

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 536.24:533.6.011

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/21>

Баранюк О.В.

<https://orcid.org/0000-0001-6008-6465>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Рачинський А.Ю.

<https://orcid.org/0009-0006-2120-5541>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сидоренко Ю.В.

<https://orcid.org/0000-0002-1953-0410>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пікенін О.О.

<https://orcid.org/0000-0003-2602-4708>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ ТЕПЛОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ТЕПЛОВІ Й ЕКОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ КОТЛА Е-50-3,9-440ГМ (ГМ-50)

В умовах інтеграції України до енергетичного простору ЄС та впровадження жорстких екологічних стандартів (Директива 2010/75/ЄС), актуальним завданням є модернізація застарілого парку парових котлів, зокрема типу Е-50-3,9-440ГМ (ГМ-50). Ключовим аспектом такої модернізації є прогнозування емісії забруднюючих речовин при переході котельних агрегатів на маневрені режими роботи. У роботі використано методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) для аналізу процесів стабілізованого горіння метану без попереднього змішування. Моделювання реалізовано в програмному комплексі ANSYS. Математична модель базується на осереднених за Рейнольдсом рівняннях Нав'є-Стокса, доповнених Realizable k - ϵ моделлю турбулентності. Апроксимацію розрахункової області виконано з використанням гібридної скінченно-елементної сітки з високою щільністю в зонах активного горіння. Розрахунок термічних і швидких NO_x проведено з урахуванням турбулентно-хімічної взаємодії компонентів та моделі часткової рівноваги для радикала O . Проведено чисельне дослідження роботи паливної котла ГМ-50 в діапазоні навантажень від 100% до 40% від номінального. Верифікація моделі за даними натурних експериментів ПАТ «Київенерго» підтвердила високу точність розрахунків: максимальне відхилення температури в зоні активного горіння не перевищує 3–10%. Встановлено характер розподілу теплових потоків на екранованих стінах паливної, де найбільше напруження локалізовано в області дії смолоскипів (до 50% висоти паливної). Визначено, що при номінальному навантаженні середня концентрація NO_x становить 359 ppт, що перевищує допустимі технологічні нормативи. Встановлено, що зниження навантаження призводить до перерозподілу зон генерації оксидів азоту, проте їх концентрація залишається високою через тривале перебування молекул у зонах високих температур. Результати дослідження обґрунтовують необхідність заміни штатних пальників



ГМГ-5 на сучасні низькоемісійні аналоги (зокрема струменево-нішеві). Отримані значення параметрів теплоносія в екранних трубах використані як граничні умови для подальшого моделювання гідродинаміки в барабані котла.

Ключові слова: CFD-моделювання, котел ГМ-50, паливня, оксиди азоту, ANSYS, тепловий стан, спалювання метану, екологічні нормативи.

Постановка проблеми. Питання спалювання органічного палива та оцінка його екологічного впливу залишаються пріоритетними напрямками розвитку сучасної енергетики. Забезпечення повноти згоряння за одночасного скорочення токсичних викидів є критично важливим для дотримання норм екологічної безпеки. Попри тенденцію до скорочення споживання природного газу в країнах ЄС, у багатьох азійських регіонах цей енергоресурс залишається базовим завдяки технологічній простоті та меншому екологічному навантаженню порівняно з вугіллям. У даному дослідженні за допомогою методів CFD-моделювання проаналізовано процес стабілізованого горіння без попереднього змішування в пальнику з низьким завихренням при варіюванні навантаження котла від 100% до 40%.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фундаментальну основу промислового енергетичного сектору становлять теплові електростанції, що функціонують у межах об'єднаних енергосистем. Більшість об'єктів генерації оснащено потужними паровими котлами, що використовують органічне паливо. Враховуючи значний ступінь вичерпання розрахункового ресурсу парку котлоагрегатів, зокрема типу Е-50-3,9-440ГМ (ГМ-50), актуальним постає питання обґрунтованого подовження терміну їх експлуатації. Пріоритетним шляхом вирішення цієї проблеми є технічне переоснащення із впровадженням сучасного паливовикористовуючого обладнання. Особливу увагу в цьому контексті приділено вітчизняним технологіям, які характеризуються високим рівнем адаптованості до наявної матеріальної бази та конкурентоспроможною ціною політикою порівняно з імпортними аналогами.

В умовах євроінтеграційних процесів України посилено вимоги до екологічних параметрів об'єктів спалювання вихідного палива [1]. Відповідно до Директиви 2010/75/ЄС [3] та вітчизняних нормативних актів (зокрема Наказу Мінприроди № 541 [2]), перед енергетичними підприємствами поставлено завдання щодо глибокої модернізації виробництв. Метою таких заходів є досягнення мінімальних значень викидів забруднюючих речовин та перехід до екологічно безпечних джерел енергії. Реалізація цих завдань потребує комплекс-

ного підходу, що поєднує інноваційні технічні рішення, стратегічне планування та тісну співпрацю між галузевими структурами й державними органами влади.

Вагомий внесок у розв'язання зазначених проблем зроблено фахівцями Інституту газу НАН України. Зокрема, було розроблено серію котлів із двосвітними екранами (ТВГ, КВГ) потужністю 4...10 МВт, а також подові щільні пальники третього покоління. Зазначене обладнання забезпечує рівні викидів оксидів азоту, що відповідають чинним екологічним директивам ЄС для котлів середньої потужності [4, 5].

Аналіз світового наукового досвіду свідчить про домінування методів комп'ютерного моделювання (зокрема ANSYS CFD) у дослідженнях, проведених після 2000 року [6]. Застосування таких інструментів дозволяє виконувати високоточне моделювання складних гідродинамічних і тепломасообмінних процесів. Сучасні тенденції розвитку чисельних методів спрямовані на пряме моделювання гідродинаміки з урахуванням детальної кінетики реакцій горіння [7, 8]. Водночас зазначається, що при розрахунках у масштабах, які значно перевищують товщину зони горіння (наприклад, для великогабаритних топок [9, 10]), точність результатів може знижуватися. Невирішеною залишається проблема ідентифікації набору елементарних стадій радикально-ланцюгового механізму термоокислення горючих газів, який би максимально адекватно відтворював реальні умови в паливнях промислових котлів.

Постановка завдання. Метою статті є визначення впливу величини теплового навантаження котла Е-50-3,9-440ГМ (ГМ-50) на рівень води в його барабан-сепараторі, а також прогнозування утворення NO_x в димових газах на виході паливні при різних навантаженнях шляхом CFD-моделювання процесів горіння.

Метод дослідження – моделювання основних характеристик процесів горіння під час спалювання метану в комп'ютерній моделі паливні котла ГМ-50 внаслідок стабілізованого горіння метану в штатних пальниках ГМГ-5. Комп'ютерне моделювання виконувалось в середовищі програмного комплексу ANSYS Student, що є абсолютно безкоштовним (з 2015 року) і призначеним для вирі-

шення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі.

Об'єктом дослідження є процеси, що відбуваються під час горіння газоподібного палива, та їх вплив на продуктивність парового котла ГМ-50.

Предметом дослідження є CFD-модель паливного котла ГМ-50, стандартні пальники якого здатні працювати як на рідкому, так і на газоподібному паливі.

Виклад основного матеріалу. Котли типу ГМ-50 (газомазутні, продуктивністю 50 тон пари на годину (рис. 1а)) та їхні модифікації (наприклад, водогрійні КВ-ГМ-50) були широко розповсюджені в радянській енергетиці. Вони розроблялися переважно для промислових котельнь, великих заводів та ТЕЦ невеликої потужності. В Україні котли ГМ-50 та КВ-ГМ-50 встановлювалися на великих промислових майданчиках та об'єктах комунальної енергетики. Наприклад, в Київській області такі котли встановлювалися на великих цукрових заводів, та хімічних підприємствах де потрібна велика кількість технологічної пари.

Більшість районних котельнь у великих містах (Київ, Харків, Дніпро, Одеса) використовують водогрійні аналоги – КВ-ГМ-50. Вони слугують для забезпечення централізованого опалення великих житлових масивів. В Черкасах, Полтаві та Вінниці такі котли слугують на місцевих ТЕЦ

промислового типу, які забезпечували парою прилегли заводи.

В Східній Європі котли цієї серії постачалися до країн соцтабору колишнього СРСР, де будувалися промислові гіганти за радянськими проектами, а саме для Болгарії (для ТЕЦ великих металургійних та нафтопереробних комбінатів (наприклад, у районі Бургаса)), для Польщі та Румунії (встановлювалися на підприємствах важкого машинобудування та хімічної промисловості, побудованих у 1970–80-х роках) та в країнах Балтії (Литва, Латвія, Естонія). Там ці котли використовувалися у великих районних котельнях Вільнюса та Риги [11].

У представленій роботі для апроксимації розрахункової області, що вибрана як паливня котла (рис. 1б) використана гібридна скінчено-елементна сітка. Такого типу сітка використовується, щоб заощадити ресурси комп'ютера при розрахунках. Відстань між сусідніми вузлами сітки регулювалась параметром *Relevance Center* зі значенням «Fine», що визначає найвищу щільність сітки. Розмір елементів сітки задавався в полі «Element Size» параметром *Relevance Center*.

На фронтних стінах моделі паливни розміщено вихрові пальники, через яких газоподібне паливо подається в паливню. Для моделювання використані кресленики штатних газо-мазутних пальників потужністю 5.5 МВт (ГМГ-5). На

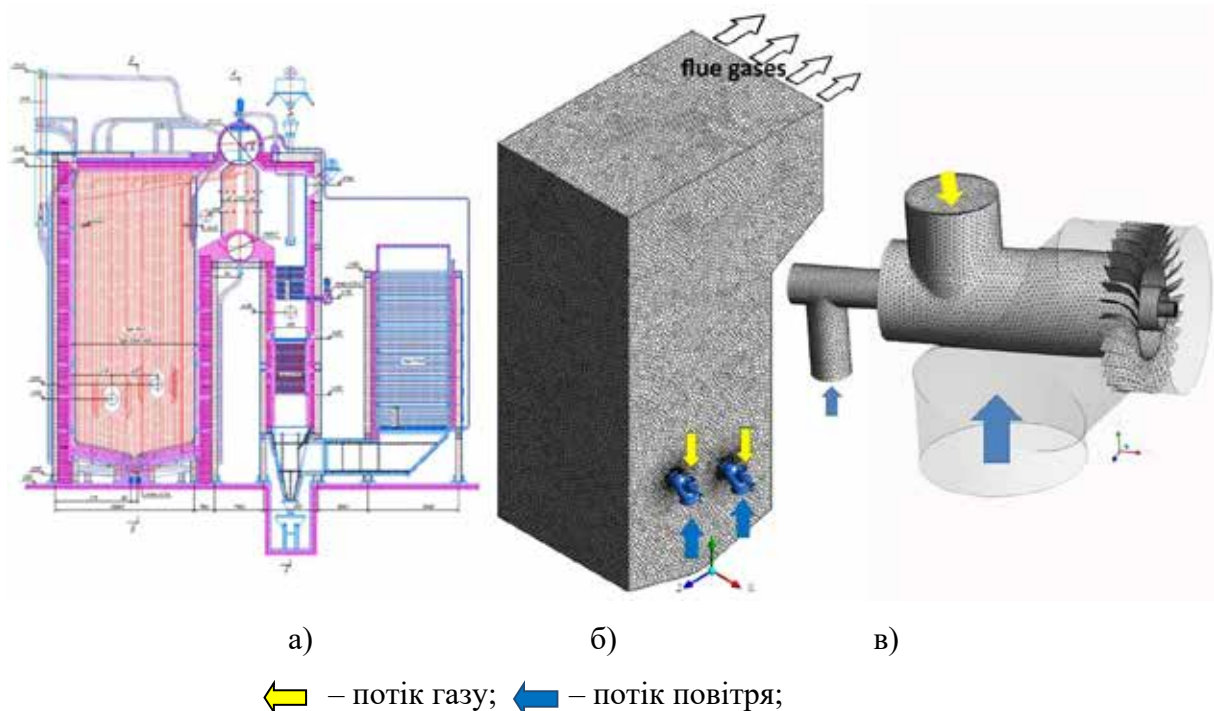


Рис. 1. Поздовжній переріз котла ГМ-50 (а), зображення скінчено-елементної сітки (б) та поздовжній переріз пальника ГМГ-5.5, що використаний в моделі (в)

рис. 1в приведено тривимірну модель та загальний вигляд газозадутого пальника ГМГ-5.5 [11]. В результаті налагоджувальних експериментів було визначено 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 і маси (Нав'є-Стокса), а також рівняння переносу i -го компонента суміші. Для замикання осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса використовувалась Realizable k - ε модель турбулентності. В якості керуючих рівнянь використовується система рівнянь нерозривності, Нав'є-Стокса для течії в'язкої рідини, що стискається, зі змінними властивостями, рівняння енергії і збереження компонентів суміші [12].

З метою спрощення математичної моделі і постановки граничних умов, в якості «палива» при розробці CFD-моделі автори використали метан, оскільки природний газ, що використовувався в моделюванні за методиками, складається майже на 99% з CH_4 та до 1% N_2 . Теплотворна здатність CH_4 становить 35,9 МДж/м³, а природного газу (що використовується на разі в Україні для виробників теплоти), становить 35,59 МДж/м³. Різниця в теплотворній здатності метану та природного газу становить менше 1%, що дозволяє вважати ці види палива подібними. Коефіцієнт надлишку повітря для горіння палива в обох типах моделювання був однаковим і становив $\alpha = 1,05$. Різниця в об'ємі продуктів згорання для природного газу становить 9,44 м³/м³, для CH_4 9,41 м³/м³, різниця становить 0,3%. Приведені розрахунки свідчать про правомірність такого спрощення.

Засобами ANSYS-CFX розраховуються рівні термічних і швидких NO_x . Модель враховує турбулентно-хімічну взаємодію компонентів і дозволяє 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.

В якості граничних умов стінці котельного агрегату задавався нерівномірний розподіл температури, що змінювався по лінійному закону – від температури теплоносія в нижньому роздатковому колекторі, до температури, яку має теплоносії перед входом в барабан котла. На виході із паливни враховувалось, що всі потоки, які потра-

пили в паливню крізь пальники полишають її крізь «вікно» фестону (рис. 1б).

Витрата газу через пальник V_{Γ} автори визначали за формулою, нм³/с:

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

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

Необхідна витрата повітря через пальник розраховувалась за формулою, м³/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, м³/нм³:

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

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).

Обговорення отриманих результатів.

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 [13]. Це розподіл температур і емісія окислів азоту в паливні 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.

Як свідчить рис. 3, температура димових газів в активній зоні горіння та на виході з топки збігається з максимальним відхиленням до 3 % з експериментальними даними [13]. Температури в нижній частині паливни збігаються з експериментальними даними, при цьому відхилення становить менше одного відсотка. Найбільше відхилення розрахункових значень температур від

експериментальних спостерігається на висоті 5 – 8 м, у зоні допалювання. Проте, це відхилення не перевищує 10 %, що є цілком припустимим при використанні достатньо обмеженої, але безкоштовної версії ANSYS-CFX. Також необхідно відмітити, що виходячи з експериментальних точок (рис. 3) температурне поле в середині паливні повинно бути достатньо рівномірним, проте і в даній роботі, і в роботі [13] спостерігається більш інтенсивне охолодження димових газів в зоні допалювання.

Після успішної верифікації моделі (рис. 3), CFD-моделювання дозволяє отримати дані, які складно отримати за допомогою експериментальних методів. А саме, розподіл теплових потоків на стінках паливні (рис. 4).

Приведений на рис. 4 розподіл теплових потоків на стінках котельного агрегату свідчить, що найбільше теплове напруження спостерігається в області активного горіння поблизу розташування пальників. Ця область займає приблизно 50 % від висоти котельного агрегату, починаючи свій відлік від поду паливні. Очевидно, зі зменшенням теплового навантаження на котельний агрегат, теплове напруження на стінки паливні зменшується.

Розподіл концентрації оксидів азоту NO_x приведений на рис. 5 який свідчить, що максимальна концентрація забруднюючих речовин спостерігається в зонах з високих температур. Це не суперечить існуючим уявленням про генерацію в паливні котла оксидів азоту. Максимум інтенсивності генерації окислів азоту зміщується в кінець

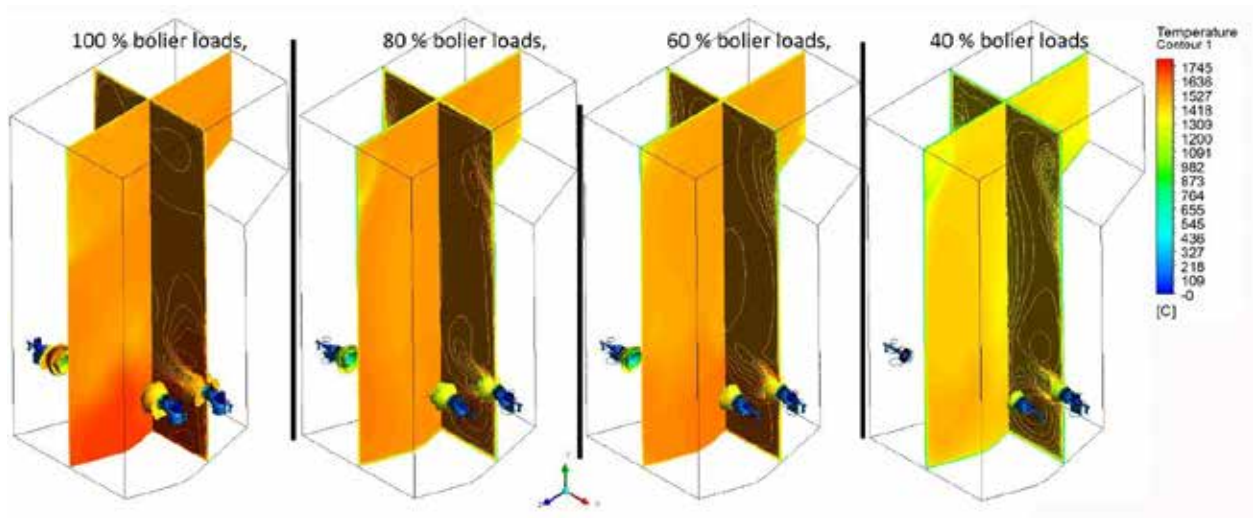


Рис. 2. Температурне поле паливні в залежності від навантаження котельного агрегату

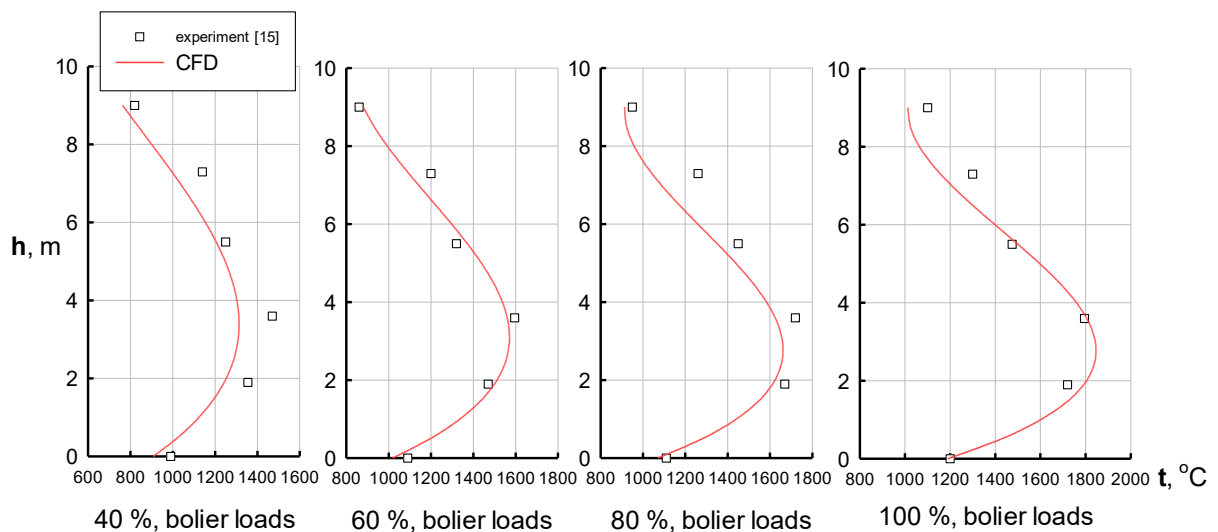


Рис. 3. Зміна температури продуктів згоряння по центральній осі по висоті паливні котла

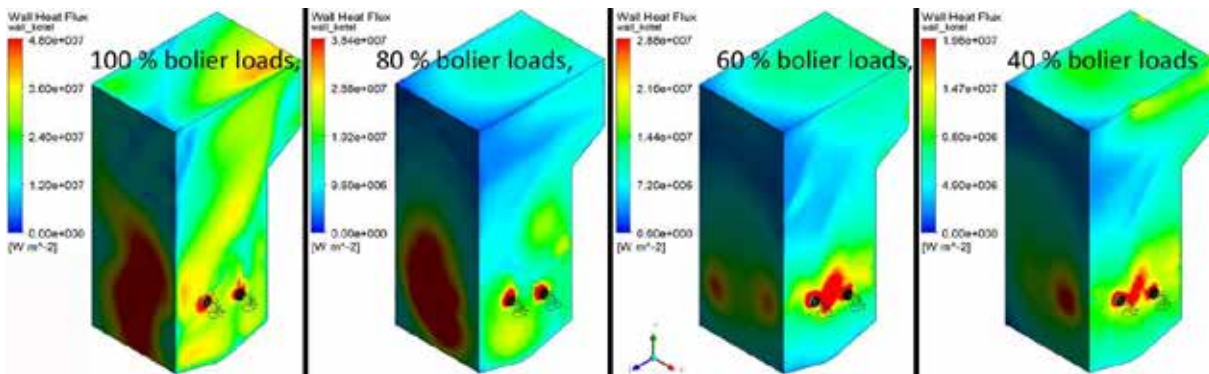


Рис. 4. Розподіл теплових потоків на фронтальній і бічних стінках котельного агрегату при зміні навантаження

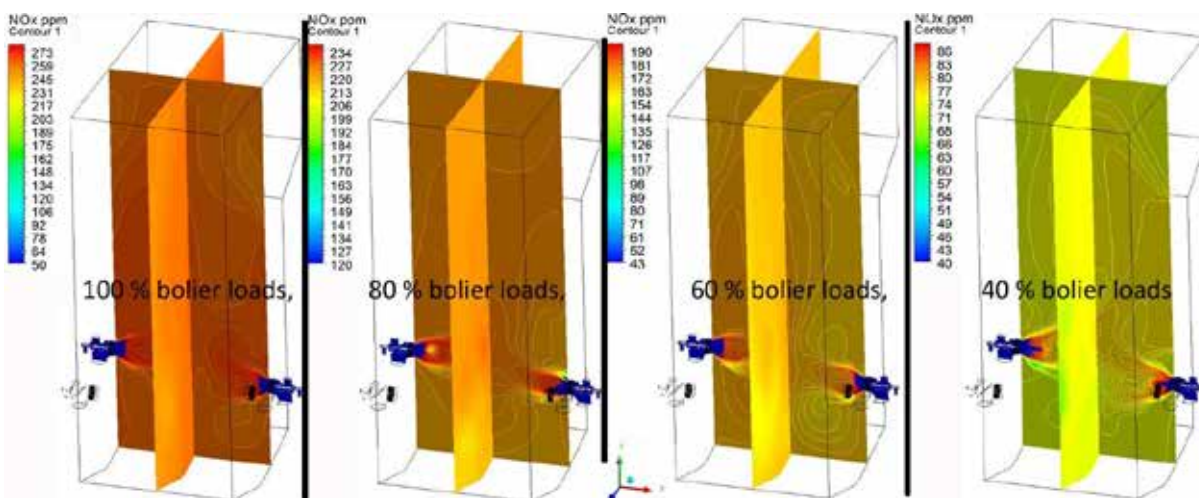


Рис. 5. Розподіл NO_x в перерізах паливні

факелу. Це можна пояснити тим, що молекули повітря значно довше знаходяться в зоні високих температур.

Аналіз даних рис. 5 дозволяє зробити висновок, що створені в зоні дії високих температур окисли азоту не руйнуються і з паливні потрапляють в конвективну шахту котельного агрегату. Якщо не застосовувати міри по очистці (наприклад, відновлення, та адсорбції, що заснована на адсорбції оксидів азоту різними адсорбентами (цеоліт, торф, кокс та ін.)) можуть потрапити в атмосферу.

Для того щоб зробити висновок про доцільність подальшої заміни штатних пальників на більш сучасні, в роботі визначено середні значення оксидів азоту на виході з паливні (рис. 6) становить 359 ppm.

Це значення достатньо узгоджується з результатами експериментального дослідження, отриманими службою енергоресурсів ПАТ «Київенерго», Україна [13]. Експеримент [13] свідчить, що середнє значення оксидів азоту на виході

з паливні котла ГМ-50 повинно становити 280 ppm при номінальному навантаженні. Зазначені відхилення між даними CFD-моделювання і експериментом ПАТ «Київенерго» можуть бути наслідком відмінності в задаваних граничних умовах і реальними умовами на стінці під час експлуатації котла.

Розподіл концентрації оксидів азоту NO_x , приведений на рис. 5 і 6, свідчить, що максимальна концентрація забруднюючих речовин спостерігається в зонах з високих температур. Це не суперечить існуючим уявленням про генерацію в паливні котла оксидів азоту. Аналіз даних рис. 6 дозволяє зробити висновок, що створені в зоні дії високих температур оксиди азоту не руйнуються в своїй більшості і з паливні потрапляють в конвективну шахту котельного агрегату. Якщо не застосовувати заходи по очистці димових газів (наприклад відновлення NO_x до молекулярного азоту N_2) буде відбуватись перевищення допустимих питомих викидів NO_x до атмосфери [14].

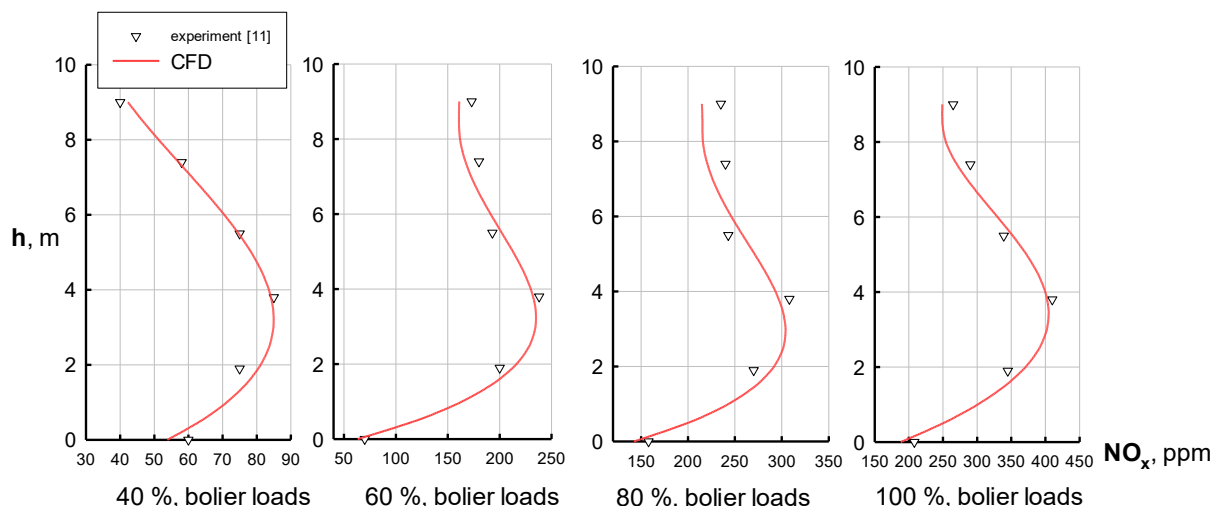


Рис. 6. Зміна значень NO_x продуктів згоряння по центральній осі по висоті паливної котла

В майбутньому, для зменшення рівня генерації NO_x у такому типі котла автори вважають доцільним замінити штатні пальники на пальники, що побудовані на основі струменево-нішевої технології як найбільш перспективні через низький рівень викидів оксидів азоту [15].

Висновки. Проведено верифікацію CFD-моделі, результати якої за температурними показниками та емісією NO_x узгоджуються з експериментальними даними, отриманими службою

енергоресурсів ПАТ «Київенерго», Україна [9] і розрахунків моделі не перевищує 10 %.

Різниця між розрахунковим та аналітичним об'ємним паровмістом у межах 9–18% зумовлена прийнятими спрощеннями та обмеженнями програмного середовища.

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

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. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text (дата звернення: 10.05.2024).
2. Про затвердження технологічних нормативів допустимих викидів забруднюючих речовин із теплових установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт : Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 22.10.2008 р. № 541. URL: <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. URL: <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 щілинними подовими пальниками. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2019. № 3. С. 17–26. DOI: <https://doi.org/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. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L2193> (дата звернення: 10.05.2024).
6. ANSYS. Найкращі інструменти для інженерних розрахунків. URL: <https://www.ansys.soften.com.ua> (дата звернення: 10.05.2024).
7. 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). 266–283.
8. Wang H., Hawkes E. R., Savard B., Chen J. H. Direct numerical simulation of a high Ka CH_4 /air stratified premixed jet flame. *Combust. Flame* 2018. (193). 229–245.

9. 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). 1–13.
10. 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). 201–235.
11. Boilers of Small and Average Power, Catalog of M.: Research Institute of Informenergomash, 1987, p. 208p.
12. ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide, (2012) ANSYS Inc. ANSYS Help, URL: <https://ansyshelp.ansys.com> (дата звернення: 10.05.2024).
13. Lohvyniuk M., Novakivskyi Ye. 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: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27324>
14. 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 : К. : ГНОЗІС, 2013. 308 с.
15. Сірий О.А., Абдулін М.З., Баранюк О.В. Дослідження гідродинаміки потоку повітря в струменевій системі спалювання палива. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків : НТУ «ХПІ», 2016. № 9(1181). С. 94–100. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2016.09.14>

Baranyuk O.V., Rachynskyi A.Yu., Sydorenko Iu.V., Pikenin O.O. CFD MODELING OF THE IMPACT OF CHANGES IN THERMAL LOAD ON THE THERMAL AND ENVIRONMENTAL INDICATORS OF THE N-50-3.9-440GM (GM-50) BOILER

In the context of Ukraine's integration into the EU energy space and the introduction of strict environmental standards (Directive 2010/75/EU), the current task is to modernize the outdated fleet of steam boilers, in particular of the N-50-3.9-440GM (GM-50) type. A key aspect of such modernization is the prediction of pollutant emissions when boiler units switch to maneuverable operating modes. The work uses computational fluid dynamics (CFD) methods to analyze the processes of stabilized methane combustion without prior mixing. The modeling was implemented in the ANSYS software package. The mathematical model is based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, supplemented by the Realizable k - ϵ turbulence model. The approximation of the computational domain was performed using a hybrid finite element mesh with high density in active combustion zones. The calculation of thermal and fast NO_x was carried out taking into account the turbulent-chemical interaction of components and the partial equilibrium model for the O radical. A numerical study of the operation of the GM-50 fuel boiler in the load range from 100% to 40% of the nominal one was carried out. Verification of the model according to the data of full-scale experiments of PJSC «Kyivenergo» confirmed the high accuracy of the calculations: the maximum temperature deviation in the active combustion zone does not exceed 3–10%. The nature of the distribution of heat flows on the shielded walls of the fuel tank was established, where the greatest stress is localized in the area of the torches (up to 50% of the fuel tank height). It was determined that at the nominal load the average concentration of NO_x is 359 ppm, which exceeds the permissible technological standards. It was established that a decrease in the load leads to a redistribution of the zones of generation of nitrogen oxides, but their concentration remains high due to the prolonged stay of molecules in high-temperature zones. The results of the study justify the need to replace standard HMG-5 burners with modern low-emission analogues (in particular, jet-niche ones). The obtained values of the coolant parameters in the screen tubes were used as boundary conditions for further modeling of hydrodynamics in the boiler drum.

Keywords: CFD modeling, GM-50 boiler, fuel plant, nitrogen oxides, ANSYS, thermal state, methane combustion, environmental standards.

Дата першого надходження статті до видання: 22.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026