at the fuel outlet when replacing the standard burners with burners from the SNT company. The obtained result can be explained by the fact that for a fuel boiler equipped with burners from the SNT company, the temperature in the active combustion area reaches 1400 °C, and not up to 1800 °C as in the case of using a standard burner. The modeling also allowed us to visually identify the boundaries where the phase transition occurs. This allowed us to determine the height of the evaporation mirror in the drum, which is critical for its functioning.

Key words: combustion, boiler, CFD modeling, hydrodynamic interaction, torch, NO_x, heat flow.

References:

1. Baraniuk O.V. (2025) Modeling of flow and phase transition in the natural circulation circuit of the GM-50-1 boiler (E-50-3,9-440GM) [Modelyuvannya techiyi i fazovoho perekhodu v konturi pryrodnoyi tsyrkulyatsiyi kotla HM-50-1 (E-50-3,9-440HM)] // Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky. Vol. 36 (75), No 5, Part 1. pp. 118–124. DOI: 10.32782/2663-5941/2025.5.1/16. (Ukr)
2. Baraniuk O.V., Chernousenko O.Yu., Rachynskiy A.Yu. (2025) CFD modeling of steam separation in the drum separator of the GM-50 boiler type (E-50-3,9-440GM) [CFD-modelyuvannya separatsiyi pary v baraban-separatori kotla typu HM-50 (E-50-3,9-440HM)] // Informatyka. Kultura. Tekhnika. Vol. 2. pp. 496–501. DOI: 10.15276/ict.02.2025.74. (Ukr)
3. 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. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text (date of application: 10.09.2025).
4. 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. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1110-08> (date of application: 10.09.2025).
5. 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. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0075> (date of application: 10.09.2025).
6. Lavrentsov E.M., Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Dombrovska E.P., Kernazhitska O.S., Marasin A.V. (2019) Experience in the development, implementation and modernization of water heating boiler units with two-light screens and slotted floor burners [Dosvid rozrobky, vprovadzhennya ta modernizatsiyi vodohriynykh kotloahrehativ z dvosvitnymy ekranamy ta shchilynnymy podovymy pal'nykamy] // Енерготехнології та ресурсозбереження. No 3. pp. 17-26. DOI: 10.33070/etars.3.2019.02. (Ukr)
7. 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. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L2193> (date of application: 10.09.2025).

8. ANSYS. The best tools for engineering calculations [Electronic resource] URL: <https://www.ansys.soften.com.ua> (date of application: 10.05.2024).

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*. No166: 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*. No193. 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. Boilers of Small and Average Power, Catalog of M.: Research Institute of Informenergomash, 1987, p. 208p.

14. Ye. P. Kobylinskyi, "CFD modeling of gas combustion in the furnace of the GM-50-1 steam boiler using ANSYS-CFX [CFD modelyuvannya zghoriannya hazu u palyvni parovoho kotla HM-50-1 zasobamy ANSYS-CFX]," Master's thesis, Spec. 144 Heat Power Engineering, Kyiv, Ukraine, 2024.

15. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide, (2012) ANSYS Inc. ANSYS Help, URL: <https://ansyshelp.ansys.com> (дата звернення: 10.09.2025).

16. Tuz, V.O., Marynenko, V.I. and Vasechko, O.O. (2014) Methodological instructions for calculation and graphic work in the discipline "Steam Boilers" [Metodychni vkazivky do rozrakhunkovo-hrafichnoyi roboty z dystsypliny «Parovi kotly»] // Kyiv: NTUU "KPI". 27 p. Available at: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/8079>. (Ukr).

17. 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, 2024: 1-24. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27324.

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

19. O.A. Siryi, M.Z. Abdulin, O.V. Baranyuk (2016) Study of the hydrodynamics of the air flow in the jet-niche system of fuel combustion [Doslidzhennya hidrodynamiky potoku povitrya v strumenevo-nisheviy systemi spalyuvannya palyva]. *Bulletin of the KhPI National Technical University. Collection of scientific works. Series: Energy and heat engineering processes and equipment.* Kharkiv: NTU "KhPI", No. 9(1181). - pp. 94-100. DOI: 10.20998/2078-774X.2016.09.14 (Ukr)

20 Chernousenko O.Yu., Rachinsky A.Yu., Baranyuk O.V. (2024) CFD modeling of fuel boiler GM-50 (E-50-3.9-440GM). [CFD modelyuvannya palyvni kotla HM-50 (N-50-3,9-440HM)] *Energy technologies and resource conservation.* . Vol 79 No 2. pp. 138-149, DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2024.10>.

21 Mario Nowitzki. Development and validation of a gas-liquid two-phase model for industrial computational fluid dynamics applications. Thesis for: Doctoral / Technical University of Applied Sciences Wildau. Deutschland. 2020. 228 p. DOI: 10.26127/BTUOpen-5413.

22 Kitto, John B. and Stultz, eds. (2005). *Steam: Its generation and use*. 41. ed., 1. print. Barberton, Ohio: Babcock & Wilcox. ISBN: 0963457012.

Надійшла: 24.09.2025
Received: 24.09.2025

Прийнята: 24.03.2026
Accepted: 24.03.2026