

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.01.2024.52>

УДК 536.24:536.423

Моделювання теплоаеродинамічних та екологічних параметрів на прикладі двотрубного водогрійного котла, який відпрацював значний ресурс часу

Рачинський Артур Юрійович¹⁾

Канд. техн. наук, доцент, доцент каф. Теплової та альтернативної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-1517>; arturrachinskiy@gmail.com. Scopus Author ID: 57190884322

Баранюк Олександр Володимирович^{1,2)}

Канд. техн. наук, доцент, доцент каф. Теплової та альтернативної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-1403>; olexandr.baranyuk@gmail.com. Scopus Author ID: 57201024575

Черноусенко Ольга Юрївна¹⁾

Д-р техн. наук, професор, завідувач каф. Теплової та альтернативної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>; chernousenko20a@gmail.com. Scopus Author ID: 57222080457

¹⁾ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
просп. Берестейській, 37. Київ, 03056, Україна

²⁾ Інститут теплоенергетичних технологій Національної академії наук України вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна

АНОТАЦІЯ

Теми, які пов'язані зі згорянням палива та його впливом на навколишнє середовище ніколи не втрачуть своєї актуальності, оскільки питання ефективного згоряння та зменшення викидів є ключовими у виробництві електроенергії та охороні навколишнього середовища. Країни Європейського союзу масово відмовляються від використання природного газу як палива для ТЕС. Проте в країнах Азії, простота використання в промисловості природного газу в якості основного палива, його екологічність порівняно із вугіллям, дали змогу широко застосувати природний газ в промисловості та енергетиці. Порівнюючи природний газ з альтернативними горючими газами (генераторним, доменним, шахтним, біогазом) можна зробити головний висновок, про те, що він має найпривабливіші характеристики для застосування його в промисловості в тому числі і в енергетиці. Отже в найближчий час заміна його на альтернативні палива в хімічній, важкій промисловості та енергетиці неможлива.

Представлена робота присвячена CFD-моделюванню стабілізованого горіння без попереднього змішування в пальнику з низьким завихренням для двох режимів роботи котельного агрегату – номінального і на 60% потужності. Дослідження виконувалось за допомогою чисельних методів при використанні пакета прикладних програм Ansys-Fluent. Об'єктом дослідження є пальник побудований за технологією, оснований на використанні струменево-нішових систем з газорозподілом палива круглими струменями, що подаються перпендикулярно в потік окислювача через однорядну систему отворів. Предметом дослідження обрано процеси гідродинаміки і теплообміну, на підставі аналізу яких отримана модель генерації NO_x в пальниках струменево-нішового типу. В даній роботі розглядаються два типи пальників. У одного з пальників паливо подається крізь прямокутні щілини, у іншого – крізь розташовані в ряд круглі отвори. Повітря у обох пальників подається крізь прямокутні щілини. Визначено, що газороздача крізь круглі отвори посилює розпилення суміші і збільшує зону розпилення продуктів згоряння. Проведена візуалізація розподілу середньої швидкості, температури, шкідливих домішок типу NO_x та компонентів реакції. Отримані результати свідчать, що зміна режиму течії, зміщення полум'я або його нестабільності відсутні. Визначено, що на розповсюдження продуктів згоряння і шкідливих домішок типу NO_x впливають, як осова швидкість, так і тангенціальна швидкість потоку. Газороздача круглими струменями стабілізує горіння і зменшує розширення полум'я.

Ключові слова: газороздача; ANSYS-Fluent; моделювання; газоподібне паливо; горіння; метан; паливня котла; NO_x

Актуальність. Проблема українського теплоенергетичного обладнання, в тому що воно застаріло, а це в свою чергу приводить до того, що більшість такого обладнання вичерпало свій «парковий ресурс». Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є модернізація обладнання із застосуванням інноваційних технологій, що дозволять підвищити ресурс, ефективність та надійність роботи такого обладнання.

Одним із напрямків вирішення цієї задачі є орієнтація на українські технології. Вони мають багато переваг, основна із яких це краща адаптованість до існуючого обладнання, в свою чергу це дозволить спростити процес модернізації, відповідно зменшить витрати на адаптацію та на інтеграцію прийняття нових рішень. Ще одним важливим фактором є цінова політика українських виробників, що робить модернізацію економічно вигідною.

Такий розвиток та впровадження українських технологій дозволять покращити відповідні показники і тим самим зменшити залежність енергетичного сектору від імпорту,

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

що в свою чергу приведе до певної незалежності теплоенергетичного обладнання в нашій державі.

Мета дослідження полягала у визначенні методів зниження викиду шкідливих речовин у навколишнє середовище для двобарабанного водотрубного з котла типу ДКВР-10-13.

Дослідження процесів спалювання палива необхідно для оптимізації конструкції та робочих параметрів пальників. Процес горіння між паливом і повітрям передбачає перетворення хімічної енергії в теплову енергію. Необхідне повне згоряння палива для отримання максимальної теплової ефективності. Неповне згоряння є небажаним, оскільки воно виділяє в навколишнє середовище токсичні незгорілі вуглеводні, а також CO_2 , NO_x тощо [1], що призводить до забруднення навколишнього середовища і знижує ефективність спалювання палива.

Для підвищення ефективності згоряння та мінімізації викидів, як свідчить аналіз сучасної літератури, дослідниками розроблено різноманітні конструкції пальників. Наприклад, автори роботи [2] засобами CFD-моделювання визначали температуру полум'я та температуру CO_2 за різних умов потоку суміші метан-повітря. При моделюванні процесу спалювання вони використовували модель горіння без попереднього змішування. В роботі [3] досліджено фізичний механізм розгоряння полум'я та визначено межі стабільності при горінні без попереднього змішування шляхом теоретичного та чисельного моделювання. При цьому одномірний розрахунок полум'я використовується для побудови діаграми стабільності, а три окремих межі стабільності використовуються для дослідження механізму спалаху полум'я. Автори роботи [4] досліджували поведінку горіння попередньо змішаної пропану - повітряної суміші з використанням моделі k- ϵ та моделі зменшених хімічних речовин. Результати показали, що найвища температура спостерігається в областях із сильним завихренням.

Автори роботи [5] використовували CFD-аналіз для дослідження процесу горіння частково – попередньо змішаної метано-повітряної суміші в камері згоряння 2D. Їхні результати показали, що статична температура висока в зоні горіння, вона знижується до виходу з пальника.

Для дослідження процесів спалювання використовуються не тільки відомі експериментальні та чисельні методи але і новітні технології у вигляді лазерної діагностики. Наприклад, автори роботи [6] визначили характеристики реакційних зон при турбулентному горінні попередньої суміші. Вони показали, що товщина зони попереднього нагріву та реакції збільшується у багато разів, у зрівнянні з ламінарним аналогом. Вони дійшли до висновку, що енергетичні вихори можуть потенційно проникати в ядро полум'я і таким чином розширювати товщину полум'я.

Аналіз доступної літератури показав, для зниження емісії шкідливих речовин, окрім вдосконалення конструкції пальника, слід враховувати можливість заміни метану на інші види палива. Так автори роботи [7] досліджували поведінку горіння пропану та метану за допомогою моделі горіння без попереднього змішування на основі CFD. Вони запропонували пропан, як більш ефективне паливо, замість метану для розробленої ними камери згоряння.

Методика CFD-моделювання метано – повітряного палива, для умов стаціонарного стану з використанням обчислювальної динаміки рідини з моделлю турбулентності k- ϵ приведена в роботі [8].

Аналіз приведених вище публікацій свідчить, що в розрахунковій практиці вже сформовані загальні риси вже комп'ютерних моделей процесів спалювання і транспорту газу, яких слід притримуватись, щоб досягти коректного, з фізичної точки зору, результату. А саме: процес горіння, слід моделювати з використанням моделі перенесення компонентів (Species Transport) та k- ϵ моделі турбулентності зі стандартними або масштабованими пристінними функціями. Згадану методику моделювання можна використати для аналізу течії і теплообміну в паливній котельного агрегату шляхом зміни конструктивних і режимних параметрів встановлених в котельний агрегат пальників.

Досить поширеними у малій енергетиці є котли типу ДКВР. Дослідження автора [9] свідчить, що практично на всіх модернізованих котельних агрегатах, за рахунок зниження коефіцієнта надлишку повітря до 1.04...1.07 і значному зниженні температури газів, що йдуть у широкому діапазоні навантаження, забезпечувалося високе, порівняно з паспортним, значення ККД бруто (близько 95 %). На одному з котлів ДКВР-6,5, що працює у водогрійному режимі, були проведені порівняльні випробування пальників СНД-43 із системою з двох ніш (приструйної та торцевої) та штатних пальників ГМГ-4. Результати вимірювання параметрів роботи котла до і після модернізації результати досліджень показали, що котел, який знаходився в експлуатації близько 40 років і дещо знизив свої економічні характеристики, після модернізації суттєво перевищив паспортні значення ККД.

Результат моделювання залежить від багатьох параметрів, проте одними із найважливіших є щільність розрахункової сітки, скошеність і співвідношення сторін скінчених елементів, а також їх тип. В ANSYS є можливість побудови розрахункової сітки на основі скінчених елементів у вигляді тетраедра, паралелепіпеда та їх комбінації – так звану гібридну скінчено-елементну сітку.

Була розроблена CFD-модель паливни з встановленим струменево-нішевим стабілізатором полум'я, який використовується як пальник. Для апроксимації розрахункової області використовувалась неструктурована (тип скінченого-елементу тетраедр), структурована (тип скінченого-елементу паралелепіпед) і гібридна скінченно-елементна сітка. Значення «якості» скінчено-елементної сітки – параметри співвідношення сторін (AspectRatio) скінченного елементу, ортогональна якість (Orthogonal Quality) та скошеність (Orthogonal Skew), знаходяться по середині референтного інтервалу, що видає програма для перевірки. Щільність розрахункової сітки вибрана максимальною, в рамках дозволеного версією ANSYS-Student.

В якості керуючих рівнянь, що використовуються в математичній моделі процесу є рівняння нерозривності, Нав'є-Стокса для течії в'язкої рідини, що стискається, зі змінними властивостями, рівняння енергії та рівняння збереження компонентів суміші [10], що вирішується чисельними методами в середовищі Ansys-Fluent. В процесі моделювання також використовувалась стандартна методика Ansys-Fluent для прогнозування утворення NO_x. А саме, розраховувалась генерація як теплових, так і швидких NO_x. Стандартна методика Ansys-Fluent враховує турбулентно-хімічну взаємодію, що дозволяє обчислювати утворення NO_x з урахуванням впливу турбулентних пульсацій на усереднені за часом швидкості реакції. Для прогнозування концентрації радикала O, необхідної для прогнозування теплового NO_x використовується модель часткової рівноваги.

В якості алгоритму рішення обрано неявний алгоритм встановлення (Pressure Based Implicit). Розрахунок зроблений в стаціонарній постановці (Steady).

Як розрахункову модель автори використовували Realizable k-ε модель турбулентності в модифікації realizable, оскільки вона розроблена для потоків, що містять струмені (вприскування паливо-повітряної суміші).

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

На вході в розрахункову область задаються масова витрата (Massflow Inlet) і температура. На виході – статичний тиск (Pressure outlet).

Теплообмін в паливні котла в першу чергу визначається режимом течії, що організована пальниками. Потік струменем з пальника направляєтся на «вихід» з паливни, де тиск найменший. Над струменем, утворюється застійна зона з циркуляційною течією, рух в якій підтримується рухомими масами газу внаслідок дії різниці температур між розжареним факелом полум'я (орієнтовно 1600 °C) та поверхнею барабана (середня температура стінки якого становить 120 °C).

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

Вплив типу газороздачі (подача газу або крізь прямокутні щілини, або крізь розташовані в ряд круглі отвори) характеризується розподілом температур в об'ємі паливні. Аналіз результатів дослідження свідчить, що в центрі паливні виникає зона пониженого тиску відносно якої спостерігається циркуляційна течія. На периферії цієї течії спостерігаються зони, температура яких відповідає температурі факелу полум'я. Пояснюється це явище вільно-конвективним рухом мас газу внаслідок зміни густини. Довжину факелу полум'я можна визначити за допомогою параметру Mixture Fraction. Цей параметр відображає інтенсивність процесу перемішування і найбільш повно характеризує ступінь змішування палива й окислювача (наприклад, у прореагованому полум'ї). Значення нуль відповідає 100 % окислювача, а значення 1 відповідає 100 % палива. Зона перемішеного з повітрям газу опосередковано зображає форму факелу розжарених газів оскільки саме в цій області власне і відбувається реакція хімічної взаємодії метану з киснем.

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

Розподіл окислів азоту NO_x в двох взаємоперпендикулярних перерізах – крізь середину пальника і переріз «виходу» потоку з паливні свідчать, що максимальна концентрація забруднюючих речовин спостерігається в зонах з високих температур. Ці зони формуються згідно гідродинамічної структури потоку в паливні і генерація забруднюючих частинок в них напряму залежить від часу перебування частинки повітря в зоні дії високих температур.

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

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

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

Розрахунок генерації NO_x проводився також при 60% тепловому навантаженні та були отримані результати досліджень, аналіз яких, свідчить про те, що подача газу в прямокутні щілини зменшує генерацію NO_x , порівняно з експериментом на струменево-нішевому пальнику, на 12 %. Цей ефект пов'язаний з тим, що середня температура паливної стає значно нижчою. Слід зауважити, що викликає занепокоєння те, що температурне поле барабана котла, який встановлений в верхній частині паливної є нерівномірним, що негативно впливає на його міцність.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hossain Md. A. “Computational Study of Methane-air Combustion Using the Species Transport Model”. *AIAA SciTech Forum*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2022-1102>.
2. Kumar A., Janjanam N., Nagaraju M., Diwakar V. “CFD analysis of combustion parameters of methane-airmixture”. *International Journal of Engineering Research and*. 2015; 4 (05). DOI: <https://doi.org/10.17577/IJERTV4IS050217>.
3. Li D., Ihme M. “Stability diagram and blow-out mechanisms of turbulent non-premixed combustion”. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2021; 33 (4): 6337–6344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.06.225>.
4. Anetor L., Osakue E., Odetunde C. “Reduced mechanism approach of modeling premixed propane-airmixture using ANSYS fluent”. *Engineering Journal*, January. 2012; 16 (1). DOI: <https://doi.org/10.4186/ej.2012.16.1.67>.
5. Rajak A., Datta A., Kureel V. “Analysis of combustion characteristics of methane/air mixture incoaxial combustor”. *Int. J. Adv. Res. Sci. Eng*. 2015; 5: 277–285.
6. Sajjad M., An Q., Vena P., Yun S., Kheirkhah S. “Thick reaction zones in non-flameletturbulent premixed combustion”. 2020; 222: 285–304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.08.047>.
7. Nair A. S., Mohan Krishna B., Ajith Kumar S. “Study of non-Premixed combustion of propane and methane using CFD”. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 46 (10): 4593–4597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.713>.
8. Rajak U., Verma T. “Numerical investigation on cylindrical combustion chamber for methane-air fuel”. *International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering (IJTARME)* SSN (Print): 2017; 6 (2): 148–150.
9. Абдулін М. З. «Розроблення теплофізичних засад технологій спалювання палив з застосуванням струменево-нішових систем». *Дис. ... док. техн. наук: 05.14.06 «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика» / ІТТФ НАН України*. 2019.
10. “ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide”. 2012. *ANSYS Inc. ANSYS Help*. – Available from: <https://ansyshelp.ansys.com>.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.01.2024.52>

UDC 536.24:536.423

Modeling of thermo-aerodynamic and environmental parameters on the example of a two-pipe water heating boiler that has worked out the park resource

Arthur Yu. Rachynskiy¹⁾

PhD, Associate Professor, Department of Heat and Alternative Power Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-1517>; arturrachinskiy@gmail.com

Oleksandr V. Baraniuk^{1,2)}

PhD, Associate Professor, Department of Heat and Alternative Power Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-1403>; olexandr.baranyuk@gmail.com

Olga Yu. Chernousenko¹⁾

Dr. Sc., Professor, Head of Department of Heat and Alternative Power Engineering

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>; chernousenko20a@gmail.com

¹⁾ National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
37, Beresteiskyi Ave, Kyiv, 03056, Ukraine

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

ABSTRACT

Topics related to fuel combustion and its impact on the environment will never lose their relevance, as the issues of efficient combustion and emission reduction are key in power generation and environmental protection. The countries of the European Union are massively abandoning the use of natural gas as a fuel for thermal power station. However, in Asian countries, the ease of using natural gas in industry as the main fuel, its environmental friendliness compared to coal, made it possible to widely use natural gas in industry and energy. Comparing natural gas with alternative combustible gases (generator, blast furnace, mine, biogas), the main conclusion can be drawn that it has the most attractive characteristics for its use in industry, including energy. Therefore, it is impossible to replace it with alternative fuels in the chemical, heavy industry and energy industry in the near future.

The presented work is devoted to CFD modeling of stabilized combustion without premixing in a burner with low swirl for two operating modes of the boiler unit - nominal and at 60% capacity. The study was carried out using numerical methods using the ANSYS-Fluent application program package. The object of the study is a burner built according to the technology based on the use of jet-niche systems with gas distribution of fuel by circular jets fed perpendicularly into the flow of the oxidizer through a single-row system of holes. Hydrodynamics and heat exchange processes were chosen as the subject of research, based on the analysis of which a model of NO_x generation in SNS was obtained. In this work, two types of burners are considered. In one of the burners, fuel is supplied through rectangular slits, in the other – through round holes arranged in a row. Air is supplied to both burners through rectangular slits. It was determined that gas distribution through round holes increases the spraying of the mixture and increases the area of spraying of combustion products. Visualization of the distribution of pressure, temperature, kinetic energy profiles of turbulent pulsations and vorticity was carried out. The obtained results indicate that there are no changes in the flow regime, flame displacement or its instability. It was determined that both the axial velocity and the tangential velocity of the flow affect the distribution of combustion products and harmful impurities such as NO_x. Gas distribution in circular jets stabilizes combustion and reduces flame expansion.

Keywords: Gas distribution; ANSYS-Fluent; modeling; gaseous fuel; combustion; methane; boiler fuel; NO_x