

ВЕРИФІКАЦІЯ CFD-МОДЕЛІ ТЕПЛООБМІНУ І ГІДРОДИНАМІКИ ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ НЕПРОЕКТНОГО ПАЛИВА У ПАРОВОМУ КОТЛІ ТПП-210А

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

²Інститут теплоенергетичних технологій Національної академії наук України

Викладено результати дослідження CFD-моделі котла ТПП-210А, побудованій згідно з робочими кресленнями ТПП-210А ст. № 3 Трипільської ТЕС. Наукова новизна роботи полягає у визначенні перспективності використання непроектних видів палива, таких як газове вугілля вітчизняного виробництва та тверда біомаса, як сировинної бази котла ТПП-210а, який входить до енергетичного обладнання Трипільської ТЕС України. Моделювання спалювання твердого палива виконувалось за допомогою скінчено-елементних CFD-моделей котельного агрегату в середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent Student з визначенням відповідних характеристик роботи котла. Верифікація виконувалась для випадку спалювання антрацитового штибу. Для аналізу результатів CFD-моделювання використовувались візуалізації полів швидкостей та температур реагуючих потоків в середині паливні. Також виконано аналіз візуалізації взаємодії палива і окислювача, виходу летких сполук та ступеня вигорання вуглецю у центральному перерізі паливно-котельного агрегату. Визначено, що наявність звуження перерізу паливні над пальниками призводить до нерівномірності енерговиділення на стінках котельного агрегату. Показано, що відхилення значень температур в середині CFD-моделі паливні від даних, взятих з доступної літератури, не перевищує 8 %, що дозволяє використовувати розроблену комп'ютерну модель для моделювання спалювання твердого палива вітчизняного виробництва, яке відрізняється від проектного загальними та специфічними властивостями. Верифікована комп'ютерна модель котла ТПП-210А ст. № 3 Трипільської ТЕС дозволить скласти режимну карту роботи котла під час спалювання твердого палива та отримувати дані для подальшого коригування показників нормативної характеристики роботи котла.

Ключові слова: ANSYS-Fluent, моделювання, тверде паливо, горіння, вугілля, паливна котла.

Вступ

Вугільні та комбіновані установки, які використовують викопне паливо, нагально потребують модернізації щодо різкого зменшення викидів парникових газів, зокрема вуглекислого газу (CO₂), або будуть закриті. А відновлюваних джерел енергії, які характеризуються мінливістю, може бути недостатньо для забезпечення країн енергією, через це перехід до «зеленої енергетики» буде складним. Тому наявні енергоблоки енергетичних установок потребують розробки та освоєння нових екологічно чистих вугільних технологій для зменшення їхнього негативного впливу на довкілля [1].

16 лютого 2017 року згідно з Указом Президента України № 37/2017 «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України «Про невідкладні заходи з нейтралізації загроз енергетичній безпеці України та посилення захисту критичної інфраструктури» почалися роботи з переведення енергоблоків ТЕС ПАТ «Центренерго», які використовують вугілля антрацитної групи, на спалювання непроектних видів палива газової групи. Під час спалювання палива, властивості якого відрізняються від проектних, змінюється механізм роботи всього паливно-пальникового комплексу. Згідно з «Правилами технічної експлуатації електричних станцій і мереж», котли ТЕС можуть

бути переведені на спалювання непроєктних видів палива за умови опрацювання та реалізації режимних або конструкторських заходів, що забезпечують безпечну експлуатацію пилосистем, умови стійкого горіння і шлаковидалення, а також повноти вигорання палива [2]. Отже, у разі переходу на вітчизняне газове вугілля потрібно виконати комплекс розрахунків, який можна порівняти з обсягом проектування нового котла, розробити конструкторську документацію, а потім виготовити низку принципово нових вузлів котла, від нових пальників до системи рециркуляції димових газів. З огляду на позитивний досвід чисельного моделювання, автори виконали таку роботу за допомогою сучасних програмних комплексів.

Метою роботи є аналіз можливості спалювання непроєктного твердого палива у паровому котлі ТПП-210А, який встановлений на блоці № 3 Трипільської вугільної теплової електростанції.

Об'єктом дослідження є процеси, які відбуваються під час пилоподібного спалювання непроєктного палива у паровому котлі ТПП-210А.

Предметом дослідження є CFD-модель водогрійного котла на твердому паливі ТПП-210А. Як паливо для верифікації моделі використано антрацитовий штиб. Як непроєктне паливо використано газове вугілля, що видобувається в Україні.

Паровий котел ТПП-210А є прямооточним двохкорпусним котлом, спеціально розробленим для використання разом з турбіною К-300-240. Він працює за схемою з одноразовим проміжним перегрівом пари, що означає, що пара прогривається до певної температури перед введенням у турбіну. Пароводяний тракт котла розділений на чотири самостійних потоки (по два на кожному корпусі), кожен з яких має самостійне регулювання. Ескіз поперечного перерізу котла і геометрія розрахункової області задачі показані на рис. 1 [3].

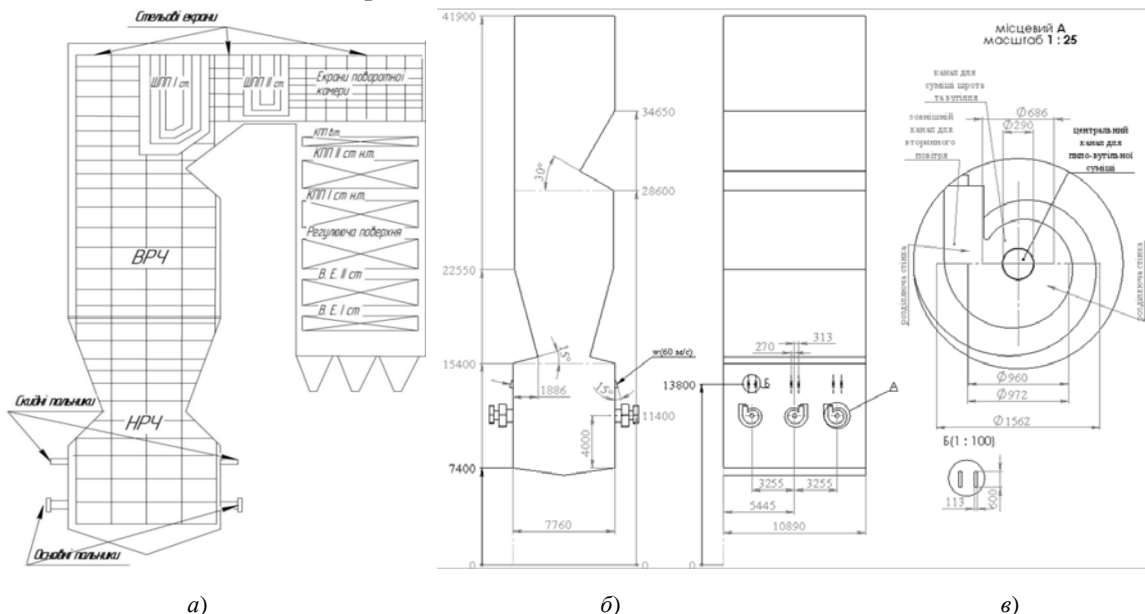


Рис. 1: *а* — схематичне зображення поперечного перерізу діючого котла ТПП-210А; креслення, використані для створення CFD-моделі; *б* — топкової камери; *в* — пальника

Равликовий завихрювач, показаний на рис. 1в, є одним з типів пальників, який використовується для підтримання вихорового руху газу в топці. Цей тип пальника може бути використаний у системах спалювання пиловугільного палива та пилогазових сумішей. Згідно з доступною конструкторською документацією [3] кожний корпус котельного агрегату оснащений шістьма пилогазовими пальниками, які розташовуються в один ярус по 3 шт., на фронтівій і задній стінах паливни.

Паливня кожного корпусу котельного агрегату, згідно з проектом, обладнана пиловугільними вихровими пальниками, розташованими в один ряд по 3 шт. з фронту і тилу паливни.

Методика дослідження

Для розв'язання поставленої задачі використовувались методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) для моделювання течії газової фази та її взаємодії з частинками вугілля у паровому котлі. Для дослідження побудованої моделі використано студентську версію програмного комплексу ANSYS-Fluent, яка з 2015 року є безкоштовною. В роботі використана гібридна сітка рис. 2, яка

поєднує структуровану і неструктуровану скінчено-елементну сітку. Структурована розрахункова сітка, що будувалась з використанням процедури Inflation призначалась для моделювання течії в примежовому шарі, що розвивається на твердотільних стінках моделі котельного агрегату. Використано не менше десяти шарів скінчених елементів.

Неструктурована сітка заповнює весь інший простір моделі. Для регулювання щільності сітки використовувався параметр Relevance Center, який регулював відстань між вузлами скінчено-елементної сітки. Для поєднання різних видів розрахункових сіток використовувався метод MultiZone, який вибрано з переліку доступних в ANSYS-Fluent методів для генерації сітки скінчених елементів. Таким чином, середній розмір елементів сітки становив $1 \cdot 10^{-2}$ м і загальна кількість скінчених елементів в цій задачі не перевищувала 500 тис.

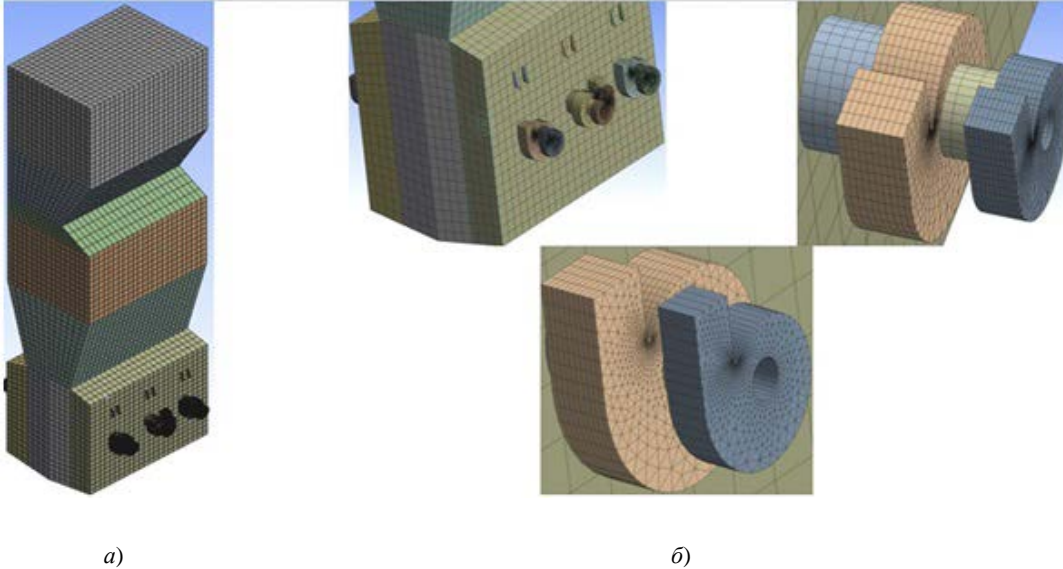


Рис. 2: а — зовнішній вигляд скінченно-елементної сітки в тривимірному просторі;
б — скінченно-елементна сітка поблизу пальників

Комп'ютерна модель спалювання твердого палива в середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent містить рівняння нерозривності, усереднені за Рейнольдсом рівняння збереження енергії, імпульсу і маси (Нав'є–Стокса), а також рівняння переносу i -го компонента суміші. Для замикання усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є–Стокса використовувалась k - ϵ модель турбулентності в модифікації Realizable. k - ϵ модель турбулентності використано тому, що вона розроблена для потоків, які містять струмені (в розробленій моделі ці струмені створюються внаслідок вприскування паливо-повітряної суміші). Це дозволяє моделювати розвиток примежових шарів під дією сильних несприятливих градієнтів тиску, що супроводжується відривом потоку, а також зон з сильно обтічною кривизною (поверхня рагликів, що закручують потік). Транспортні рівняння для k та Realizable моделі турбулентності можна знайти в [4].

Для моделювання течії в примежовому шарі використані нерівноважні пристінні функції. Їхніми сильними сторонами є те, що вони призначені враховувати чутливість до градієнта тиску логарифмічного закону, який постулює розподіл швидкості потоку в примежовому шарі. Тим самим вони краще прогнозують виникнення від'ємного градієнта тиску і появу зворотних течій, ніж стандартні пристінні функції.

Як паливо використано антрацитовий штиб та газове вугілля, які подаються в топку котла з однаковою витратою — 60 т/год. Хімічний склад палива (антрацитовий штиб та газове вугілля вітчизняного виробництва) показано на рис. 3. Хімічний склад палив, використаних у цій роботі, вибраний на основі досліджень науково-дослідної вуглехімічної лабораторії ВП «УКРНДІВУГЛЕЗБАГАЧЕННЯ» ДЧ «НДЧ «ВУГЛЕІНОВАЦІЯ».

Подані на рис. 3 дані використовувались для побудови так званої PDF таблиці (PDF — probability distribution function — функція розподілу вірогідності). Ця таблиця містить інформацію про залежність вмісту компонентів і температур від фракційного складу суміші і використовується ANSYS-Fluent для набуття цих значень в процесі розв'язку. Вона є необхідною для використання моделі горіння без попереднього змішування (non-premixed combustion model). Саме

така модель є найпопулярнішою у дослідженні процесів, що мають місце під час сталювання твердих палив [5]—[7].

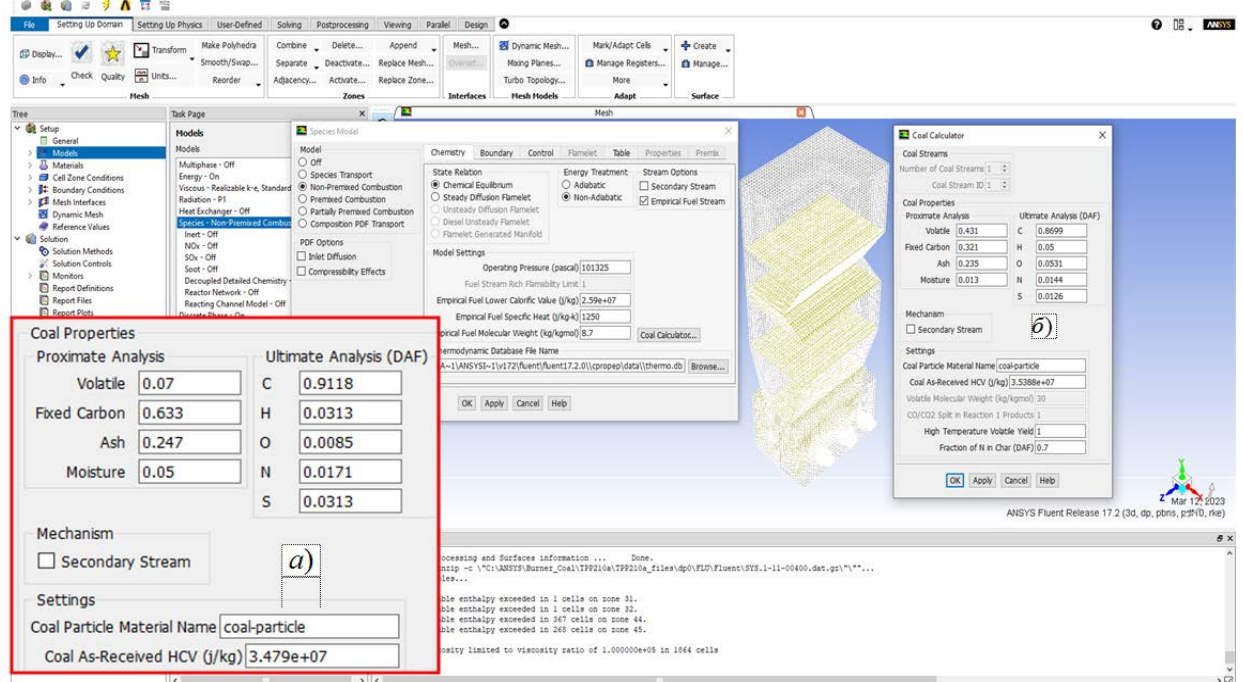


Рис. 3. Хімічний склад: *a* — сухої обеззолненої маси антрацитового штибу; *b* — газового вугілля

Для визначення даних PDF-таблиці використовувались рівняння Equilibrium Chemistry (Рівноважна хімія), які мають значно більшу точність. За допомогою цієї моделі є можливість включити ефекти проміжних реакцій і реакцій дисоціації, створюючи реалістичніші прогнози температури полум'я ніж загальноприйнята модель Eddy-Dissipation.

Використовуючи моделі спалювання без попереднього змішування, всі термодинамічні параметри беруться з хімічної бази gPrPDF. Значення цих властивостей вводяться в FLUENT як матеріал суміші (pdf-mixture material). Для визначення Absorption Coefficient (коефіцієнт поглинання) використана wsggm-domain-based, що дозволяє зробити коефіцієнт поглинання залежним від складу з використанням моделі вагового (пайового) підсумовування сірих газів (weighted-sum-of-gray-gases).

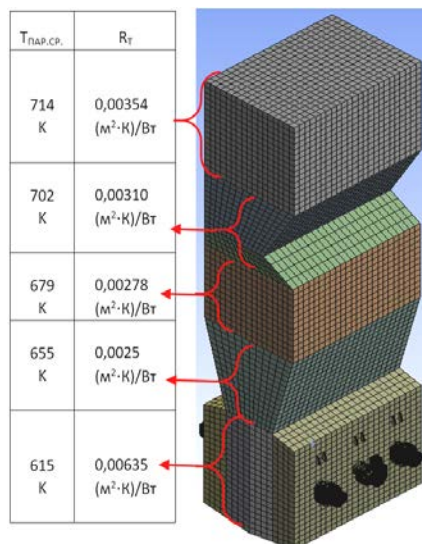


Рис. 4. Параметри теплових граничних умов на стінках котла

Для моделювання взято, що паливо подається в топку котла з однаковою витратою — 60 т/год. На виході з котельного агрегату задавався атмосферний тиск.

Результати дослідження

Перед початком моделювання визначався рівень залежності рішення від щільності скінченно-

елементної сітки. Для цього, у побудованій моделі змінювався крок між вузлами скінченно-елементної сітки, що приводило до зміни як загальної кількості елементів, так і до зміни розрахункових термодинамічних параметрів. Найінформативнішим індикатором рівня залежності рішення від щільності скінченно-елементної сітки є розподіл температур. З цією метою, відображення розподілу температур здійснювали в центральному перерізі паливни, а також для збільшення інформативності аналізу подано розподіл температур вздовж центральної осі паливни (рис. 5). Крок між вузлами сітки змінювали допоки змінювався розподіл температур.

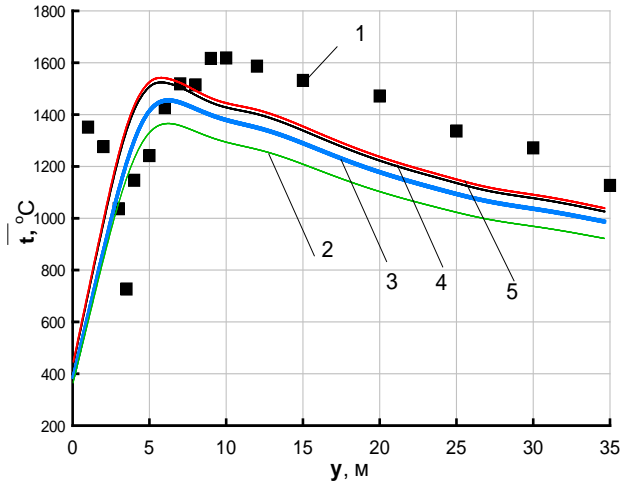


Рис. 5. Верифікація CFD-моделі котла ТПП-210а у випадку спалювання антрацитового штибу: 1 — дані М. М. Нехаміна [8]; 2 — 350 тис. чарунок; 3 — 400 тис.; 4 — 450 тис.; 5 — 500 тис.

З рис. 5 видно, що оптимальним значенням щільності розрахункової сітки є 450 тис. чарунок, оскільки подальше збільшення кількості скінчених елементів не викликає суттєвої зміни розподілу температур в середині паливни. Зазначення максимального відхилення результатів моделювання від експериментальних даних (не більше 6,5 %) свідчить про те, що використана програма ANSYS-Fluent забезпечує досить точні результати моделювання течії нагрітих газів у каналах котла. Отримані розподіли температур та форма факела полум'я також є досить збіжними з експериментальними даними.

Також, як параметр верифікації розрахункових даних, отриманих за допомогою CFD-моделі котла ТПП-210а, використовувалась температура на виході з паливни. Цю величину можна визначити за допомогою аналітичної методики, викладеної в «Нормативному методі розрахунку котельних агрегатів» [9].

Виконаний за аналітичними формулами розрахунок паливни котла ТПП-210а у випадку спалювання вугілля марки Г, з метою верифікації результатів свідчить, що температура перед ширмами на середньому рівні становить 1159 °С. Обчислена засобами комп'ютерної моделі середньоінтегральна температура на виході з паливни відрізняється від нормованої на 7 %. Отже, можна вважати, що побудована комп'ютерна модель є коректною (рис. 6).

Виконаний за аналітичними формулами розрахунок паливни котла ТПП-210а у випадку спалювання вугілля марки Г, з метою верифікації результатів свідчить, що температура перед ширмами на середньому рівні становить 1159 °С. Обчислена засобами комп'ютерної моделі середньоінтегральна температура на виході з паливни відрізняється від нормованої на 7 %. Отже, можна вважати, що побудована комп'ютерна модель є коректною (рис. 6).

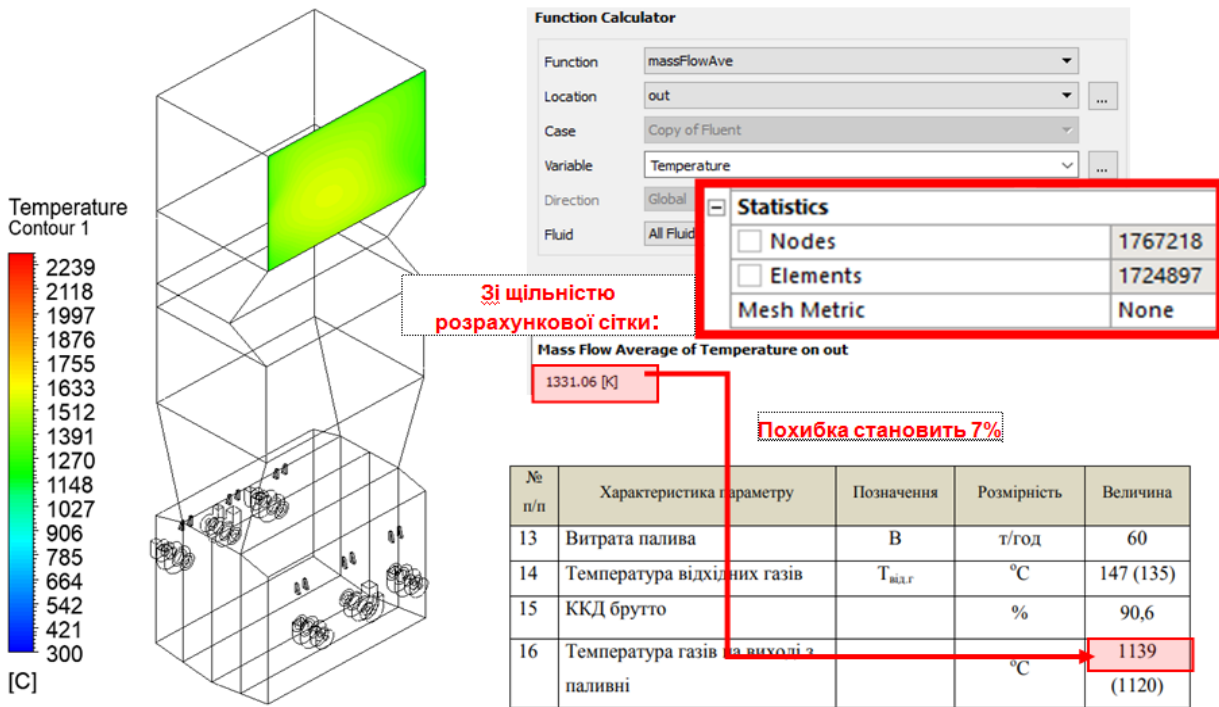


Рис. 6. Верифікація комп'ютерної моделі котла ТПП-210а у випадку спалювання газового вугілля

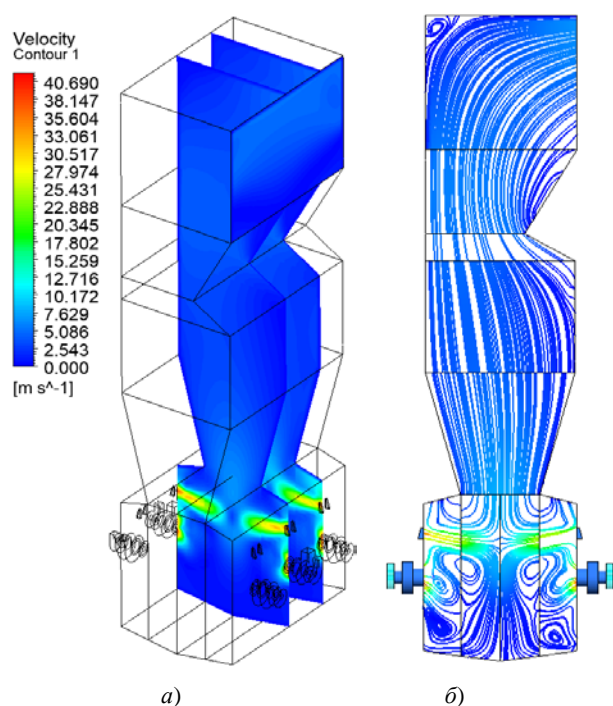


Рис. 7. У випадку спалювання газового вугілля:
 а — розподіл швидкості потоку в поздовжньому перерізі комп'ютерної моделі ТПП-210а; б — траєкторії руху потоків

зміна виду палива суттєво не впливає на формування швидкості потоку в середині паливни.

На рис. 8 показано розподіл параметра Mean Mixture Fraction, що демонструє межі, де вуглець і летючі домішки переходять з твердої фази в газову. Орієнтовно подані результати потрібно інтерпретувати як такі, що моделюють вихід твердих часток в палинику. Процес утворення летючих твердих частинок, що не згоріли, є показовим у разі спалювання твердих палив будь-якого походження і потребує контролю під час експлуатації твердопаливних котлів. Очевидно, що найінтенсивніший процес переходу до газової фази відбувається у палинику (рис. 8а, в).

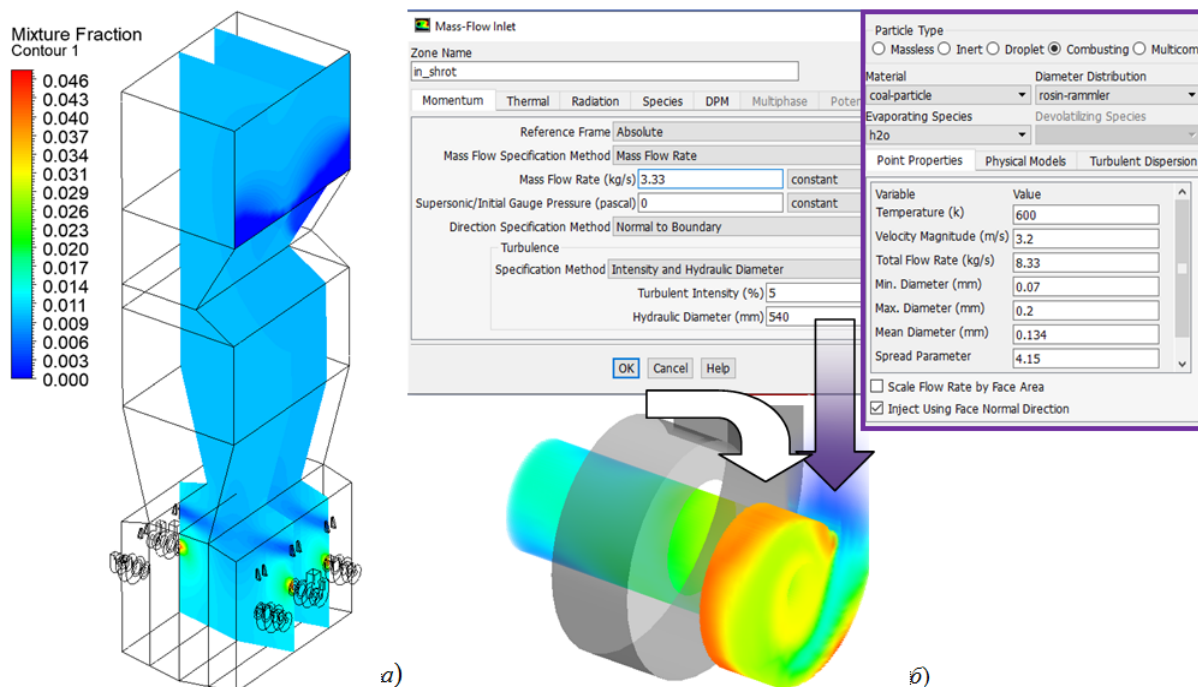


Рис. 8. Для випадку спалювання газового вугілля: а — розподіл параметра Mean Mixture Fraction у центральному перерізі топкової камери комп'ютерної моделі ТПП-210а; б — об'ємна візуалізація цього параметра у палинику

На рис. 9 показано порівняння зміни середньоінтегральних температур димових газів за висотою паливні. Розшарувальним параметром на рис. 9 служить вид палива. Графік на рис. 9 підтверджує очевидний висновок про те, що під час спалювання антрацитового штибу середньоінтегральна температура продуктів згоряння в паливні вища ніж у випадку спалювання газового вугілля, насамперед через нижчу теплотворну здатність останнього.

В роботі також визначено розподіли теплових потоків і температур на стінках паливні, які свідчать про нерівномірність енерговиділення на стінках котельного агрегату. Таку ж нерівномірність отримував в своїх роботах М. М. Нехамін [8], очевидно, що вона пов'язана зі специфічною формою котельного агрегату, у якого над пальниками створено підтиснення в формі «дифузора». Це сприяє зменшенню швидкості потоку, внаслідок чого відбувається збільшення температури димових газів.

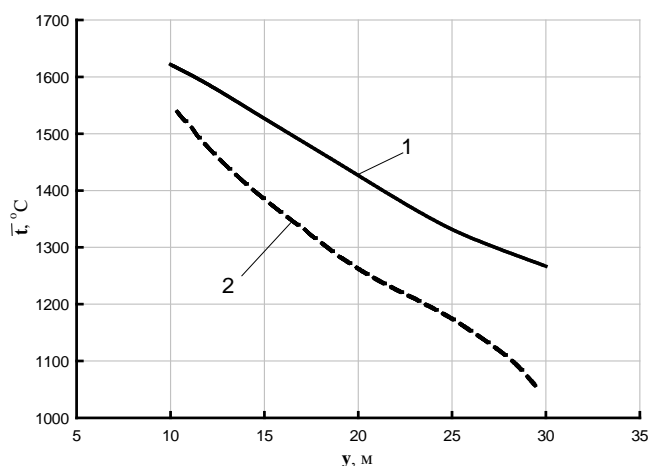


Рис. 9. Розподіл середньоінтегральних температур димових газів вздовж висоти паливні: 1 — антрацитовий штиб; 2 — газове вугілля

Висновки

Аналіз результатів CFD-моделювання процесів спалювання непроєктного палива в паливні котла ТПП-210А з використанням пакета прикладних програм ANSYS-Fluent показав, що:

- CFD-модель успішно верифікована порівнянням середньої температури димових газів на виході з паливні з паспортними даними котла і з експериментальними даними;
- модель дозволяє точно визначити аеродинамічну структуру потоку в пальниках і паливні котла із заданими теплофізичними властивостями палива;
- середньоінтегральна температура продуктів згоряння у паливні під час спалювання антрацитового штибу є вищою ніж у непроєктного палива — газового вугілля, насамперед внаслідок його нижчої теплотворної здатності;
- нерівномірний розподіл густини теплового потоку і температур на поверхні стінок, що збігається з літературними даними, підтверджує правильність використаних граничних умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Н. І. Дунаєвська, та ін., «Технологія спільного спалювання антрациту та твердого біопалива в пилувугільних котлах ТЕС і ТЕЦ», *Nauka innov.*, т. 16, № 5, с. 86-96, 2020. <https://doi.org/10.15407/scin16.05.086>.
- [2] М. В. Чернявський, Є. С. Мірошниченко, і О. Ю. Провалов, «Переведення антрацитових котлоагрегатів ТЕЦ на спалювання газового вугілля в умовах воєнного стану», *Енерготехнології та ресурсозбереження*, № 3, с. 3-20, 2023. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2023.01>.
- [3] ВД «Академперіодика» НАН України, кер. М. В. Чернявський, *Нові можливості спалювання суміші вугілля ма-рок Г та ДГ замість вугілля марки АШ в котлі ТПП-210А*, звіт про НДР (заключний). Київ, 2019, 29 с.
- [4] *ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide*, ANSYS Inc. ANSYS Help, 2012. [Electronic resource]. Available: <https://ansyshelp.ansys.com>.
- [5] Noor Akma Watie Mohd Noor, Hasril Hasini, Muhamad Shazarizul Haziq Mohd Samsuri, and Meor Mohd Faisal Meor Zulkifli, "CFD Analysis on the Effects of Different Coal on Combustion Characteristics in Coal-fired Boiler," *CFD Letters*, no. 12 (10), pp. 128-138, 2020. <https://doi.org/10.37934/cfdl.12.10.128138>.
- [6] Xing Liu, Jiaye Zhang, Houzhang Tan, Qingfeng Mo, Xuebin Wang, and Yibin Wan, "Numerical and experimental study on co-firing of low volatile coal in a 330 MW tangential-ly fired boiler," *Journal of the Energy Institute*, no. 96, pp. 242-250, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.03.015>.
- [7] Daining Wei, Dong An, Tao Wang, Huicong Zhang, Yonghong Guo, and Baomin Sun, "Influence of fuel distribution on co-combustion of sludge and coal in a 660 MW tangentially fired boiler," *Applied Thermal Engineering*, 227, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120344>.
- [8] М. М. Нехамин, «Моделирование программой ANSYS fluent процессов в топке котла ТПП-210а», *Енерготехнології та ресурсозбереження*, № 3, с. 35-40, 2020. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2020.03>.
- [9] В. О. Туз, В. І. Мариненко, і О. О. Васечко, *Розрахунок паливних котельних установок*, навч. посіб. для студ. спеціальностей 142 «Енергетичне машинобудування»; 144 «Теплоенергетика». Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020, 36 с.

Черноусенко Ольга Юрійвна — док. техн. наук, професор, завідувачка кафедри теплової та альтернативної енергетики, e-mail: chernousenko20a@gmail.com ;

Рачинський Артур Юрійович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики, e-mail: arturrachinskiy@gmail.com ;

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

Баранюк Олександр Володимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри атомної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; Інститут теплоенергетичних технологій Національної академії наук України, e-mail: AleksandrW@i.ua ;

A. Yu. Chernousenko¹
A. Yu. Rachynskiy¹
O. V. Baranyuk^{1,2}

Verification of the CFD Model of Heat Exchange and Hydrodynamics for Burning Non-Design Fuel in the TPP-210A Steam Boiler

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

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

The results of the study of CFD model of TPP-210A type boiler, built according to the working drawings of TPP-210a st.n. 3 of Trypillya thermal power plant are presented in the paper. The scientific novelty of the work consists in determining the perspective of using non-design types of fuel, such as gas coal of domestic production and solid biomass, as the raw material base of the TPP-210a boiler, which is part of the energy equipment of the Trypillya TPP of Ukraine. Modeling of solid fuel combustion was carried out using finite-element CFD models of the boiler unit in the ANSYS-Fluent Student software complex with the determination of the relevant characteristics of the boiler. The verification was performed for the case of burning anthracite wood. In the presented work, visualization of the fields of velocities and temperatures of reacting flows in the middle of the furnace was used to analyze the results of CFD modeling. The analysis of the visualization of the interaction between fuel and oxidizer, the release of volatile compounds and the degree of carbon burning in the central section of the fuel boiler unit was also performed. It was determined that the presence of a narrowing of the section of the fuel above the burners leads to uneven energy release on the walls of the boiler unit. It is shown that the deviation of the temperature values in the middle of the CFD model of the fuel from the data taken from the available literature does not exceed 8 %, which allows using a developed computer model for simulating the combustion of domestically produced solid fuel, which differs from the design model in terms of general and specific properties. The verified computer model of the TPP-210a boiler, art. no. 3 of the Trypillya TPP will make it possible to draw up a mode map of boiler operation during solid fuel burning and obtain data for further adjustment of indicators of normative characteristics of boiler operation.

Keywords: ANSYS-Fluent, modeling, solid fuel, combustion, coal, boiler furnace.

Chernousenko Olga Yu. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Thermal and Alternative Energy, e-mail: chernousenko20a@gmail.com ;

Rachinskiy Artur Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Thermal and Alternative Energy, e-mail: arturrachinskiy@gmail.com ;

Baranyuk Oлександр V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Nuclear Power Engineering of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”; Institute of Thermal Energy Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: AleksandrW@i.ua