

О. В. БАРАНЮК, О. Ю. ЧЕРНОУСЕНКО, А. Ю. РАЧИНСЬКИЙ**CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В ПАЛИВНІ КОТЛА ГМ-50**

Робота присвячена аналізу доцільності заміни штатних пальників котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) на пальники, що працюють за струменево-нішевою технологією (СНТ). Дослідження проводилось із використанням програмного комплексу *ANSYS Student*. Чисельне моделювання дало змогу детально проаналізувати процес спалювання палива в паровому котлі, оцінити його ефективність та вивчити вплив на екологічні показники. Об'єктом дослідження є процеси, які відбуваються при спалюванні газоподібного палива, та їхній вплив на показники роботи енергетичного котла ГМ-50. Предметом дослідження є *CFD*-модель паливного котла ГМ-50, штатні пальники якого здатні працювати як на рідкому, так і на газоподібному паливі. У моделі використано метан як паливо, а також порівнювались штатні осьові пальники із сучасними струменево-нішевыми пальниками, які є більш екологічними. Верифікація *CFD*-моделі, яка проводилась з використанням результатів експериментального дослідження, отриманими службою енергоресурсів ПАТ «Київенерго», Україна [9] і розрахунків моделі не перевищує 10 %. Параметрами, по яким проводилось порівняння вибрані температура по центру паливної і осереднене по площі перерізу паливної перед фестоном значення NO_x . Також виконано визначення середньої температури димових газів в «вікні фестоно» за Нормативним методом, у цьому випадку похибка між розрахунками не перевищує 6,7 %. Встановлено, що штатні пальники котла ГМ-50 признано такими, що не відповідають нормам щодо викидів оксидів азоту та пропонуються їх заміна на струменево-нішеві. Розроблена *CFD*-модель свідчить про зниження на 20% середнього значення NO_x на виході з паливної при заміні штатних пальників пальниками компанії СНТ. Отриманий результат можна пояснити тим, що для паливної котла, який оснащений пальниками компанії СНТ температура в області активного горіння досягає 1400 °C, а не до 1800 °C як у випадку використання стандартного пальника.

Ключові слова: метан, гідродинамічна взаємодія, факел, генерація окислів азоту, верифікація, тепловий потік.

О. BARANYUK, O. CHERNOUSENKO, A. RACHYNSKYI**CFD MODELING OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN A GM-50 FUEL BOILER**

This scientific paper delves into the analysis of the feasibility of replacing the standard burners of the GM-50 boiler (E-50-3.9-440GM) with jet-niche technology-based burners (JNT). The study was conducted using the ANSYS Student software package. Numerical modeling allowed us to analyze in detail the process of fuel combustion in a steam boiler, assess its efficiency and determine the impact on environmental factors. 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 power 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. Methane was used as fuel for the given model, and standard axial burners were also compared with modern jet-niche burners that are more environmentally friendly. The verification of the CFD-model that was carried out using the data obtained by the Energy Resources Service of PJSC "Kyivenergo", Ukraine [9] during their experimental studies and the model calculations showed that the discrepancy does not exceed 10 %. The parameters used for comparison were the temperature at the center of the fuel and the average NO_x value over the cross-sectional area of the fuel in front of the festoon. The average temperature of flue gases in the "festoon window" was also determined using the Normative method, and in this case the discrepancy between the calculation data does not exceed 6.7 %. It was established that the standard burners of the GM-50 boiler fail to meet the standards for nitrogen oxide emissions and it was recommended to replace them with the burners of a jet-niche type. The developed CFD-model shows a 20% reduction in the average NO_x value at the fuel outlet when replacing standard burners with JNT burners. The obtained result can be explained by the fact that the temperature in the active combustion area of a fuel boiler equipped with JNT burners reaches 1400 °C, and not up to 1800 °C as in the case of using standard burners.

Key words: methane, hydrodynamic interaction, torch, generation of nitrogen oxides, verification, and the heat flow.

Вступ

Незважаючи на безвуглецеву політику в сучасній енергетиці, спалювання вуглеводневого палива залишається одним із основних джерел енергії, тому реконструкція котелень з метою зменшення шкідливих викидів є дуже актуальною. В роботі [1] проведено дослідження зниження викидів оксидів азоту різними методами та їх комбінаціями на діючих типових парових та водогрійних котлах України при спалюванні газового палива. Експериментальні дослідження енергетичного парового котла ТГМП-314 показали, що при зниженні об'ємної теплової напруги топки до 55 % від номінальної потужності при коефіцієнті рециркуляції димових газів 17 % викиди оксидів азоту скоротилися на 75 % і майже відповідають вимогам директиви IED [1]. Цей метод щодо зменшення викидів оксидів азоту також можливий для ін-

ших типів котлів, які вичерпали свій заводський ресурс.

На водогрійному котлі КВГМ-180, обладнаному стандартним рециркуляційним димососом, проведено дослідження з метою зниження викидів NO_x при спалюванні природного газу з рециркуляції димових газів у повітря, що нагнітається. Викиди NO_x були зменшені на 67 % до європейських стандартів, а концентрація оксиду вуглецю в димових газах була нижче 100 мг/Нм³ (при 3 % O_2) завдяки коефіцієнту рециркуляції приблизно 30 %. Стандартні пальники в котлі КВГМ-180 є двопотокowymi і їх можна вважати різновидом пальників ступінчастого горіння. Тобто в даному випадку застосовувалося поєднання пальників ступінчастого спалювання та рециркуляції димових газів у повітря для вдування.

В паровому котлі ДКВР-6,5-13 проведено дослідження спалювання суміші метану та вуглекис-

лого газу у співвідношенні CH_4 (76 %) та CO_2 (24 %) (біогаз) з метою зменшення утворення та викидів оксидів азоту. Отриманий рівень NO_x в димових газах знаходиться в діапазоні 63 – 76 мг/Нм³ (при 3 % O_2), що повністю відповідає нормам Європейського союзу (ЄС).

Так, наприклад в роботі [2], з метою необхідності модернізації настиного котла потужністю 600 МВт продиктована необхідність дослідити стабільність горіння в пальнику та визначити оптимальні режими роботи. Вплив комбінованих режимів пальників на процес згоряння в печі досліджується на 25 % і 35 % максимальних безперервних потужностей котла (BMCR). В роботі [2] проводилось дослідження двох конфігурацій комбінацій пальників. В одному режимі працюють пальники рівнів А, В і С, які включають нижні шари пальників на передній і задній стінках котла, а також пальники середнього шару на задній стінці, які називаються OM_1 . В іншому режимі працюють пальники в шарах А і С, які включають нижні шари пальників на передній і задній стінках котла, які називаються OM_2 . Результати показують, що OM_2 демонструє чудові можливості в організації розподілу поля швидкості повітряного потоку та поля температури за умови забезпечення не більш ніж 1 % зниження швидкості вигорання пиловугільного палива. Коли використовується OM_1 , потік повітря, що випускається з пальників середнього рівня, перешкоджає руху вгору пиловугільного палива, що розпилюється з пальників нижнього рівня, в результаті чого більша частка пиловугільного палива потрапляє в бункер для золи для спалювання. Отже, бункер для золи досягає пікової молярної частки CO_2 на рівні 0,163. OM_2 затримує змішування пилу вугілля з повітрям, збільшуючи кількість впорскування пилу вугілля на пальник. У результаті утворення CO в бункері для золи досягає значної мольної частки до 0,108. Знижена температура печі сприяє утворенню NO_x на основі палива під час роботи з низьким навантаженням. Взявши як приклад 25 % BMCR, викиди NO_x , виміряні на виході з печі, становлять 743 і 1083 ppm для OM_1 і OM_2 відповідно. Отримані результати призначені сприяти оптимізації схем спалювання для котлів електростанцій, що працюють при низьких навантаженнях.

З метою вирішення згаданої вище проблеми в роботі [3] було виконано чисельне моделювання, щоб визначити оптимальне положення інжектора метану та оцінити досяжне скорочення викидів NO_x перед застосуванням спільного спалювання метану в існуючому котлі з тангенціальним спалюванням на пиловугільному вугіллі потужністю 550 МВт (блок 3 Boryeong). Згоряння та зменшення викидів NO_x у печі були ретельно проаналізовані на основі швидкості спільного спалювання метану (до 40 %). Виходячи з просторового розподі-

лу NO_x і стехіометричного співвідношення по висоті печі, було встановлено, що оптимальне положення інжектора метану знаходиться всередині нафтового отвору. Швидкість зменшення викидів NO_x була логарифмічно пропорційною швидкості спільного спалювання метану, і порівняно з базовим сценарієм було досягнуто зниження на 69,8 % при швидкості спільного спалювання 40 %. Крім того, частка незгорілого вугілля на виході з котла була еквівалентною фракції існуючого котла, оскільки збільшення швидкості потоку щільно з'єданого та розділеного повітря для горіння покращило змішування палива та повітря. Одночасно співспалювання метану призвело до зменшення загальних втрат палива та викидів CO . Нарешті, це дослідження показало, що рекомендована оптимальна швидкість спільного спалювання становить 20 % на основі температури газу на виході з печі. За умов спільного спалювання метану 20 % котел досягнув 57,3 % скорочення викидів NO_x і 7,4 % зменшення втрат палива.

Котельне обладнання постійно вимагає модернізації. В роботі [4] були проведені експериментальні та чисельні дослідження характеристик горіння надкритичного дугового котла потужністю 600 МВт, оснащеного щільними пальниками, до та після модернізації. Експериментальні вимірювання показали, що концентрація пиловугільного палива в багатих на паливо потоках зросла завдяки вдосконаленню первинних пристроїв поділу повітря, розподілу повітря та конструкції сопла. Відстань займання багатих паливом потоків і глибина шляху полум'я стали помітно коротшими, а температура полум'я в області бункера знизилася. Чисельне моделювання також виявило, що аеродинамічне поле в паливній котла було більш симетричним і більшість частинок подрібненого вугілля були зосереджені в щільній фазі. При збільшенні відстані між двома пальниками тепловиділення по ширині топки було більш рівномірним, і тим самим підвищилася безпека роботи котла.

Підвищення ефективності роботи котла часто виконується за рахунок зміни конструкції пальників. Це необхідно також для підвищення гнучкості вугільних генеруючих установок, підвищення гнучкості енергетичної системи та сприяння скороченню викидів забруднюючих частинок. В роботі [5] проводилось порівняння стабільної здатності запалювання пальників з плавним корпусом і щільним пальником з прямим корпусом. У цьому дослідженні було використано метод аналізу запалювання ланцюга нагріву рефлюксу, щоб вивчити відмінності в механізмі постійного згоряння між пальником з плавним корпусом і пальником з щільним кольором. Експеримент термічного спалювання було проведено з використанням однокутової печі для спалювання вугільного порошку. Експериментальні результати порівнювали з ре-

зультатами теоретичного аналізу. Крім того, було проведено дослідження щодо застосування пальників із щільним плавним корпусом у глибокому зменшенні піків котла електричної установки потужністю 330 МВт. Результати показали, що температура паливо-повітряної суміші в пальнику з щільним корпусом буде вищою, ніж у пальника з корпусом. Це підвищить його здатність до постійного горіння. Було виявлено, що результати випробування горіння узгоджуються з результатами аналізу, вказуючи на те, що коли пальник із щільним корпусом використовується на установці потужністю 330 МВт, спалювання в котлі є в хорошому стані. У цьому випадку він має стабільну потужність згорання 66 МВт (що на 20 % економічно доцільніше).

Модернізація пальника суттєво впливає на функціонування котлової системи, що доведено в роботі [6], де автори визначили ефективність модифікованого пальника, форсунки для наджарового повітря (*OFA*) і каналу вторинного повітря продемонстровано за допомогою чисельного моделювання. Модернізацію автори виконали шляхом інтеграції поліповітряних кілець у пальники та сопла *OFA* на бічній стінці. Це вирішує проблему нерівномірного розподілу потоку сопла *OFA*, одночасно покращуючи швидкість потоку повітря з обох боків пальників та сопел *OFA*. Автори запропонували, що основний повітропровід можна розділити на три менших повітроводи, встановивши два дефлектора на куті вторинного повітропроводу. Ця схема ефективно зменшує падіння тиску на межі розділу між кутами пальника з 337,4 Па до 254,3 Па.

У роботі [7] було запропоновано впорскування повітря тангенціально для покращення горючості та викидів NO_x у котлі потужністю 500 МВт. Розташування інжекційних отворів було визначено на основі траєкторії частинок вуглецю та її вплив досліджено чисельними методами. Витрата субповітря встановлювалася на 0,5 % і 10 % від загального повітря для горіння. Швидкість потоку вторинного повітря було відповідно зменшено, щоб забезпечити постійність загальної кількості повітря для горіння. Результати моделювання показали, що тангенціальне впорскування повітря покращило горючість частинок вуглецю. Крім того, за допомогою цього методу було досягнуто зниження NO_x на 6,3 % і 13,2 %, коли субповітря становив 5 % і 10 % повітря для горіння відповідно. Це зниження пояснюється зниженням пікової температури в результаті ширшої області горіння. Запропонована технологія «*subair*» покращила горючість вугілля та успішно зменшила викиди NO_x з котла.

Як згадувалось вище, використання закручених потоків в пальниках сприяють як стабільності горіння так і зниженню викидів NO_x . Так, щоб

спалити антрацит і зменшити викиди NO_x , нову систему згорання було застосовано до котла *Babcock & Wilcox (B&W)* потужністю 300 МВт, внаслідок зменшення площі потоку внутрішнього та зовнішнього каналів вторинного повітря шляхом встановлення вихрових пальників [8]. Для оцінки загальної продуктивності модернізованого котла були проведені вимірювання в промисловому масштабі (коригування коефіцієнтів повітря надпалу (*OFA*) від 15,4 % до 22,6 %). Результати експерименту показали, що нова система спалювання сприяє займанню вуглецево-повітряної суміші та стабільності горіння. Вимірювання концентрації кисню та монооксиду вуглецю в області, розташованій біля бічної стінки котла, показало, що ступінь наповненості полум'я змінювався при різних співвідношеннях *OFA*. Враховуючи як екологічні, так і економічні розрахунки, значення 19,7 % було обрано як оптимальне співвідношення *OFA*, завдяки чому досягнуто значного зниження викидів NO_x на 47 % без збільшення вмісту вуглецю в летючій золі.

Мета роботи

За мету роботи ставилась задача обґрунтувати доцільність заміни штатних пальників на пальники, що побудовані на основі струменево-нішевої технології (СНТ), в енергетичних котлах, наприклад, таких як паровий котел ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ). Під час досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- аналіз гідродинамічної та теплової структури течії в паливній котла з врахуванням повноти спалювання палива і рівномірності розподілу температур;
- визначення рівня емісії NO_x на виході з паливної до і після заміни пальників.

Опис CFD-моделі

Відомо, що результати *CFD*-моделювання потрібно верифікувати з експериментальними даними. В якості даних для верифікації використані дані експериментального дослідження, отримані службою енергоресурсів ПАТ «Київенерго», Україна, що також використані в роботі [9]. Тому автори роботи розробили геометричну модель паливної котла ГМ-50 та пальників ГМГ-5 згідно креслеників, що були приведені в [9]. Для моделювання був використаний пакет *ANSYS-Student*. Суттєвою відмінністю представленої роботи від роботи [9] є те, що пальники, які розташовувались на фронтальних стінках паливної є комп'ютерною копією стандартних пальників типу ГМГ-5 які здійснюють введення палива в паливню (рис. 1).

Створити *CFD*-модель і паливну і пальників, що є одним цілим в конструктивному розумінні

наявними ресурсами *ANSYS-Student* неможливо, тому автори окремо проводять обчислення по *CFD*-моделі паливника, записують результат розрахунку *Profile*, за посередництвом якого передають параметри метану, змішаного з повітрям для подальшого «спалювання» в *CFD*-моделі паливни котла ГМ-50.

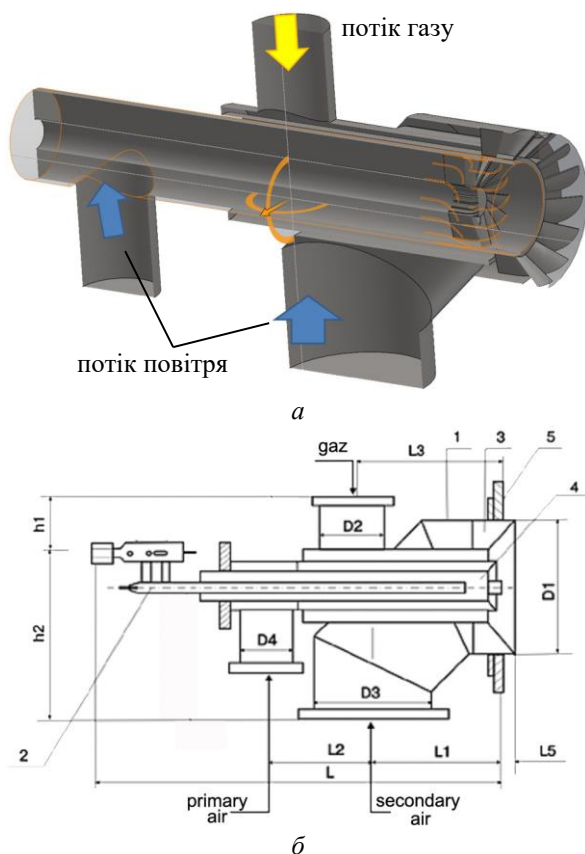


Рис. 1 – Газо-мазутний паливник ГМГ-5:
1 – корпус; 2 – форсунка паромеханічна;
3 – завихрювач вторинного повітря; 4 – завихрювач первинного повітря; 5 – плита монтажна;
а – геометрична модель; б – кресленик

У представленій роботі для моделювання процесу горіння в паливні котла ГМ-50 в середовищі *ANSYS-CFX* використана хімічна модель скінченної інтенсивності (*finite-rate chemistry model*). Згоряння моделювалось за допомогою загального однокрокового механізму реакції (*one-step reaction mechanism*), де реакція визначалась стехіометричними коефіцієнтами, ентальпіями реагентів і параметрами, від яких залежить ступінь реакції.

Ступінь реакції визначався на основі припущення, що турбулентне перемішування реагентів є основним фактором, який обмежує швидкість реакції. Турбулентно-хімічна взаємодія моделювалась з використанням моделі вихорової дисипації (*eddy-dissipation model*).

Для моделювання реакцій була використана модель перенесення реагентів (*species transport model*).

Для чисельного інтегрування систем диференціальних рівнянь, що формують математичну модель процесу, що розглядається, використовувався метод контрольного об'єму.

При моделюванні як паливників так і паливни використана гібридна сітка (рис. 2). Вона враховувала розвиток примежового шару на поверхнях стінок паливників та котла. Область поза примежовим шаром була модельована за допомогою нерівномірної тетраедричної сітки. При цьому скошеність (*Skewness*) не перевищувала 0,8, а співвідношення сторін (*AspectRatio*) елементів сітки не перевищувало 40. Відстань між сусідніми вузлами сітки регулювалась параметром *Relevance Center* з рівнем «*Fine*», що забезпечує найвищу щільність сітки. Розмір елементів сітки визначався в полі *Element Size* параметром *Relevance Center*. Поєднання структурованої та неструктурованої сіток здійснювалось за допомогою методу *MultiZone*.

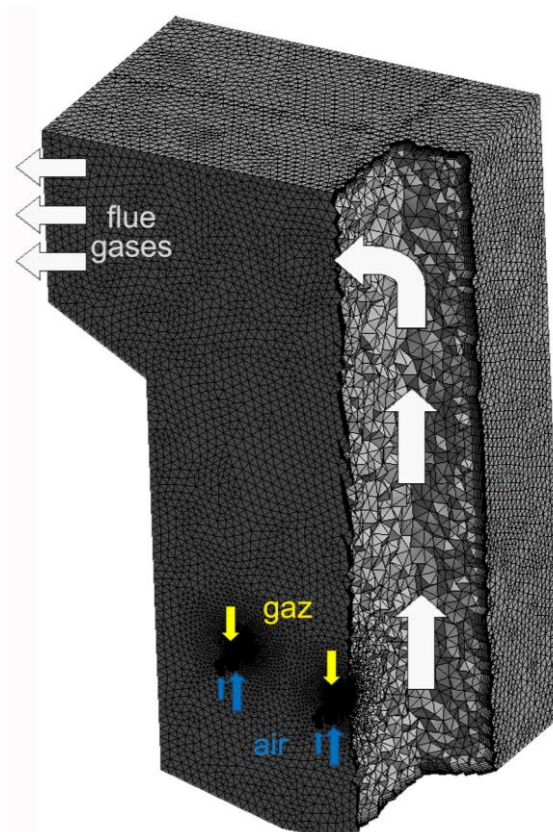


Рис. 2 – Зовнішній вигляд з розрізом *CFD*-модель паливни котла ГМ-50 з зображенням руху потоків газів

Під час налагоджувальних експериментів було визначено значення щільності розрахункової сітки, яке не впливало на результати розрахунків.

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 використовувється система рівнянь нерозривності, Нав'є-Стокса для течії в'язкої рідини, що стискається, зі змінними властивостями, рівняння енергії і збереження компонентів суміші [10].

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 на вхідних патрубках пальників задавались масові витрати і температури газу, первинного та вторинного повітря, які змішуються в пальниках. Згідно [9] витрата первинного повітря становила 800 кг/год, витрата вторинного повітря – 8000 кг/год. Витрата газу – 936 кг/год. На бічних стінках паливни задається температура поверхні стінки згідно роботи [9], де автори її визначали з балансу котла. Коефіцієнт випромінювання стінки встановлюється рівним 0,8.

Згідно рекомендацій [11] задача вирішувалась в два етапи. На першому етапі вирішуються керуючі рівняння газової фази, поки не буде досягнуто усталеного стану реакції горіння. Другий етап включає розв'язання рівнянь переносу для видів NO_x і прогнозування утворення оксидів азоту.

Як паливо для моделювання використовувався метан. Оскільки, як доведено в роботі [9], природний газ, майже з 99 % CH_4 і до 1 % N_2 . Теплотворна здатність CH_4 становить 35,9 МДж/м³, а природного газу (наприклад, газопровід Уренгой-Ужгород), 35,59 МДж/м³. Різниця в теплотворній здатності метану і природного газу становить менше 1 %, що дозволяє вважати ці види палива схожими, тому при моделюванні може використовуватись чистий CH_4 для спрощення моделювання.

Оскільки в даній роботі теплообмін і аеродинаміка в пальниках (рис. 1) і в паливні (рис. 2) рахувався окремо (дані потоку після пальника записувались в окремих Profile, що дозволяє методика використання ANSYS-Fluent) автори використали їх в моделі паливни знову, конвертуючи дані потоку на виході з пальника, що побудований з використанням струменево-нішевої технології. Цей пальник володіє властивістю раціонального почат-

кового розподілу палива у потоці окислювача, стійкою і керованою аеродинамічною структурою течії палива, окислювача та продуктів згорання, а також саморегулюємостю складу паливної суміші у зоні стабілізації факелу [12], [13].

Комп'ютерна модель пальника представлена на рис. 3. Дана конструкція дає змогу поєднати в собі усі стадії робочого процесу пальників такі як: розподіл палива в потоці, утворення суміші з необхідними рівнями концентрацій палива, запалення горючої суміші, стабілізація факелу та формування продуктів згорання необхідної якості та без шкідливих викидів, термічну підготовку палива та самоохолодження термічно навантажених елементів пальника.

Подача газу в пальнику здійснюється в загальний колектор який роздає газ на пілони. Пілони формують роздачу газу через один ряд отворів. Проте, кресленики пальника є комерційною таємницею компанії СНТ [14].

Для того, щоб процес порівняння відбувався в однакових умовах, розрахунки для обох досліджених випадків проводились при однакових граничних умовах.

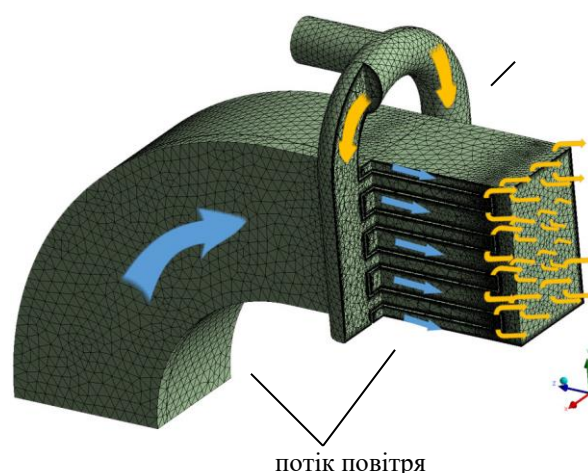


Рис. 3 – CFD-модель пальника, що побудований з використанням струменево-нішевої технології

Обговорення результатів верифікації

В якості результатів моделювання, що вибрані для верифікації моделі вибрано розподіл температур і емісію оксидів азоту в паливні котла. На рис. 4а зображено температурне поле центрального поздовжнього перерізу паливни. На рис. 4б показано зміну температури димових газів в зоні активного горіння та в зонах горіння основного палива в залежності від висоти топки.

Як свідчить рис. 4, температура димових газів в активній зоні горіння та на виході з топки збігається з максимальним відхиленням до 3 % з експе-

риментальними даними [9]. Температури в нижній частині паливні 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-Fluent*. Також необхідно відмітити, що виходячи з експериментальних точок (рис. 4б) температурне поле в середині паливні повинно бути достатньо рівномірним, проте і в даній роботі,

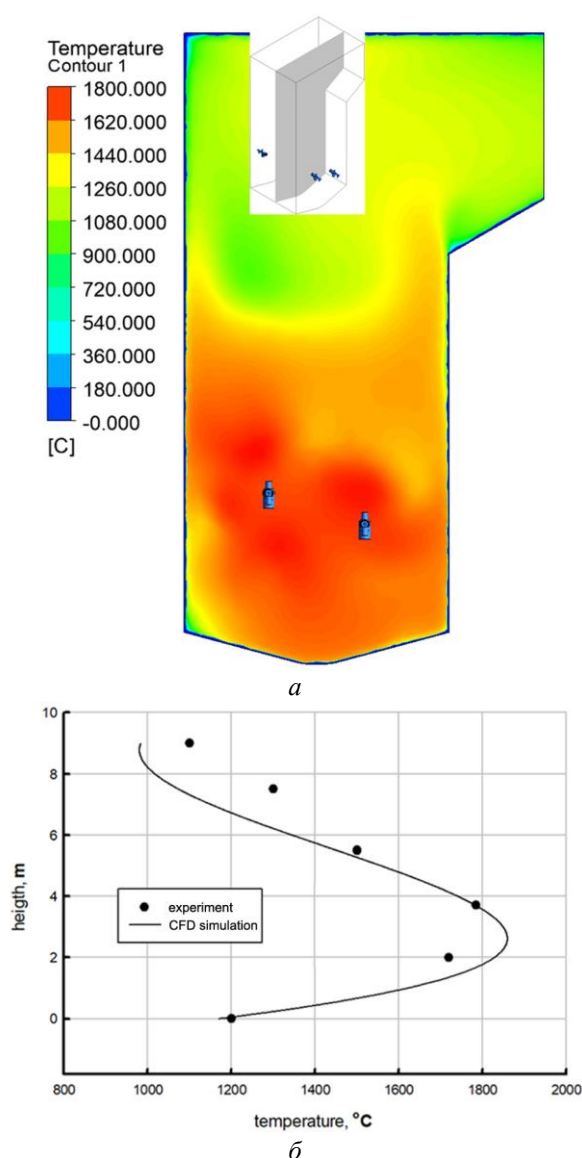


Рис. 4 – Розподіл температур:
а – температурне поле центрального позовжнього перерізу паливні; б – зміна температури продуктів згоряння по центральній осі по висоті топки

і в роботі [9] спостерігається більш інтенсивне охолодження димових газів в зоні допалювання.

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. Так як, в даній роботі хоча коефіцієнт надлишку повітря знаходиться становить 1,1, максимум інтенсивності генерації окислів азоту зміщується в кінець 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 (целіт, 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. 5) становить 319 ppm.

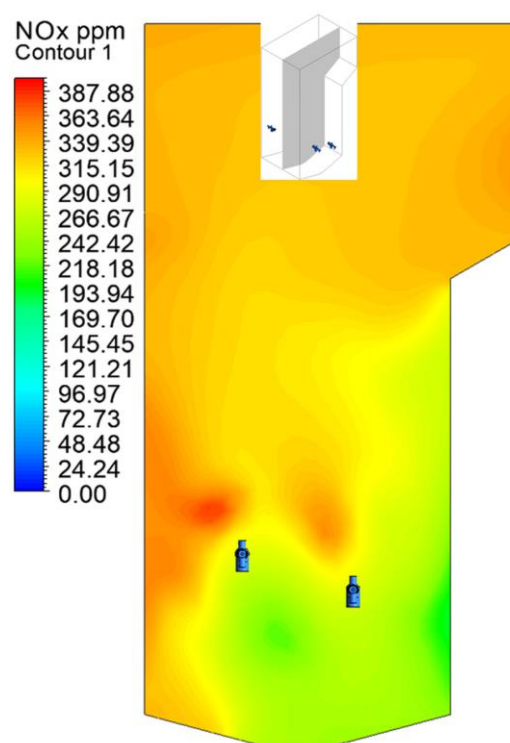


Рис. 5 – Розподіл NO_x в центральному позовжньому перерізі паливні

Це значення достатньо узгоджується з результатами експериментального дослідження, отриманими службою енергоресурсів ПАТ «Київенерго», Україна [9]. Експеримент [9] свідчить, що середнє значення оксидів азоту на виході з паливної 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.

Обговорення результатів модернізації

Валідація методик розрахунку і верифікація результатів свідчить про адекватність моделі. Отже стає можливим замінити в моделі котла ГМ-50 стандартний пальник ГМГ-50 на струменевонішевий і перевірити екологічні характеристики котла після заміни пальника.

Як свідчить рис. 6, середнє значення оксидів азоту на виході з паливної становить 262 ppm (зниження становить 20 %). Отже, якщо модель свідчить про зниження концентрації забруднюючих частинок, тоді слід сподіватись, що при фізичному експерименті забруднення буде меншим, ніж при використанні стандартних пальників.

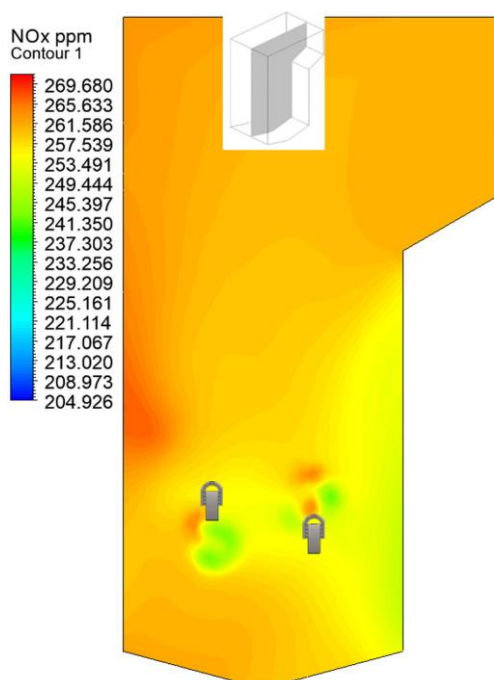


Рис. 6 – Розподіл NO_x в центральному поздовжньому перерізі паливної з СНТ

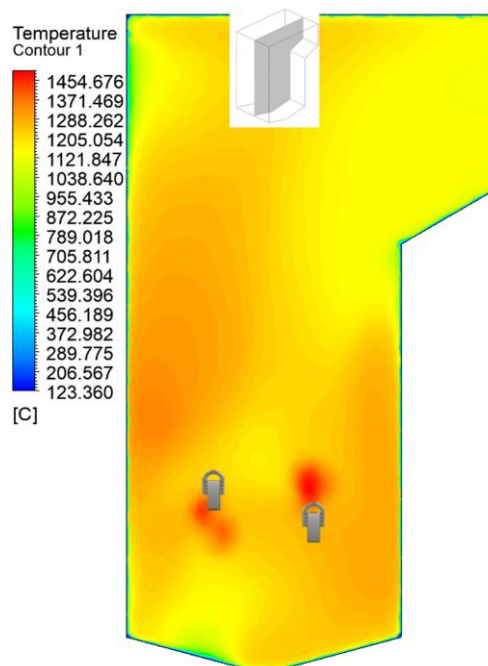


Рис. 7 – Розподіл температур в центральному поздовжньому перерізі паливної з СНТ

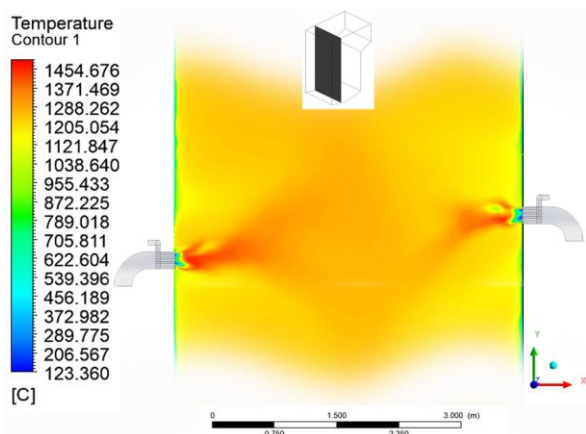


Рис. 8 – Розподіл температур в центральному поперечному перерізі паливної з СНТ

Аналіз даних рис. 6 також свідчить, що розподіл оксидів азоту на виході з паливної котла ГМ-50, який оснащений пальниками компанії СНТ більш рівномірний ніж у випадку використання стандартних пальників ГМГ-5. Областей в просторі паливної з підвищеним (більше 200 ppm) значенням NO_x і вони майже рівномірно розташовані в представленому референтному перерізі. Отриманий результат можна пояснити тим, що при комп'ютерному моделюванні паливної котла, що оснащений пальниками компанії СНТ температурне поле в паливні (рис. 7 та рис. 8) буде достатньо рівномірним. Так, в області факелу від пальника є локальне підвищення температури, причому до 1400 °C, а не до 1800 °C як у випадку використання стандартного пальника. Підвищення темпера-

тури в області активного горіння знаходиться в діапазоні 1100 °C – 1300 °C. Розмір факелу від пальника (рис. 8) теж значно менший (800 мм тоді як в стандартного ≈ 1 м).

Висновки

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання процесів спалювання метану в паливній парового котла ГМ-50, з використанням пакета програм ANSYS, дозволив зробити наступні висновки:

На основі аналізу доступної літератури визначено встановлено, що як в Європі так і в Україні достатньо багато вогнетехнічного паливо-використовуючого обладнання, що орієнтоване на спалювання природного газу і яке терміново потрібно модернізувати. Найдешевшим способом визначення перспективи модернізації обладнання є комп'ютерне моделювання процесів, що можуть мати місце до або після модернізації.

Згідно доступної літератури визначено, що своєрідним стандартом комп'ютерних моделей вогнетехнічного паливо-використовуючого обладнання ТЕС є використання моделі перенесення компонентів (*Species Transport*). Дана модель має широкі застосування щодо полум'я без і з попереднім перемішуванням палива і повітря.

Найбільш популярною для розрахунків вогнетехнічного обладнання є k - ϵ модель турбулентності зі стандартними пристінковими функціями.

Верифікація CFD-моделі, яка проводилась з використанням результатів експериментального дослідження, отриманими службою енергоресурсів ПАТ «Київенерго», Україна [9] і розрахунків моделі не перевищує 10 %. Параметрами, по яким проводилось порівняння вибрані температура по центру паливни і осереднене по площі перерізу паливни перед фестоном значення NO_x .

У випадку визначення середньої температури димових газів в «вікні фестона» за Нормативним методом, отримано значення 1117 °C. Розрахунок засобами CFD-моделі, яка розроблена в середовищі ANSYS-CFX, свідчить, що це значення має становити 1042 °C. Тобто похибка моделі не перевищує 6,7 %.

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

В якості загальних висновків можна констатувати, що комп'ютерне моделювання дозволяє проводити попередню, досить точну оцінку емісійних характеристик вогнетехнічного паливо-використовуючого обладнання при спалюванні газоподібних палив.

Список літератури

1. Sigal I. Ya. Methods to reduce NOx formation during gas combustion in boilers / I. Ya. Sigal, A. V. Smikhula, O. V. Marasin, M. O. Gurevich, E. M. Lavrentsov // *Energy Technologies & Resource Saving*. – 2022. – No. 4. – PP. 62–72. – DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.4.2022.06>.
2. Chong P. Numerical Study on Combustion Characteristics of a 600 MW Boiler Under Low-Load Conditions / P. Chong, J. Li, X. Zhu, D. Jing, L. Deng // *Processes*. – 2024. – No. 12, Is. 11. – PP. 1–17. – DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12112496>.
3. Kim K.-M. Methane Gas Cofiring Effects on Combustion and NOx Emission in 550 MW Tangentially Fired Pulverized-Coal Boiler / K.-M. Kim, G.-B. Kim, B.-H. Lee, C.-H. Jeon, J.-H. Keum // *ACS Omega*. – 2012. – Vol. 6, Is. 46. – PP. 31132–31146. – DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04574>.
4. Zhang D. Experimental and Numerical Studies on Combustion Characteristics of a 600 MW Supercritical Arch-fired Boiler Equipped with Slot Burners Before and After Retrofit. Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao / D. Zhang, H. Zhang, Y. Wu, M. Zhang, H. Kong, J. Lu // *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*. – 2017. – No. 37(2). – PP. 606–614. – DOI: <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.160628>.
5. Wang T. Experiment Study and Industrial Application of Slotted Bluff-Body Burner Applied to Deep Peak Regulation / T. Wang, C. Wang, Z. Liu, S. Ma, H. Yan // *International Journal of Information Technologies and Systems Approach*. – 2024. – No. 17, Is. 1. – PP. 1–15. – DOI: <https://doi.org/10.4018/IJITSA.332411>.
6. Ning X. Numerical study on optimization of secondary air box in a 600 MW opposed wall-fired boiler / X. Ning, Y. Yue, J. Huang, H. Ding, B. Li, L. Deng, Y. Li // *AIP Advances*. – 2023. – No. 13. – PP. 1–13. – DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0166006>.
7. Kim K.-M. Development of Subair Technique for Combustibility Enhancement and NOx Reduction in a Pulverized Coal-Fired Boiler / K.-M. Kim, S.-G. Ahn, G.-B. Kim, C.-H. Jeon // *ACS Omega*. – 2019. – Vol. 4, Is. 1. – PP. 2291–2301. – DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03405>.
8. Chen Z. Industrial-scale investigations of anthracite combustion characteristics and NOx emissions in a retrofitted 300 MWe down-fired utility boiler with swirl burners / Z. Chen, Q. Wang, X. Zhang, L. Zeng, X. Zhang, T. He, T. Liu, Z. Li // *Applied Energy*. – 2017. – Vol. 202. – PP. 169–177. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.138>.
9. Lohvyniuk M. CFD modeling of thermal processes in the firebox and heat load distribution on the screen surface firebox / M. Lohvyniuk, Y. Novakivskiy // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10, Is. 5. – PP. 1–24. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27324>.
10. ANSYS FLUENT 14.5. Theory Guide. – Canonsburg : ANSYS Inc., 2012. – 789 p.
11. Du Y. CFD investigation on combustion and NOx emission characteristics in a 600 MW wall-fired boiler under high temperature and strong reducing atmosphere / Y. Du, C. Wang, Q. Lv, D. Li, H. Liu, D. Che // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – Vol. 126. – PP. 407–418. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.147>.
12. 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» / Абдулін Михайло Загредінович ; Інститут технічної теплофізики НАН України. – Київ, 2019. – 390 с.
13. Абдулін М. З. Взаємозв'язок робочого процесу паливкового пристрою на основі струменево-нішової технології спалювання газу з екологічними аспектами роботи вогнетехнічних об'єктів / М. З. Абдулін, К. С. Горбань, О. А. Сірий // *Теплофізика та теплоенергетика*. – 2019. – Т. 41, № 3. – С. 63–69. – ISSN 2663-7235. – DOI: <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.9>.

14. Компанія Струменево-Нишова Технологія. – Назва з екрану. – URL: <http://sn-technology.com/ua/> (дата звернення 22.12.2024).

References (transliterated)

1. Sigal I. Ya., Smikhula A. V., Marasin O. V., Gurevich M. O., Lavrentsov E. M. (2022), "Methods to reduce NOx formation during gas combustion in boilers", *Energy Technologies & Resource Saving*, no. 4, pp. 62–72, <https://doi.org/10.33070/etars.4.2022.06>.
2. Chong P., Li J., Zhu X., Jing D., Deng L. (2024), "Numerical Study on Combustion Characteristics of a 600 MW Boiler Under Low-Load Conditions", *Processes*, no. 12, is. 11, pp. 1–17, <https://doi.org/10.3390/pr12112496>.
3. Kim K.-M., Kim G.-B., Lee B.-H., Jeon C.-H., Keum J.-H. (2012), "Methane Gas Cofiring Effects on Combustion and NOx Emission in 550 MW Tangentially Fired Pulverized-Coal Boiler", *ACS Omega*, vol. 6, is. 46, pp. 31132–31146, <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04574>.
4. Zhang D., Zhang H., Wu Y., Zhang M., Kong H., Lu J. (2017), "Experimental and Numerical Studies on Combustion Characteristics of a 600 MW Supercritical Arch-fired Boiler Equipped with Slot Burners Before and After Retrofit. Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao", *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, no. 37(2), pp. 606–614, <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.160628>.
5. Wang T., Wang C., Liu Z., Ma S., Yan H. (2024), "Experiment Study and Industrial Application of Slotted Bluff-Body Burner Applied to Deep Peak Regulation", *International Journal of Information Technologies and Systems Approach*, no. 17, is. 1, pp. 1–15, <https://doi.org/10.4018/IJITSA.332411>.
6. Ning X., Yue Y., Huang J., Ding H., Li B., Deng L., Li Y. (2023), "Numerical study on optimization of secondary air box in a 600 MW opposed wall-fired boiler", *AIP Advances*, no. 13, pp. 1–13, <https://doi.org/10.1063/5.0166006>.
7. Kim K.-M., Ahn S.-G., Kim G.-B., Jeon C.-H. (2019), "Development of Subair Technique for Combustibility Enhancement and NOx Reduction in a Pulverized Coal-Fired Boiler", *ACS Omega*, vol. 4, is. 1, pp. 2291–2301, <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03405>.
8. Chen Z., Wang Q., Zhang X., Zeng L., Zhang X., He T., Liu T., Li Z. (2017), "Industrial-scale investigations of anthracite combustion characteristics and NOx emissions in a retrofitted 300 MWe down-fired utility boiler with swirl burners", *Applied Energy*, vol. 202, pp. 169–177, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.138>.
9. Lohvyniuk M., Novakivskyi Y. (2024), "CFD modeling of thermal processes in the firebox and heat load distribution on the screen surface firebox", *Heliyon*, vol. 10, is. 5, pp. 1–24, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27324>.
10. ANSYS Inc. (2012), *ANSYS FLUENT 14.5. Theory Guide*, Canonsburg, 789 p., PA, USA.
11. Du Y., Wang C., Lv Q., Li D., Liu H., Che D. (2017), "CFD investigation on combustion and NOx emission characteristics in a 600 MW wall-fired boiler under high temperature and strong reducing atmosphere", *Applied Thermal Engineering*, vol. 126, pp. 407–418, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.147>.
12. Abdulin M. Z. (2019), "Development of thermophysical principles of fuel combustion technologies using jet-niche systems", D. Sc. Thesis, Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv.
13. Abdulin M. Z., Horban K. S., Siry O. A. (2019), "Vzajemozv'jazok robochogo procesu pal'nykovogo prystroju na osnovi strumenevo-nishovoi' tehnologii' spaljuvannja gazu z ekologichnymy aspektamy roboty vognetehnichnyh ob'ektiv [Interrelation of Working Process of the Burnet Device Based on Stream-Niche Technology of Gas Burning with Environmental Aspects of Fireengineering Object's Work]", *Teplofizyka ta teploenerhetyka* [Thermalphysics and Thermal Power Engineering], vol. 41, no 3, pp. 63–69, ISSN 2663-7235, <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.9>.
14. *Stream-Niche Technology Company*, Access mode: <http://sn-technology.com/ua/> (accessed 22 December 2024).

Надійшла (received) 06.12.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Баранюк Олександр Володимирович (Baranyuk Oleksandr) – кандидат технічних наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики; науковий співробітник Інститут теплоенергетичних технологій (ITET), Національної академії наук (НАН) України, м. Київ; тел.: (067) 379-80-69; e-mail: olexandr.baranyuk@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-1403>.

Черноусенко Ольга Юрійвна (Chernousenko Olga) – доктор технічних наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського, завідувачка кафедри теплової та альтернативної енергетики; м. Київ; тел.: (067) 504-82-92; e-mail: chernousenko20a@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>.

Рачинський Артур Юрійович (Rachynskiy Artur) – кандидат технічних наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики; м. Київ; тел.: (098) 981-55-75; e-mail: arturrachinskiy@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-1517>.