

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.01.2024.51>

УДК 536.24:536.423

Моделювання процесів спалювання палива у паровому котлі при заміні штатних пальників

Баранюк Олександр Володимирович^{1, 2)}Кандидат техніч. наук, доцент, доцент каф. Теплової та альтернативної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-1403>; olexandr.baranyuk@gmail.com. Scopus Author ID: 57201024575**Рачинський Артур Юрійович¹⁾**Кандидат техніч. наук, доцент, доцент каф. Теплової та альтернативної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-1517>; arturrachinskiy@gmail.com. Scopus Author ID: 57190884322**Черноусенко Ольга Юрійвна¹⁾**Д-р техніч. наук, професор, завідувачка каф. Теплової та альтернативної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>; chernousenko20a@gmail.com. Scopus Author ID: 57222080457¹⁾ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейській, 37. Київ, 03056, Україна²⁾ Інститут теплоенергетичних технологій Національної академії наук України, вул. Андріївська, 19. Київ, 04070, Україна

АНОТАЦІЯ

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 імпортованих аналогів за рахунок кращої адаптованості до вітчизняного обладнання, а також більш сприятливою ціною політикою вітчизняних виробників. Представлена робота виконувалась з метою перевірки 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 цього була розроблена 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 паливного котла ГМ-50, штатні пальники якого здатні працювати як на рідкому, так і на газоподібному паливі. У якості палива використовувався метан. Пальники використовувалися як штатні осьові, так і 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 паливни становить 187 ppm. Є сенс замінити штатні пальники, наприклад, на струменево-нішеві, які найбільш підходять для заміни штатних.

Ключові слова: топка; котел; пальники; CFD моделювання; гідродинамічна взаємодія; факел; NO_x; тепловий потік

Актуальність. Україна стикається з проблемою застарілого теплоенергетичного обладнання, яке вичерпало свій заводський ресурс і не відповідає сучасним вимогам. Один із ефективних шляхів розв'язання цієї проблеми полягає в модернізації обладнання з використанням сучасних технологій, що дозволить підвищити ефективність і надійність теплоенергетичних систем.

Особливо перспективним напрямком у цьому контексті є орієнтація на вітчизняні технології. Вони мають низку переваг порівняно з імпортованими аналогами, серед яких — краща адаптованість до існуючого обладнання, що дозволяє спростити процес модернізації, зменшити на витрати адаптацію та інтеграцію нових рішень. Також українські виробники пропонують більш сприятливу цінову політику, що робить модернізацію економічно вигіднішою для підприємств.

Розвиток та впровадження вітчизняних інноваційних технологій не тільки сприяє покращенню екологічних показників та підвищенню енергоефективності, але й підтримує національних виробників, що має важливе значення для економіки країни. Цей підхід

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

дозволяє знизити залежність від імпорту та забезпечити стійкий розвиток галузі теплоенергетики в Україні.

Метою дослідження є аналіз доцільності заміни штатних пальників на пальники, які побудовані на основі струменево-нішевої технології, в енергетичних котлах, на прикладі парового котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ).

Прагнення України інтегруватися в Європейський Союз [1] вимагає підвищення екологічних стандартів для об'єктів, які використовують викопне паливо. Під впливом нормативно-правових документів, таких як наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища № 541 від 22.10.08 [2] та відповідно до Директиви 2010/75/ЄС [3], підприємства повинні модернізувати свої виробництва з впровадженням екологічно чистих джерел енергії та обладнання, що мінімізує викиди забруднюючих речовин. Для вирішення цих викликів активно працюють наукові інститути, зокрема Інститут газу НАН України, який розробив котли ТВГ-8, ТВГ-8М, КВГ-7,56 та інші, а також подові щільні пальники, що відповідають європейським нормам викидів [4, 5]. В Україні також працюють підприємства, такі як ТОВ «Виробниче об'єднання «Струменево-нішева технологія»», яке займається реконструкцією вогнетривкого обладнання та модернізацією тепломереж. Одним із шляхів зниження викидів є застосування пальників із збільшенням зон горіння, що дозволяє оптимізувати процеси згоряння і знизити викиди NO_x та CO . Це можливо лише у вузькому температурному діапазоні 1650-1900 К [6].

Для проектування і моделювання цих процесів використовують сучасне програмне забезпечення, таке як ANSYS CFD та ANSYS FLUENT [7], які дозволяють точно моделювати фізичні та хімічні процеси в топках котлів. Моделювання процесів горіння палива є ключовим інструментом для оптимізації існуючого та нового обладнання, особливо при модернізації. Воно дозволяє зменшити витрати на експерименти, скоротити час розробки та забезпечити відповідність обладнання екологічним стандартам. Водночас важливо поєднувати комп'ютерне моделювання з фізичними експериментами для отримання найбільш повних та достовірних результатів. Таким чином, модернізація паливовикористовуючого обладнання з орієнтацією на екологічні вимоги ЄС є складним завданням, що потребує інтеграції сучасних технічних рішень, наукових досліджень та стратегічного планування. Використання сучасних технологій та комп'ютерного моделювання є ефективними інструментами для досягнення цих цілей і забезпечення екологічної безпеки вітчизняної теплоенергетики.

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

У представленій роботі відстань між сусідніми вузлами сітки регулювалась параметром Revelance Center зі значенням "Fine", що визначає найвищу щільність сітки. Розмір елементів сітки задавався в полі "Element Size" параметром Revelance Center. Поєднання структурованої і неструктурованої розрахункових скінчено-елементних сіток здійснювалось за допомогою методу MultiZone.

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 [21]. Засобами ANSYS-Fluent 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 теплоносій перед входом в барабан котла. На вході в паливник задавалась масова витрата газу, що відповідає штатній витраті газу для котла ГМ-50-1 (4500 $\text{м}^3/\text{год}$). Витрата окислювача розраховувалась згідно значення коефіцієнту надлишку повітря $\alpha = 1.2$. На виході із паливни враховувалось, що всі потоки, які потрапили в паливню крізь паливники, полишають її крізь «вікно» фєстону.

Відомо, що результати комп'ютерного моделювання необхідно верифікувати з експериментальними або надійними теоретичними даними. Для розрахунку теплообміну і гідродинаміки в топці таких котлів вже існують перевірені часом розрахункові методики [8]. Тому, з огляду на специфіку задачі, найбільш адекватним параметром для верифікації розробленої CFD-моделі буде розрахована за методикою [9] температура на виході з паливни. Розрахунок з аналітичними залежностями Нормативного методу розрахунку котельних агрегатів, який виконувався безпосередньо перед виконанням чисельного моделювання, свідчить, що середня температура димових газів в «вікні фєстона» повинна становити 1117 $^{\circ}\text{C}$. Розрахунок засобами CFD-моделі, яка розроблена в середовищі ANSYS-CFX, свідчить, що це значення має становити 1042 $^{\circ}\text{C}$. Розбіжність в цьому випадку становить 6.7 %.

Тепловий стан котельного агрегату значною мірою визначається гідродинамічною структурою потоку, що утворюється в результаті взаємодії газових струменів і обертального руху повітряного потоку. У процесі роботи котла газо-повітряна суміш піддається запаленню, після чого факели розжареного газу спрямовуються назустріч один одному, що створює інтенсивне теплообмінне середовище.

Такий режим горіння забезпечує ефективне змішування компонентів, максимізує зону контакту газу з повітрям і сприяє рівномірному розподілу температури в топковій камері. Обертальний рух повітря відіграє ключову роль у стабілізації полум'я, зменшенні концентрацій оксидів азоту та зниженні ризику утворення локальних перегрівів, що може негативно впливати на роботу котельного агрегату. Ця динаміка забезпечує оптимальні умови для згоряння палива та ефективного теплообміну, що важливо для збереження надійності та економічності котельного обладнання.

Про конфігурацію факелу полум'я та напрям поширення димових газів в центрі паливни більш красномовно свідчить розподіл температур потоків димових газів на пласкій площині. В якості перерізів, на яких представлено візуалізацію поля температур паливни, вибрано поздовжній переріз, який проходить по центру паливників (Рисунок, а). Слід зазначити, що спостерігається деяка асиметрія в розподілах теплових потоків на задній та на фронтальній гранях паливни котельного агрегату. Аналіз даних, представлених на Рисунку а, дозволяє зробити висновок, що факел від паливників, розташованих на фронтальній стінці «притиснутий» до неї. Щодо факелів від паливників задньої стінки, вони направлені до центру паливни і деформують поле температур в центрі паливни.

Розподіл концентрації оксидів азоту NO_x , наведений на Рисунку б, свідчить про те, що максимальна концентрація забруднюючих речовин спостерігається в зонах з високими

температурами. Це не суперечить існуючим уявленням про генерацію в паливній котла оксидів азоту. Оскільки, в даній роботі коефіцієнт надлишку повітря становить 1.2, максимум інтенсивності генерації оксидів азоту зміщується в кінець факелу. Аналіз даних (Рисунок б) дозволяє зробити висновок, що створені в зоні дії високих температур оксиди азоту не руйнуються і з паливни потрапляють в конвективну шахту котельного агрегату. Якщо не застосовувати заходи по очистці димових газів (промислові технології азотоочищення димових газів базуються на відновленні NO_x до молекулярного азоту N_2 – це селективне каталітичне та некаталітичного відновлення, що основані на хімічній реакції NO_x з аміаком NH_3 або аміако-похідною речовиною, наприклад, карбамідом, що вводиться в потік димових газів [10]) буде відбуватись перевищення допустимих питомих викидів NO_x до атмосфери [10].

Для того щоб зробити висновок про доцільність подальшої заміни штатних пальників на більш сучасні, в роботі визначено середні значення оксидів азоту на виході з паливни (Рисунок, а) становить 187 ppm. Це значення достатньо узгоджується з результатами експериментального дослідження, отриманими службою енергоресурсів ПАТ «Київенерго», Україна [11] (Рисунок, б). Експеримент [11] свідчить, що середнє значення оксидів азоту на виході з паливни 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 граничних умовах, які задаються, а також в тому, що автори [11] не вказали, при якому коефіцієнті надлишку повітря виконані їх дослідження.

Очікується, що при використанні пальників побудованих на основі струменево-нішевої технології для використання в котлах такого типу, вважаємо найбільш перспективним через низький рівень викидів оксидів азоту, отриманих на лабораторних стендах [12, 13].

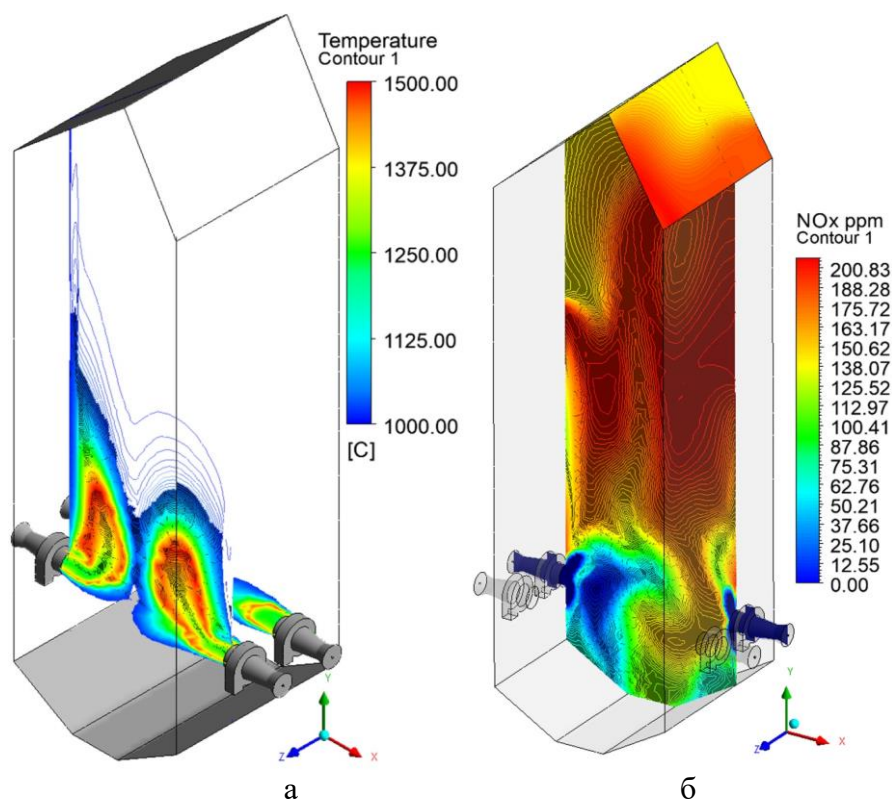


Рисунок. Розподіл температур в плоских перерізах (а) відносно центрів пальників паливни та оксидів азоту в об'ємі паливни (б) котельного агрегату

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. – Доступно з: 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 теплосилових установок, номінальна теплова потужність яких перевищує 50 МВт». – Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 22.10.2008 р. № 541. – Доступно з: <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. – Available from: <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: 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. – Доступно з: <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 научно-технической конференции «Комплексная автоматизация промышленности»*. 1990. С. 12–16.
7. “ANSYS. Найкращі інструменти для інженерних розрахунків”. – Доступно з: <https://www.ansys.soften.com.ua>. – (Дата звернення: 10.05.2024).
8. Туз В. О., Мариненко В. І., Васечко О. О. «Розрахунок паливні котельних установок». Навч. посіб. для студ. спеціальностей 142 «Енергетичне машинобудування»; 144 «Теплоенергетика» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, Україна. 2020. 36 с. – Доступно з: <https://ela.kpi.ua/items/92a8bce5-c682-47b2-b8b4-83ded67405d9>. – (Дата звернення: 10.05.2024).
9. 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; 33 (4): 3403–3420. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00028>.
10. 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». *ГНОЗІС*. Київ, Україна. 2013.
11. Lohvyniuk M., Novakivskyi Y. “CFD modeling of thermal processes in the firebox and heat load distribution on the screen surface firebox”. *Heliyon*. 2024; 10 (5): 1–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27324>.
12. Сірий О. А., Абдулін М. З., Баранюк О. В. «Дослідження гідродинаміки потоку повітря в струменево-нішевій системі спалювання палива». *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. НТУ «ХПІ» Харків, Україна. 2016; 9 (1181): 94–100. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2016.09.14>.

13. Сірий О. А. «Вплив параметрів струменево-нішевої системи на робочий процес пальникових пристроїв». Дис. канд. техніч. наук: 05.14.14 / НТУУ „КПІ”. Київ, Україна. 2016.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.01.2024.51>

UDC 536.24:536.423

Modeling of fuel combustion processes in a steam boiler when replacing standard burners

Oleksandr V. Baraniuk^{1,2)}

Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Heat and Alternative Power Engineering

ORCID: orcid.org/0000-0003-0610-1403; olexandr.baranyuk@gmail.com. Scopus Author ID: 57201024575

Arthur Yu. Rachynskiy¹⁾

Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Heat and Alternative Power Engineering

ORCID: orcid.org/0000-0001-6622-1517; arturrachinskiy@gmail.com. Scopus Author ID: 57190884322

Olga Yu. Chernousenko¹⁾

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Heat and Alternative Power Engineering

ORCID: orcid.org/0000-0002-1427-8068; chernousenko20a@gmail.com. Scopus Author ID: 57222080457

¹⁾ National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

37, Beresteiskiy Prospect, Kyiv, 03056, Ukraine

²⁾ Institute of Thermal Energy Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine,
19, Andriivska Str. Kyiv, 04070, Ukraine

ABSTRACT

To date, most of Ukraine's thermal power equipment has exhausted its factory resource and is physically and morally obsolete. One of the ways to solve this problem is to modernize it with the introduction of modern fuel-using equipment. The decisive direction in this situation is the focus on domestic technologies, which differ from imported counterparts due to better adaptability to domestic equipment, as well as a more favorable price policy for domestic manufacturers. The presented work was carried out in order to check the feasibility of replacing standard burners with burners built on the basis of jet-niche technology in power boilers, for example, such as the GM-50 (E-50-3,9-440GM) steam boiler. For this, a computer model of a steam boiler and regular burners was developed. The research was carried out using the ANSYS Student software package. The application of the numerical modeling method using the ANSYS Student software complex made it possible to perform a detailed analysis of the fuel combustion process in a steam boiler, evaluate its efficiency and study the impact on environmental indicators. The object of the research was the processes that take place during the combustion of gaseous fuel and their influence on the performance indicators of the GM-50 power boiler. The subject of the study was a CFD fuel model of the GM-50 boiler, whose regular burners are capable of working on both liquid and gaseous fuel. Methane was used as fuel. Both regular axial burners and burners built on the basis of jet-niche technology, which are more environmentally friendly, were used as burners. Verification of the CFD model, which took place using a known analytical technique, 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 selected as a comparison parameter. The temperature value of 1117 °C was obtained analytically. Calculation using the CFD model developed in the ANSYS-CFX environment shows that the temperature value should be 1042 °C. It was determined that regular burners are less environmentally friendly than, for example, modern jet-niche ones. So, for the coefficient of excess air $\alpha = 1.2$, the average value of nitrogen oxides at the fuel outlet is 187 ppm. It makes sense to replace standard burners, for example, with jet-niche ones, which are most suitable for replacing standard ones.

Keywords: Furnace; boiler; CFD modeling; hydrodynamic interaction; torch; NO_x; heat flow