

О. Ю. Черноусенко<sup>1</sup>  
А. Ю. Рачинський<sup>1</sup>  
О. В. Баранюк<sup>1, 2</sup>

## ВАЛІДАЦІЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛОВОГО СТАНУ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ

<sup>1</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

<sup>2</sup>Інститут теплоенергетичних технологій Національної академії наук України

*Робота виконувалась засобами CFD-моделювання з метою валідації методик чисельного моделювання теплопередачі від струменів розжареного газу воді, що рухалась в товстостінній трубі. Такі задачі є актуальними, оскільки для забезпечення безперебійної та ефективної роботи котельних агрегатів важливо коректно визначати локальні теплові потоки саме від факелу полум'я на екранні труби. Наукова новизна роботи полягає в визначенні коректної методики побудови комп'ютерних моделей спалювання і транспортування газів, які в майбутньому значно розширять діапазон факторів, які можна залучати до прогнозування поведінки енергетичного обладнання.*

*Моделювання спалювання метано-повітряної суміші виконувалось в середовищі програмного комплексу ANSYS Student за допомогою моделі Species Transport. Скінченно-елементна сітка — гідридна. Визначено, що результати моделювання теплопередачі від струменів розжареного газу до рухомої води через стінку, що їх розділяє, товстостінної труби в SolidWorks Simulation та ANSYS-Fluent і ANSYS-CFX повністю збігаються. У разі заміни моделі течії на модель спалювання показано, що запалювання суміші відбудеться в розрахунковому об'ємі, а не відразу після зрізу стабілізатора полум'я. Також визначено відмінності в температурних полях розрахункового об'єму, що розраховувались засобами Fluent і CFX. Це пов'язано з тим, що в ході розробки моделі не вдалося з об'єктивних причин ідентично налаштувати модель Species Transport, яка використовується в Fluent, та RIF-бібліотеку кінетики горіння CFX. До того ж, визначено, що у випадку моделювання транспорту і спалювання газів, температурне поле стінки труби не має різко виражених перегрітих зон як у разі омивання струменем розжареного газу. Це опосередковано свідчить про те, що термічні навантаження на стінку труби будуть менші і ризик перепалювання труби зменшується.*

**Ключові слова:** моделювання, спалювання, метан, паливня котла, товстостінна труба.

### Вступ

На сьогодні існують серйозні проблеми, пов'язані з експлуатацією енергетичних та промислових установок, що вже відпрацювали свій парковий ресурс. Наявність значних відмінностей між реальним та розрахунковим розподілом теплових потоків може призвести до серйозних термічних нерівноваг і може викликати напруження та аварії. Для розв'язання цих проблем і підвищення надійності та продуктивності енергетичних установок здійснюється розробка та впровадження систем моніторингу та діагностики для постійного відстеження стану елементів обладнання, визначення теплових перекосів і прогнозування можливих відмов, а також проведення робіт з ремонту та модернізації теплового обладнання з урахуванням виявлених проблем та тенденцій зносу.

Для точнішого розрахунку теплових потоків та прогнозування термічних навантажень на обладнанні необхідне використання комп'ютерних моделей та симуляцій. На рівні з впровадженням новітніх технологій та матеріалів, це забезпечить ефективнішу та довговічну експлуатацію обладнання енергетичних установок.

Враховуючи термін служби та ресурс обладнання ці заходи, можуть сприяти розробці нових ефективних стратегій обслуговування, а також резервування для надійності та забезпечення безпе-

ребійної роботи, що в свою чергу дасть змогу підвищити ефективність та безпеку роботи енергетичних установок і збільшить їхній залишковий ресурс.

Прогнозування залишкового ресурсу з метою подовження терміну експлуатації теплоенергетичного устаткування на основі розрахункового дослідження впливу рівня та локальної нерівномірності температур висвітлено в роботі [1], автори якої визначали коефіцієнти тепловіддачі  $\alpha$  для різних зон циліндричної труби згідно з критеріальними рівняннями у разі конвективного теплообміну та і у розрахункових дослідженнях газодинаміки течії робочих тіл (гаряча паливна суміш та вода) в програмному комплексі SolidWorks Simulation. Тобто, автори провели моделювання теплопередачі від струменів розжареного газу воді, що рухалась в товстостінній трубі. Проте, принципово важливим для забезпечення безперебійної та ефективної роботи енергетичного обладнання є коректне визначення локальних теплових потоків саме від факела. Власне, більше 80 % аварійних зупинок для котлів ДКВР-20-13 пов'язані з перегрівом екранних труб. Тому результати моделювання [1] слід перевірити засобами сучасних програмних комплексів ANSYS-Fluent та ANSYS-CFX, оскільки згадані програмні комплекси призначені для моделювання хімічних перетворень, які виникають під час спалювання газоподібного палива.

*Метою роботи* є валідація методик чисельного моделювання теплопередачі від струменів розжареного газу воді, що рухалась в товстостінній трубі та верифікація результатів моделювання в різних програмних комплексах. А також моделювання течії та локальної нерівномірності температур в вищеписаній моделі в умовах спалювання метану.

### Методика дослідження

Автори цієї роботи повністю відтворили модель, описану в [1]. Ця модель містила пальниковий пристрій, створений трьома стабілізаторами шириною  $B_{ст} = 15$  мм, що розміщувались в каналі шириною 150 мм з кроком  $t_{ст} = 50$  мм, та циліндричну трубу розмірами  $32 \times 6$  мм і довжиною 150 мм. Потік газів, які утворювались після пальникового пристрою, омивав циліндричну трубу. Відстань від пальникового пристрою до циліндричної труби становила 110 мм. Вважали, що температура газів на зрізі стабілізаторів дорівнювала  $T_r = 1273$  К. Температура повітря дорівнювала  $T_n = 300$  К. Швидкість газів —  $w_r = 10$  м/с. Як середовище, що сприймає тепло в трубопроводі, брали живильну воду з температурою  $T_b = 293$  К і швидкістю  $w_b = 0,5$  м/с. Напрями току води та гарячих газів перпендикулярні.

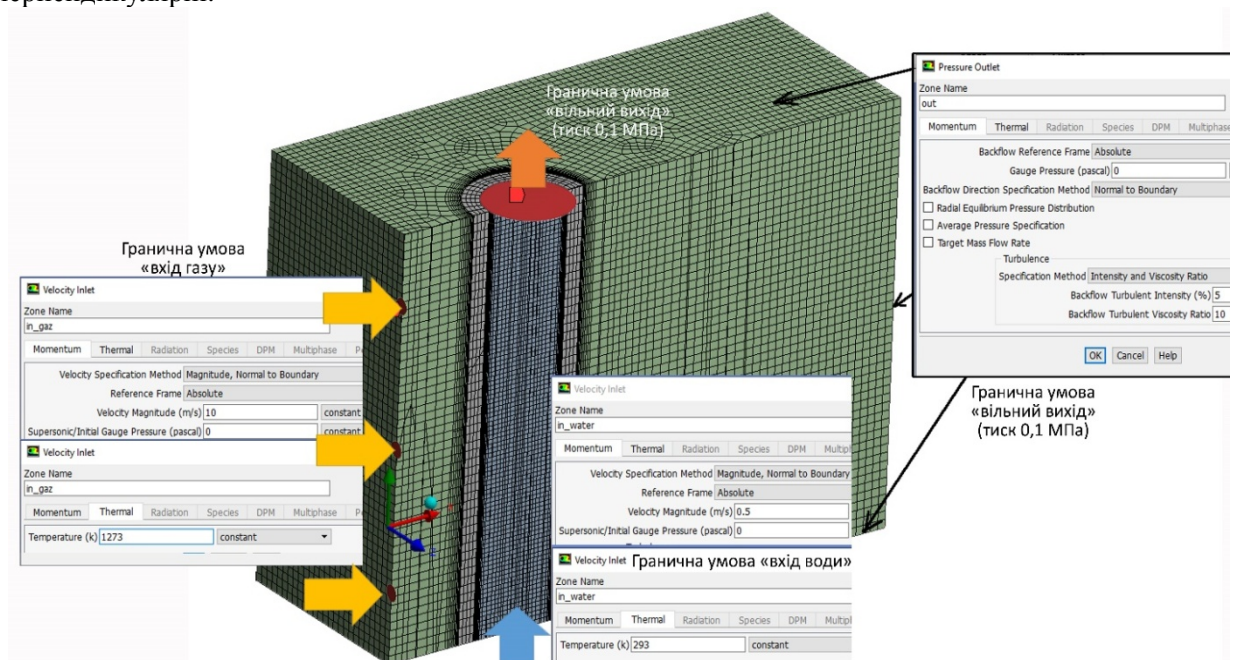


Рис. 1. Зовнішній вигляд скінченно-елементної сітки в тривимірному просторі і види граничних умов, що застосовуються в задачі

Для моделювання використано студентську версію програмного комплексу ANSYS-Fluent, яка з 2015 року є абсолютно безкоштовною. В цій роботі використана гібридна сітка (рис. 1), яка поєднує структуровану і неструктуровану скінченно-елементну сітку. Структурована розрахункова

сітка, що будувалась з використанням процедури Inflation призначалась для моделювання течії в приграничному шарі, що розвивається на твердотільних стінках товстостінної труби. Використано не менше 20-ти 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, вибраний 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.

Побудована CFD-модель містить рівняння нерозривності, усереднені за Рейнольдсом рівняння збереження енергії, імпульсу та маси (Нав'є–Стокса). Режим течії турбулентний, тому для замикання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є–Стокса використовувалась  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентності в модифікації Realizable. Використання  $k$ - $\epsilon$  моделі турбулентності вибрано тому, що вона розроблена для потоків, які містять струмені (потік розжарених газів, що спрямований від стабілізаторів полум'я на товстостінну трубу). Згадані рівняння для  $k$  та Realizable моделі турбулентності можна знайти в [2].

Наперед задана точність, що необхідна як умова завершення ітераційного розрахунку задавалась як  $10^{-3}$ . При цьому збіжність рішення досягнуто за 415 ітерацій.

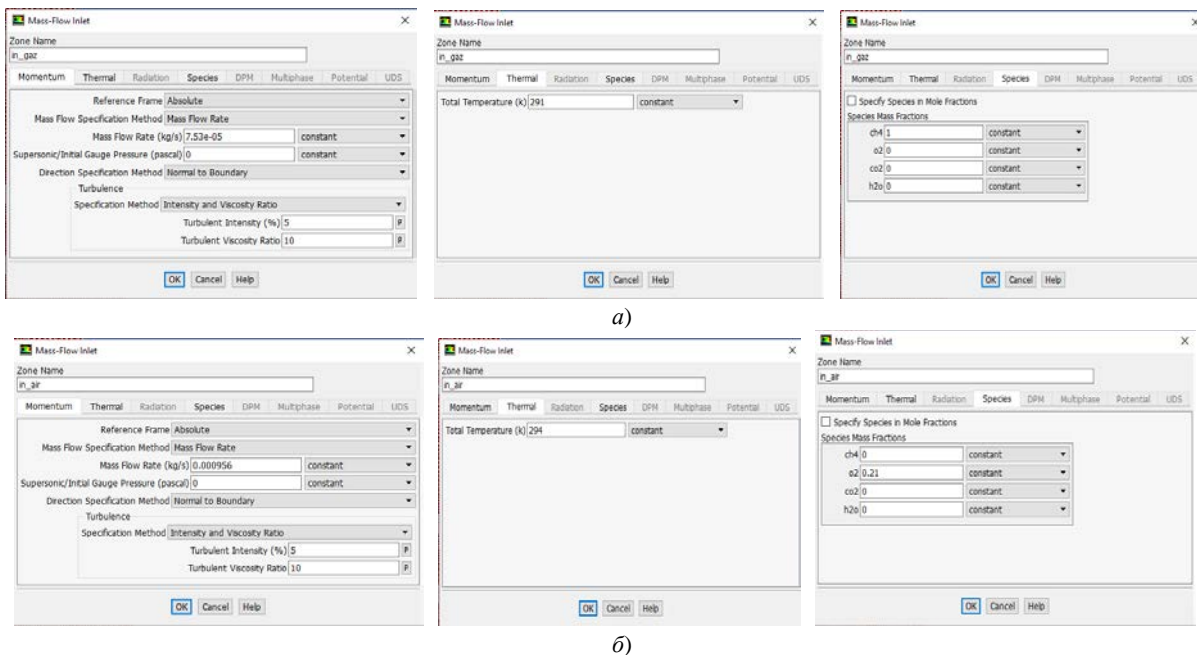


Рис. 2: Граничні умови у разі омивання циліндричної труби: *a* — метаном; *b* — повітрям

Друга частина роботи, щодо моделювання спалювання метану в повітряному середовищі, теж базується на чисельному розв'язанні усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є–Стокса, замкнених за допомогою моделі турбулентності на основі концепції вихорової в'язкості типу  $k$ - $\epsilon$  Realizable [3]. На думку авторів, це найкраща модель, з RANS-моделей, яка може розрахувати вплив між потоками. Використання в роботі цієї моделі насамперед продиктовано тим, що ця модель запропонувала обґрунтованіше формулювання рівняння переносу швидкості дисипації, оскільки вона отримана з рівняння переносу середньої завихреності. А також, із застосуванням цієї моделі неможливо отримати негативні значення для  $u_j^2$  значних деформаціях поля середньої швидкості.

Автори [4] рекомендують використання цієї моделі для течій з великою кривизною ліній току і закручуванням течії. Закручування потоку в цій задачі може відбуватись внаслідок гідродинамічної взаємодії між «факелом» полум'я з пальника і навколишнім повітряним потоком.

Рівняння математичної моделі турбулентної течії та рівняння стандартної моделі турбулентності подані в [5] і в інших підручниках з чисельних методів в гідродинаміці.

Крім цього, використано Enhance Wall Treatment для того, щоб врахувати пристінні функції і відповідно опції Viscous Heating, Correction і Full Buoyancy Effect (так звані ефекти плавучості).

Для моделювання спалювання використано модель Species Transport. Згоряння моделювалось з використанням загального однокрокового механізму реакції (one-step reaction mechanism), яка визначалась 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). В роботі як паливо використано суміш метан–повітря, теплофізичні властивості цих компонентів моделювались за допомогою Kinetic Theory, тобто відповідно до молекулярно-кінетичної теорії.

Граничні умови для суміші метан–повітря (рис. 2) задавались за допомогою Mass Flow Inlet (масові витрати). Для цього, визначалась масова витрата розжарених газів, як в задачі теплопередачі і виконано розрахунок витрати метану і повітря з урахуванням значення коефіцієнта надлишку повітря 1,2. В роботі [1] задавались умови «вільного виходу», але згідно з [2], [6], у всіх задачах змішування компонентів умова на виході повинна задаватись лише за допомогою outflow.

У методах розв'язання необхідно однозначним чином визначити так зване поєднання тиску зі швидкістю. Річ у тому, що SIMPLE та SIMPLE Consistent застосовується в стаціонарних умовах з одним потоком. Нестационарна однопотокова течія (в формулювання ANSYS це алгоритм PISO) з великим тимчасовим кроком. А у всіх інших задачах де є кілька потоків і відбувається їхнє перемішування, застосовується лише схема Coupled — у задачах з кількома потоками та перемішуванням. При цьому, якщо течія має досить велику кількість завихрень, то необхідно використовувати умову Pseudo Transient для забезпечення стійкості і збіжності розв'язання задачі з багатокомпонентною сумішшю газів.

### Результати дослідження

В роботі [1] засобами SolidWorks Simulation визначено, що розподіл швидкостей розжарених газів в газовому просторі котлоагрегату (рис. 3) свідчить про зменшення швидкості з 10 м/с в зоні виходу газу зі стабілізаторів пальникового пристрою до 1 м/с в зоні за трубою та між стабілізаторами. Таке явище характерне для омивання одиночної труби потоком. Зниження швидкості пов'язане зі створенням циркуляційної зони ближнього сліду за трубою. Аналогічні розподіли і значення швидкостей отримано і за допомогою ANSYS-Fluent.

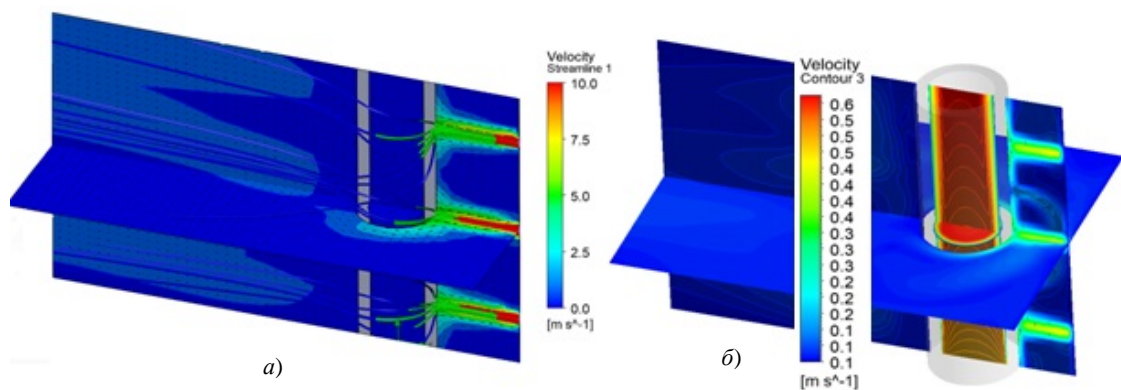


Рис. 3: *a* — розподіл швидкості та лінії току у разі омивання циліндричної труби продуктами згоряння згідно з розрахунками [1]; *б* — аналогічні розрахунки засобами ANSYS-Fluent; відстань від стабілізатора полум'я в обох випадках 50 мм

На рис. 3 подано дві шкали: від 0 до 10 м/с — це шкала для продуктів згоряння, які омивають товстостінну трубу і шкала від 0 до 0,5 м/с — шкала для потоку води в трубі. Різні шкали представлені для того, щоб якісніше показати динаміку розвитку прилеглих шарів всередині циліндричної труби. З рис. 3 випливає, що профіль швидкості потоку поступово деформується від прямокутного до виду «сплющеної параболи», характерного для турбулентного режиму течії. Прилегливі шари рівномірно розвиваються на стінках труби і не зникають, оскільки задана довжина товстостінної труби  $\varnothing 32 \times 6$  мм відповідає початковій ділянці.

Як свідчать дані рис. 3 і 4 розподіли швидкостей і температур достатньо добре узгоджуються між собою. Відмінність між числовими значеннями є незначною. Якісний характер показаних на рис. 3 і 4 розподілів теж майже збігається.

Розподіл локальних коефіцієнтів тепловіддачі на зовнішній поверхні труби є класичним. Максимум тепловіддачі спостерігається в лобовій точці труби і є наслідком того, що прилеглий шар в цій точці тільки починає розвиватись.

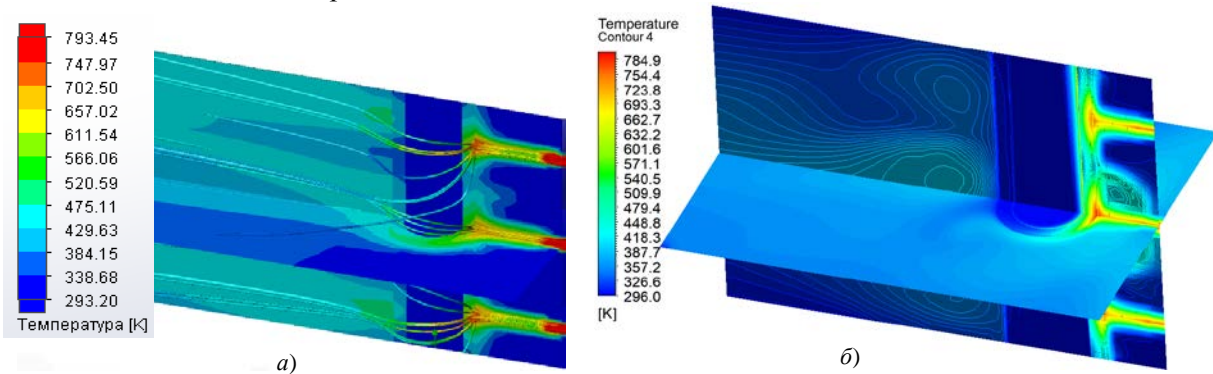


Рис. 4: *a* — розподіл температур потоку при омиванні циліндричної труби продуктами згоряння згідно з розрахунками [1]; *б* — аналогічні розрахунки засобами ANSYS-Fluent; відстань від стабілізатора полум'я в обох випадках 50 мм

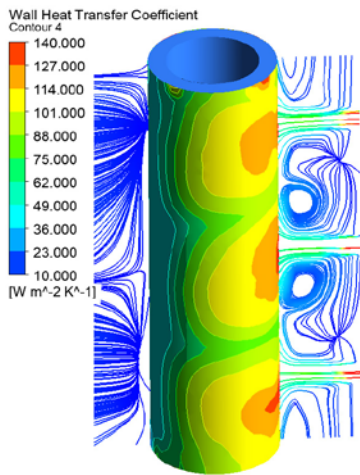


Рис. 5. Розподіл локальних коефіцієнтів тепловіддачі на зовнішній поверхні товстостінної труби

Згідно з [7], коефіцієнти тепловіддачі в кормовій зоні труби повинні бути нижчими ніж в лобовій, це також видно з рис. 5. Значення коефіцієнтів тепловіддачі знаходиться в межах (80...100) Вт/(м<sup>2</sup> К), що достатньо добре узгоджується з даними роботи [1]. Все це свідчить, що валідація методик розрахунку виконана успішно.

Аналіз результатів моделювання у разі спалювання метану в задачі тієї ж постановки як і задача теплопередачі [1] свідчить, що запалювання суміші відбудеться в розрахунковому об'ємі, а не відразу після зрізу стабілізатора полум'я. Для цього потрібно моделювати геометрію пальника, який призначений для формування паливо-повітряної суміші в пропорціях, що необхідні для спалаху.

Показовим є той факт, що на одній платформі ANSYS розрахункові модулі Fluent і CFX не дають однакових результатів у розрахунках спалювання. Як свідчить рис. 6а, потік навколо труби у випадку розрахунку засобами ANSYS-Fluent прогривається до 600 °С, при чому температурне поле потоку є рівномірнішим ніж у випадку розрахунку засобами ANSYS-CFX. Граничні умови, скінченно-елементна сітка, теплофізичні параметри реагентів були однаковими.

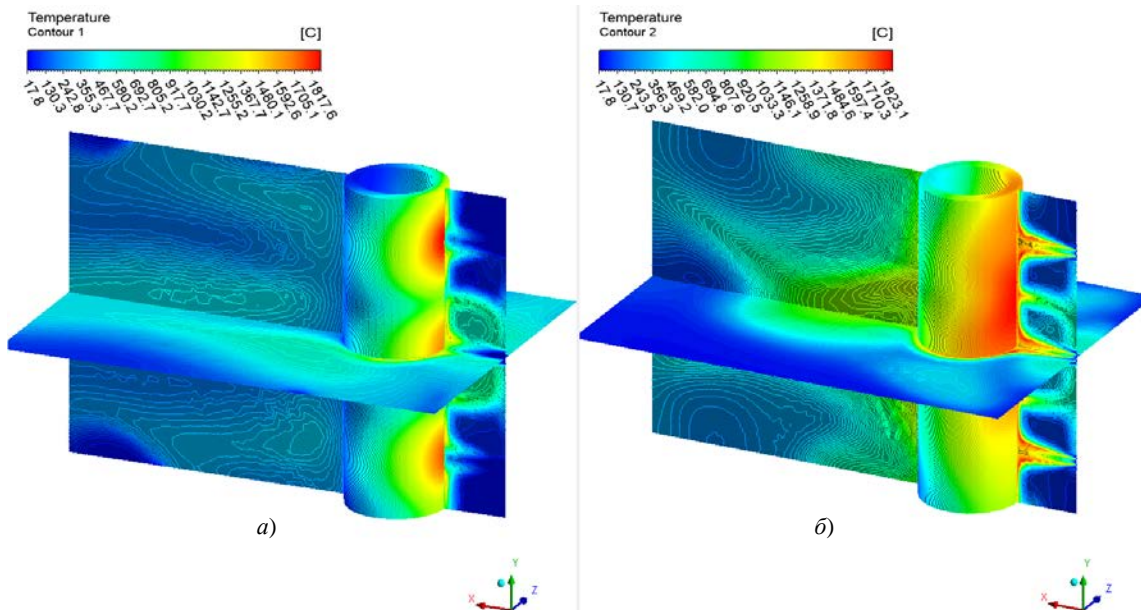


Рис. 6. Розподіл температур потоку при взаємодії факела з поверхнею циліндричної труби, що визначався: *a* — засобами ANSYS-Fluent; *б* — ANSYS-CFX

Відмінність в температурних полях, зумовлена відмінністю між характером течії, що розраховували засобами ANSYS-Fluent та ANSYS-CFX. З рис. 7а випливає, що поблизу стінки труби, на яку набігає струмінь розжареного газу лінії току скручуються у вихоровий джгут, який по периметру огинає трубу. В міделевому перерізі відбувається руйнування примежового шару який розвивався на поверхні труби зверху та знизу струменів і внаслідок їхньої гідродинамічної взаємодії відбувається інтенсивне перемішування потоку за трубою. Внаслідок цього температура потоку і вища і температурне поле рівномірніше ніж у випадку розрахунку засобами ANSYS-CFX.

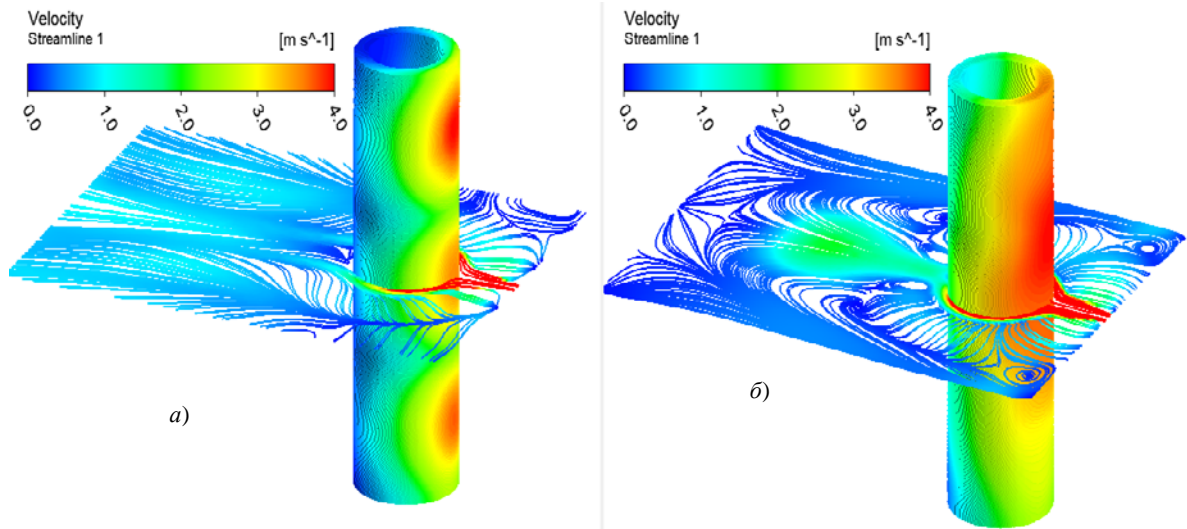


Рис. 7. Траекторії руху частинок потоку та температура поверхні товстостінної труби, що визначався засобами: *a* — ANSYS-Fluent; *б* — ANSYS-CFX

Слід також відмітити, що поле температур на стінці труби рівномірніше ніж для випадку задачі теплопередачі [1]. Плями від струменів розжареного газу мають більшу площу. При чому, розрахунок засобами CFX (рис. 7б) свідчить, що вище середнього стабілізатора полум'я температурне поле стінки стає рівномірним. Отже, термічні навантаження на стінку труби будуть менші і ризик перепалювання труби зменшується.

На рис. 8 показано результат візуалізації векторів осередненої швидкості потоку і температурного поля факелів полум'я в залежності від програмного комплексу. Як свідчить рис. 8б, спалахування суміші метан–повітря у випадку використання ANSYS-CFX як програмного комплексу відбувається раніше ніж для випадку використання ANSYS-Fluent. На нашу думку, це пов'язано з тим, що в ході розробки моделі не вдалося ідентично налаштувати модель Species Transport, яка використовується в Fluent, та RIF-бібліотеку кінетики горіння CFX. Оскільки остання орієнтована більше на інженерів ніж на науковців.

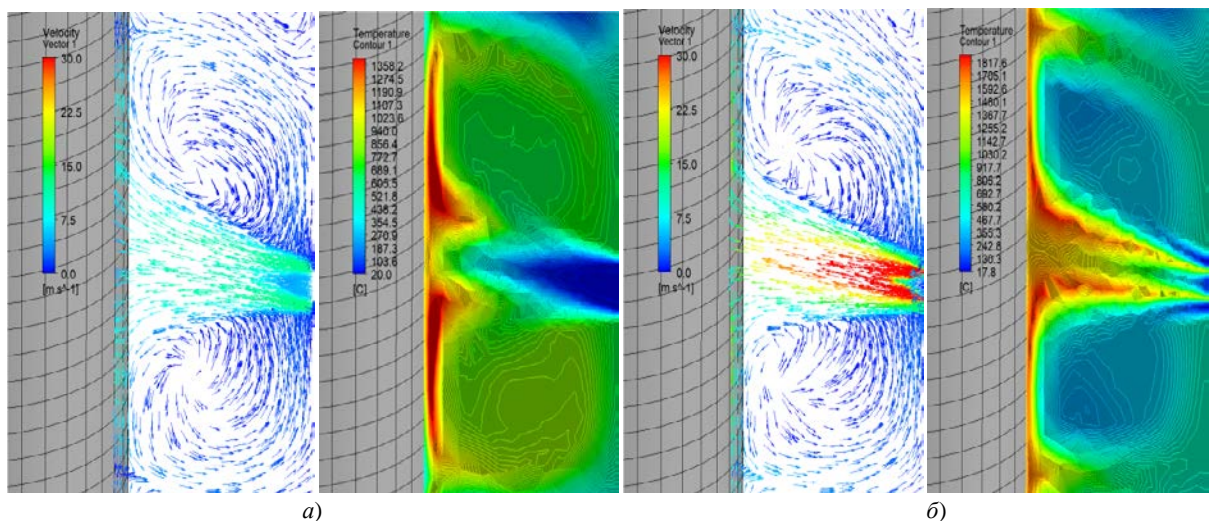


Рис. 8. Візуалізація векторів осередненої швидкості потоку і температурного поля факелів полум'я, що визначався засобами: *a* — ANSYS-Fluent; *б* — ANSYS-CFX

## Висновки

Дослідження щодо валідації методик розрахунку теплообміну між розжареними газами і екранними трубами котельного агрегату ДКВР-20-13 свідчить, що таку задачу слід вирішувати тільки з урахуванням реакцій горіння. За результатами дослідження можна зробити такі висновки:

– успішно виконана валідація методик чисельного моделювання теплопередачі від струменів розжареного газу воді, що рухалась в товстостінній трубі шляхом порівняння розрахунків засобами SolidWorks Simulation і ANSYS-Fluent;

– визначено, що у випадку моделювання транспорту і спалювання газів, температурне поле стінки не має різко виражених перегрітих зон від струменів розжареного газу як у роботі [1]. Це опосередковано свідчить про те, що термічні навантаження на стінку труби будуть менші і ризик перепалювання труби зменшується;

– відмінність між результатами моделювання засобами Fluent і CFX пов'язана з тим, що в ході розробки моделі авторам не вдалося ідентично налаштувати модель Species Transport, яка використовується в Fluent, та RIF-бібліотеку кінетики горіння CFX. Зазначимо, що розробники ANSYS v. 2019 виключили RIF-бібліотеку зі складу комплексу, аргументуючи тим, що результати моделювання засобами Fluent є достовірнішими;

– під час створення моделей котельних агрегатів бажано моделювати як паливню так і пальник, який призначений для формування паливо-повітряної суміші у пропорціях, необхідних для спалаху.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] О. Ю. Черноусенко, Л. С. Бутовський, і Д. В. Риндюк, «Розрахункове дослідження теплового, напружено-деформованого стану та індивідуального ресурсу трубопроводу котлоагрегату,» *Вісник НТУ «ХПИ»*, № 8 (1230), с. 49-56, 2017. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2017.08.07> .

[2] ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide, ANSYS Inc. ANSYS Help, 2012. [Electronic resource]. Available: <https://ansyshelp.ansys.com> .

[3] ANSYS, “Fundamental FEA Concepts and Applications,” A Guidebook for use and Applicability of Workbench Simulation Tools from ANSYS, Inc. [Electronic resource]. Available: [https://www.cae.tntech.edu/~chriswilson/FEA/ANSYS/ANSYSguide\\_fea-concepts.pdf](https://www.cae.tntech.edu/~chriswilson/FEA/ANSYS/ANSYSguide_fea-concepts.pdf) . Accessed: 14.07.2022 p.

[4] Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS. [Electronic resource]. Available: <https://www.pinterest.com/pin/ebook-pdf-finite-element-analysis-theory-and-application-with-ansys-4th-edition-dollartree4books-in-2022--1105141196033257914/> . Accessed: 14.07.2022 p.

[5] Salman Mohammed Alzahrani, *Computational fluid dynamics modeling and comparison of advanced techniques for heat transfer augmentation for nuclear applications*. [Electronic resource]. Available: [https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4130&context=doctoral\\_dissertations](https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4130&context=doctoral_dissertations) . Accessed: 14.07.2022 p.

[6] М. В. Воробйов, О. В. Баранюк, і Р. С. Рябцун, «Визначення енергетичних та екологічних характеристик роботи котла ДКВР-10-13 при додаванні водню до природного газу методом математичного моделювання,» *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І Вернадського. Серія: Технічні науки*. т. 33 (72), № 5, с. 183-192, 2022. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/27> .

[7] С. П. Дибан, і Е. Я. Епик, *Тепломасообмін і гідродинаміка турбулізованих потоків*. Київ: Наукова думка, 1985, 296 с.

Рекомендована редколегією журналу «Вісник Вінницького політехнічного інституту»

Стаття надійшла до редакції 24.01.2024

**Черноусенко Ольга Юрійвна** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри теплової та альтернативної енергетики, e-mail: [chernousenko20a@gmail.com](mailto:chernousenko20a@gmail.com) ;

**Рачинський Артур Юрійович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики, e-mail: [arturrachinskiy@gmail.com](mailto: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, e-mail: [AleksandrW@i.ua](mailto:AleksandrW@i.ua) .

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Інститут тепло-енергетичних технологій (ІТЕТ) Національної академії наук (НАН) України, Київ

O. Yu. Chernousenko<sup>1</sup>  
A. Yu. Rachynskyi<sup>1</sup>  
O. V. Baranyuk<sup>1,2</sup>

## Validation of Numerical Modeling of Gas Dynamics and Thermal State of the Boiler Unit

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”;

<sup>2</sup>Thermal Energy Technologies Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine

*The presented work was carried out by means of CFD modeling in order to validate the methods of numerical modeling of heat transfer from jets of red-hot gas to water moving in a thick-walled pipe. Such tasks are relevant, because to ensure smooth and efficient operation of boiler units, it is important to correctly determine the local heat flows from the flame torch to the screen pipes. The scientific novelty of the work consists in determining the correct methodology for building computer models of combustion and gas transport, which in the future will significantly expand the range of factors that can be involved in predicting the behavior of energy equipment.*

*The simulation of combustion of the methane-air mixture was performed in the environment of the ANSYS Student software complex using the Species Transport model. The finite-element mesh is hybridic. It was determined that the results of simulation of heat transfer from jets of incandescent gas to moving water through the wall of a thick-walled pipe separating them in SolidWorks Simulation and ANSYS-Fluent and ANSYS-CFX completely coincide. When the flow model is replaced by the combustion model, it is shown that the ignition of the mixture will occur in the calculated volume, and not immediately after the cut of the flame stabilizer. Differences in the temperature fields of the calculated volume, which were calculated by means of Fluent and CFX, were also determined. This is due to the fact that during the development of the model it was not possible for objective reasons to identically configure the Species Transport model used in Fluent and the RIF library of CFX combustion kinetics. In addition, it was determined that in the case of modeling the transport and combustion of gases, the temperature field of the pipe wall does not have sharply expressed overheated zones, as in the case of washing with a jet of red-hot gas. This indirectly indicates that thermal loads on the pipe wall will be less and the risk of the pipe burning out is reduced.*

**Keywords:** modeling, combustion, methane, boiler fuel, thick-walled tube.

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

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

**Baranyuk Oleksandr V.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Nuclear Power Engineering, e-mail: AleksandrW@i.ua