

А. Ю. Рачинський¹
О. В. Баранюк^{1,2}
О. О. Пікенін¹
А. І. Бордіян¹

CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ПРИЙНЯТНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПОШИРЕНИХ НА РИНКУ УКРАЇНИ ПЕЛЕТ, ЯК ПАЛИВА ДЛЯ ПЕЛЕТНОГО КОТЛА З ПАЛЬНИКОМ РЕТОРДНОГО ТИПУ

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

²Інститут теплоенергетичних технологій Національної академії наук України, Київ

Котли СЕТ призначені для теплопостачання житлових будинків, споруд комунально-побутового та промислового призначення, обладнаних системами опалення з природною або примусовою циркуляцією води як теплоносія. Ескізні кресленики та деякі теплогідрравлічні характеристики цих котлів представлені у відкритому доступі. На сайті розробника сказано, що котли працюють з автоматизованим завантаженням пелет з відходів деревини. Розробники наголошують, що можливе використання інших видів твердого палива зі зміною технічних характеристик та терміну служби котла.

Щоб не проводити вартісний експеримент з наявним обладнанням, автори засобами сучасного програмного комплексу ANSYS-Fluent розробили CFD (Computation Fluid Dynamics) модель процесів, що відбуваються в водогрійному котлі СЕТ 25 АП потужністю 25 кВт, під час спалювання різних видів пелет. Обчислення проводились за допомогою академічної ліцензії програмного комплексу ANSYS Student. Ця ліцензія є безкоштовною (з 2015 року) і призначена для вирішення ознайомлювальних і освітніх завдань в академічному середовищі. Для моделювання процесів, що відбуваються під час спалювання пелет як палива, автори провели моделювання теплогідрравлічних характеристик течії безперервної газової фази під час її взаємодії з дискретною фазою у вигляді пелетних гранул. Проведена верифікація результатів CFD-моделювання згідно з паспортними даними, які представлені розробником котла СЕТ-25 для випадку спалювання дерев'янистих пелет. Показано, що розбіжність результатів не перевищує 2%, отже розроблену модель можна використовувати для моделювання спалювання інших поширених видів пелет: з деревини хвойних порід, рапсу, з пташиного посліду та соломи, а також з донних мулів. Отримані результати можуть бути корисними для проектування нових конструкцій водогрійних котлів і повіркового розрахунку наявних.

Ключові слова: пелети, CFD-моделювання, модель горіння без попереднього змішування, теплообмін, променевий теплообмін, конвекція.

Вступ

Останнім часом як альтернативне паливо широко застосовуються відходи деревообробної галузі промисловості і сільського господарства, спресовані у вигляді гранул — пелет. Для реалізації на ринку України пропонуються так звані «білі» пелети, що виготовлені з деревини твердих сортів, а також так звані «сірі» пелети, що виготовляються з деревини хвойних порід, рапсу, з пташиного посліду та соломи і пресуються у вигляді гранул, для автоматичної подачі їх в пальник. Згадані гранули відрізняються як хімічно-елементним складом, теплотворною здатністю, так і ціною. Постає питання: «Якими пелетами користуватись під час опалення побутових будинків?»

Сьогодні є чинним стандарт ENplus [1], який регламентує фізико-хімічні властивості пелет і висуває до якості деревних пелет найсуворіші вимоги, регламентує сферу їх застосування (побутовий сектор, котельні і теплові станції). Для пелет, які призначені для використання в побутовому секторі, де відсутнє високотехнологічне обладнання для очищення викидів, застосовуються найжорсткіші вимоги.

Згідно зі стандартом EN plus-A1, який застосовується для пелет побутового призначення, насамперед висувається вимога щодо зольності: 0,5 % для пелет з хвойних порід дерев і 0,7 % для пелет з листяних дерев. Цим вимогам відповідають перераховані вище види пелет.

Виробники котельного обладнання мають змогу перевірити кількість забруднювальних речовин тільки у відпрацьованих газах. А власне в пальнику, топковій камері та конвективній частині котла визначити генерацію забруднювальних речовин можливо лише засобами числового моделювання.

У Європі тверде біопаливо на основі рослинної (в основному деревної) біомаси з кожним роком все більше витісняє з ринку тепла викопні види палива. Таким чином реалізуються на практиці заходи, щодо захисту довкілля за рахунок скорочення викидів парникових газів і пилу в атмосферу [2]. За співвідношенням комфорту та вартості опалення з пелетами конкурує тільки природний газ, якщо будинок під'єднаний до центрального трубопроводу. Опалення газом конкурентне, але приєднання будинку до трубопровідної мережі і підготовка плану набагато дорожче встановлення твердопаливного пелетного котла [3].

На сучасному рівні розвитку енергетики, пелети є основним джерелом теплової енергії в Європі. Пелети (пілети, деревні гранули) — це спресовані гранули, які складаються з відходів деревного, сільськогосподарського виробництва. Наразі пелети популярніші за кордоном, особливо у Данії, Швеції, Австрії (світові лідери з виробництва обладнання для спалювання пелет). Вони високо екологічні, теплотворна спроможність пелет така ж, як і у вугілля, ціна приємна і для споживання у промислових масштабах, і для задоволення побутових потреб [3]. Обсяги споживання пелет для приватних, муніципальних і промислових об'єктів постійно зростають [2], оскільки пелети є екологічно чистим видом палива, проте не є основним джерелом енергії. Згідно з дослідженнями [3] під час спалювання пелет в атмосферу викидається стільки ж вуглекислого газу, скільки утворилося у разі природного розкладання деревини. Пелети мають стабільно високу якість, безпеку, екологічність, постійну насипну щільність, що дозволяє відносно легко транспортувати цей сипкий продукт на великі відстані і найголовніше — можливість автоматизувати управління процесом горіння. Стає очевидним, що пелети (паливні гранули) — єдиний вид палива, який може бути справжньою альтернативою природному газу в побутовому секторі [2].

Розмір пелет, який вважається стандартним, варіюється у межах 6...8 мм у ширину і 5...70 мм у довжину. Ці параметри залежать від обладнання, за допомогою якого спресовують сировину або відходи. Можна знайти й інші розміри, проте це не впливає на ефективність спалювання пелет.

Найкращі за теплотворністю пелети зроблені з листяних порід дерев. Пелети з соснових також присутні на ринку, але частіше в регіонах, де немає листяних лісів. До того ж виробництво пелет з листяних порід вимагає дорожчої технології [1].

Одна з найбільших переваг пелет — екологічна складова. Оскільки пелети складаються з деревини, вони беруть участь у природному обміні вуглецем. Це означає, що під час спалювання вони виділяють таку ж кількість вуглецю, яку дерево ввібрало за життя. Споживання пелет зменшує необхідність вирубки лісів і вони відносяться до поновлюваних джерел енергії, на відміну від вугілля чи солярки.

Теплотворна здатність пелет сягає 15 МДж/кг, що в середньому з урахуванням КПД теплогенераторів у півтора рази більше ніж у дров. Порівнюючи цей показник із соляркою, можна усереднено сказати, що один кілограм пелет виробляє стільки ж теплової енергії, скільки півлітра рідкого палива. Перевага пелет тут в тому, що вони не забруднюють будинок і оточення, не розливаються і в загальному безпечніші у використанні. Котельня з пелетним котлом набагато охайніша та естетичніша.

Пелети не виділяють запаху, дим майже безбарвний, вони виділяють значно менше двоокису сірки та інших шкідливих елементів, які виділяються під час спалювання вугілля у надлишку.

Суттєвим мінусом використання пелет можна назвати високу ціну спеціальних пелетних котлів. Значно дешевше модифікувати вже встановлений звичайний твердопаливний котел. Достатньо оснастити його пелетним пальником.

Пелетні котли не обмежені в потужності, ними можна легко опалювати кілька будинків, незалежно від розташування опалювальної точки.

Зазвичай під час моделювання процесів горіння твердих палив розглядають процеси камерного спалювання для потужних енергетичних котлів [4], [5], а щодо невеликих опалювальних котлів, зокрема, які працюють на пелетах, даних в літературі достатньо мало.

В сучасних котельних агрегатах, які призначені для опалення приватних і муніципальних будівель, для спалювання пелет використовуються як так звані ретордні, так і сучасніші факельні пальники. Існує також практика спалювання солом'яно-бітумних гранул в барботажному псевдозрі-

дженому шарі. Комплексна робота, виконана авторами [6], спрямована на вивчення таких явищ як вивільнення та сегрегація летких, подрібнення та вигорання вуглецю, викид частинок з шару гранульованого палива і постгоріння над цим шаром. Для досягнення цієї мети автори [6] розробили одновимірну математичну модель. Камеру згорання, в якій реалізовувався процес спалювання, автори умовно поділили на три зони: зону щільно укладеного гранульованого палива, зону розбризкування і зону вільних потоків. Рівняння збереження імпульсу і маси для п'яти видів хімічних компонентів (CH_4 , O_2 , CO , H_2O і CO_2) подано для трьох згаданих вище зон. За оцінками моделі, близько 53 % летких речовин горить всередині щільно укладеного шару гранульованого палива, при цьому виділяється 60 % загального тепла. Частка тепла, що виділяється в зоні розбризкування, становить близько 33 % тоді як решта (7 %) припадає на зону вільних потоків. Проте виплеснені частинки палива псевдорозрідженого шару повертаються назад. Хоча, яка наголошують автори, модель досить спрощена, вона задовільно описує продуктивність горіння.

Також відомі дослідження спалювання різних за походженням видів паливних пелет та гранул, таких як біо-вугілля [7], сумішей торфу та деревини [8], спільного спалювання деревних пелет з вугіллям [9] та ін. Вказані наукові роботи свідчать про актуальність сучасних досліджень щодо використання технологій альтернативної енергетики, зокрема паливних пелет різного походження. Але для твердопаливних водогрійних котлів є доцільним оцінювання теплотехнічних характеристик роботи обладнання під час роботи на певному виді паливних пелет. Тому *метою статті* є оцінка можливості використання як палива поширених на ринку України пелет шляхом аналізу температур і швидкостей розжарених газів, що утворюються в прототипі пелетного водогрійного котла типу «СЕТ 25 АП» потужністю 25 кВт [10]. Дослідження планується провести засобами CFD-моделювання. Паливом, можливості використання якого планується оцінити, є мішана деревина різних порід, пелети з деревини хвойних порід, рапсові пелети (гранули), пелети з пташиного посліду та соломи, пелети з донних мулів і так звані «білі» пелети з деревини твердих сортів, для яких є паспортні дані щодо режимних характеристик котла.

Методика дослідження

Для досягнення поставленої мети постановка задачі в загальному випадку містить геометричну модель котла прототипу, створеної на її основі скінчено-елементної моделі з граничними умовами і математичним описом розрахункового процесу, який реалізовано засобами ANSYS-Fluent [11]. Як прототип вибрано автоматичний пелетний котел СЕТ 25 АП, для якого у відкритому доступі є інформація щодо його конструктивних особливостей і технічних характеристик. Корпус котла виконаний з якісної котельної сталі товщиною 6 мм з теплоізоляцією, обшитим кожухом у вигляді водяної сорочки, яка утворена подвійними стінками, між якими курсує вода. Конструкція котла показана на рис. 1.

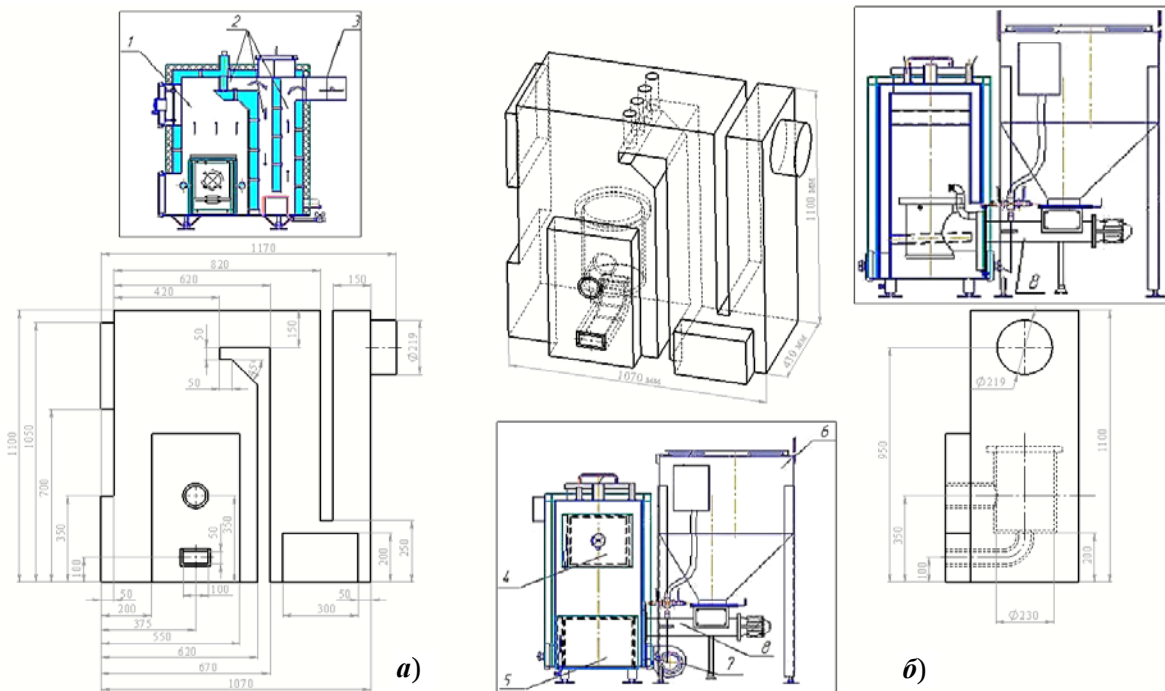


Рис. 1: а — зображення паливника ; б — розрахункової моделі

Теплообмінник твердопаливного котла «СЕТ 25 АП» з'єднаний з водяною сорочкою і містить жаропротівні труби, з'єднані з димоходом у верхній частині корпусу. Як розрахункову геометрію вибрано поєднання двох об'єктів: топки і конвективної частини котла. Ретордний пальник показаний схематично. Підведення повітря, що подається відцентровим вентилятором здійснюється по трубопроводу прямокутного перерізу. Напрямок руху потоків в котельному агрегаті показано стрілками. Червона стрілка вказує на переріз, крізь який подається паливо, синя — повітря. «Водяна сорочка» котельного агрегата виконана у вигляді прямокутних простінок, крізь які курсує вода. Ці простінки на рис. 1 показані світло-синім кольором і в геометричній моделі обмежуються непроникними стінками на яких в CFD-моделі задаються теплоізолявальні умови.

На основі геометричної моделі розроблена скінчено-елементна. Її основа — гібридна сітка, що є комбінацією структурованої і неструктурованої скінчено-елементної сітки.

Структурована скінчено-елементна сітка у вигляді сукупності паралелепіпедів призначена для моделювання течії в примезовому шарі, що розвивається на межі «твердотільна поверхня—

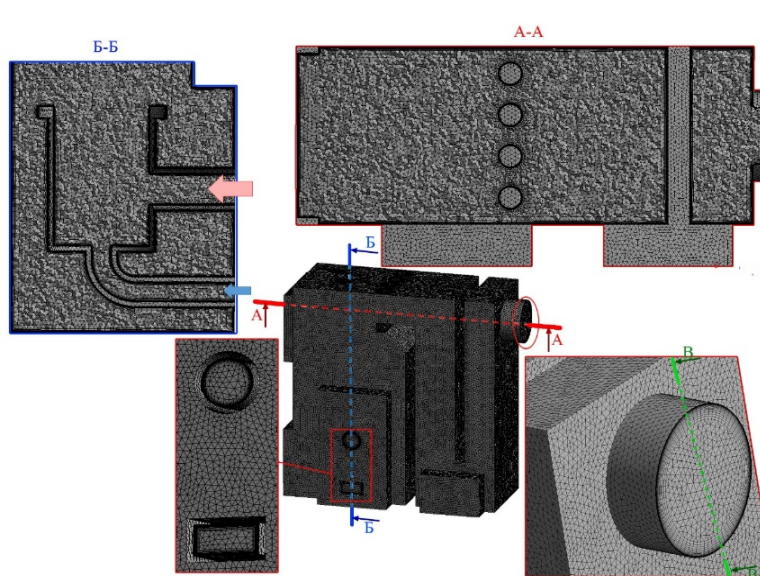


Рис. 2. Скінчено-елементна сітка області рішення

рідина». В представленій задачі ця зона розташована на всіх поверхнях котельного агрегату (внутрішня поверхня корпусу, на циліндричних зовнішніх поверхнях труб теплообмінника (рис. 2)) окрім місць, на яких встановлені дверцята для завантаження палива, для обслуговування пелетного пальника та теплообмінника. В Ansys для створення такої області (рис. 2) використовується Inflation (наближення). Для коректного розрахунку потрібно використати не менше 20-ти шарів скінчених елементів (строčka Maximum Layers в діалоговому вікні Details of «Inflation»), бажано з врахуванням коефіцієнта переходу (строčka Transitional Ratio в діалоговому вікні

Details of «Inflation») 0,1 (кожний наступний елемент більше попереднього на 10 %).

Зона між «примезовими шарами» апроксимується нерівномірною (зі згущенням до зовнішніх меж примезових шарів) неструктурованою розрахунковою сіткою, відстань між вузлами якої регулювалась параметром Relevance Fine, що визначає характеристику щільності сітки і задається в межах від $-0,1$ до $+0,1$. При цьому скошеність (Skewness) не перевищувала 0,8, а співвідношення сторін (AspectRatio) кінцевих елементів не перевищувало 40.

Для поєднання структурованої і неструктурованої розрахункових скінчено-елементних сіток вибрано Метод MultiZone. Зовнішній вигляд скінчено-елементної сітки показано на рис. 2.

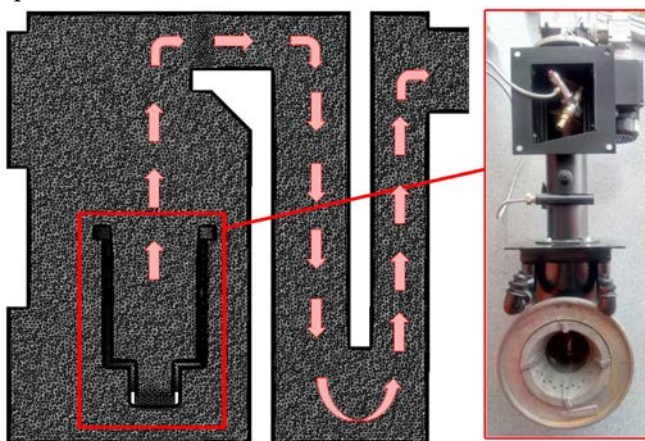


Рис. 3. Поздовжній розріз прототипу CET-25 (В-В) зі схематичним зображенням пальника ретордного типу

Червоною і синьою стрілкою позначено відповідно напрямки подачі палива та повітряного потоку, які направляються в ретордний пальник (рис. 3), показаний схематично. На рис. 3 показано поздовжній розріз прототипу котла CET-25 (В-В), а стрілками — рух димових газів з топки в конвективну частину.

На рис. 1 спостерігаються потовщені межі — це згущення скінчено-елементної сітки поблизу твердотільних поверхонь, результат візуалізації примезових шарів функцією Inflation.

Моделювання спалювання твердого палива виконувалось за допомогою скінчено-елементних CFD-моделей котельного агрегата в середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent.

Відомо, що явища переносу імпульсу і маси в хімічно реагуючих потоках описуються досить складною нелінійною системою рівнянь в часткових похідних. Ця система містить рівняння нерозривності, осереднені по Рейнольдсу рівняння збереження енергії, імпульсу і маси (Нав'є–Стокса), а також рівняння переносу i -го компонента суміші, які розв'язуються чисельними методами в середовищі Ansys-Fluent.

Для моделювання складових тензора напруг Рейнольдса використано найпоширеніший у числовому моделюванні підхід Буссінеска.

Для замикання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є–Стокса використовувалася Realizable k - ε модель турбулентності, що відрізняється від стандартної k - ε моделі альтернативним формулюванням виразу для розрахунку турбулентної в'язкості

$$\mu = \frac{\rho}{\left(A_0 + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon} \right)} \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (1)$$

де змінні A_0 , A_s та U^* є функцією градієнта швидкості.

Також Realizable k - ε модель турбулентності забезпечує позитивність нормальних напруг $\left(\overline{(u_i')^2} \geq 0 \right)$ і виконання нерівності Шварца $\left(\overline{u_i' u_j'} \right) \leq \left(\overline{(u_i')^2} \right)^{1/2} \left(\overline{(u_j')^2} \right)^{1/2}$. Транспортні рівняння для k та ε Realizable моделі турбулентності можна знайти в [6].

Використання Realizable k - ε моделі в розробленій CFD-моделі вибрано тому, що вона розроблена для потоків, що містять струмені (вприск нагрітого повітря крізь прошарок палива), примежові шари розвиваються під дією сильних несприятливих градієнтів тиску (омивання жаропротівних труб котельного агрегату), яке супроводжується відривом потоку, а також для урахування зон із сильною обтічною кривизною.

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

Послаблені припущення локальної рівноваги для ТКЕ в сусідніх чарунках.

$$\frac{\tilde{U} C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{k} \ln \left(E \frac{\rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} y}{\mu} \right), \quad (2)$$

де

$$\tilde{U} = U - \frac{1}{2} \frac{dp}{dx} \left[\frac{y_v}{\rho k^* k^{1/2}} \ln \left(\frac{y}{y_v} \right) + \left(\frac{y - y_v}{\rho k^* k^{1/2}} \right) + \left(\frac{y_v^2}{\mu} \right) \right], \quad (3)$$

де y_v — відстань від непроникної твердої стінки до верхньої межі в'язкого підшару (зазвичай становить $y^+ \approx 5$), а y_n — відстань від непроникної твердої стінки до верхньої межі турбулентного ядра.

Температура в примежовому шарі розраховується таким чином:

$$T^* = \frac{(T_w - T) \rho C_\mu^{1/2} k^{1/2}}{q''}, \quad (4)$$

де C_μ згідно з використаною Realizable k - ε моделлю турбулентності

$$C_\mu = \frac{1}{\left(A_0 + A_s \frac{U^* k}{\varepsilon} \right)}. \quad (5)$$

Після завдання гідродинамічних характеристик потоку використана модель горіння без попереднього змішування (non-premixed combustion model). Відправною точкою для її використання є створення PDF таблиці (PDF— probability distribution function — функція розподілу вірогідності). Ця функція містить інформацію про залежність змісту компонентів і температур від фракційного складу суміші і використовується ANSYS-Fluent для набуття цих значень в процесі рішення.

Дослідження вищеперерахованих видів твердого палива ставить на меті завдання в CFD-моделі визначення хімічних компонентів реакції, що входять складу як до сухої знезоленої маси (dry-ash-free basis), так і для «робочої» (ultimate analysis). Числові значення хімічного складу всіх досліджених типів палив подані в таблиці.

Робочі характеристики палив

Параметр	Пелети з твердих сортів деревини	Мішана деревина різних порід	Пелети з деревини хвойних порід	Рапсові пелети	Пелети з пташиного посліду та соломи	Пелети з донних мулів
C ^p	41,568	43,21	46,44	31,56	34,700	30,32
H ^p	5,196	5,183	5,85	4,46	4,071	4,06
O ^p	38,970	39,45	41,59	38,68	25,232	19,85
N ^p	0,061	0,044	0,076	0,622	3,653	2,782
S ^p	0,026	0,009	0,057	0,064	0,592	0,694
W ^p	9,00	0,80	0,40	5,40	13,50	21,80
A ^p	5,18	10,6	5,2	14,9	7,6	4,4
V ^{daf} , %	70,0	75,8	79,2	62,5	63,6	59,5
Q _H ^p , МДж/кг	14,97	15,67	17,234	10,94	12,93	11,82

Для визначення 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. Для коректного прогнозу утворення NO_x, задіяна опція Laminar Flameless, яка дозволяє включати аеродинамічну деформацію для врахування нерівноважних ефектів, таких як надрівноважна концентрація радикалів (super-equilibrium radical concentration) і субрівноважні температури (sub-equilibrium temperatures).

Вища теплота згоряння згорання (Fuel high calorific value) в перерахунку на сухий беззольний стан (DAF dry-ash-free) розраховується за допомогою формули Менделєєва

$$Q_H^p = 339,4\varphi_C + 1256,8\varphi_H + 108,9(\varphi_S - \varphi_O - \varphi_N), \quad (6)$$

Для моделювання променевого теплообміну між газом і твердими частинками в розробленій CFD-моделі використовується модель випромінювання P1.

Результати дослідження

Для підтвердження достовірності розрахункової моделі виконано порівняння результатів моделювання з паспортними даними характеристик котла «СЕТ-25» під час спалювання пелет з твердих порід деревини. Згідно з характеристиками котла [5] температура димових газів на вході в димар повинна становити 140 °С. В свою чергу визначене засобами CFD-моделювання значення температури газів, що відходять, становить 143 °С, що на 2 % відрізняється від паспортної. Після проведеної таким чином верифікації, розроблену CFD-модель можна використовувати в подальших розрахунках котла на інших типах паливних пелет. Розподіл температурних полів продуктів згоряння в котлі (рис. 4—9) дозволяє визначити межі, в яких відбувається поширення фронту полум'я та вигорання палива та продуктів реакції.

Максимальна температура (до 1000 °С) спостерігається тільки в пальнику. Автори [12] зазначають, що за таких рівнів температур можна одночасно домогтися допустимих рівнів викидів NO_x і СО.

Аналіз даних рис. 4—9 свідчить про складний тривимірний характер поширення фронту полум'я — під час спалювання пелет з твердих сортів деревини, рапсу і мішаної деревини різних порід полум'я поширюється за межі пальника і в його межах зберігаються високі значення температур — до 1000 °С. Вища теплотворна здатність цих палив знаходиться на рівні 16 МДж/кг. Проте пелети з деревини хвойних порід мають вищу теплотворну здатність 18,5 МДж/кг, а утворений ними фронт полум'я досить компактний і не перевищує в діаметрі 80 мм. На думку авторів, це пов'язано з хімічним складом сухої беззольної і робочої суміші.

Пелети з пташиного посліду та соломи досить швидко займаються (про що свідчить наявність зони високих температур поблизу впорскування нагрітого повітря в пальник) і швидко вигорають — фронт полум'я з температурою до 1000 °С не полишає межі пальника.

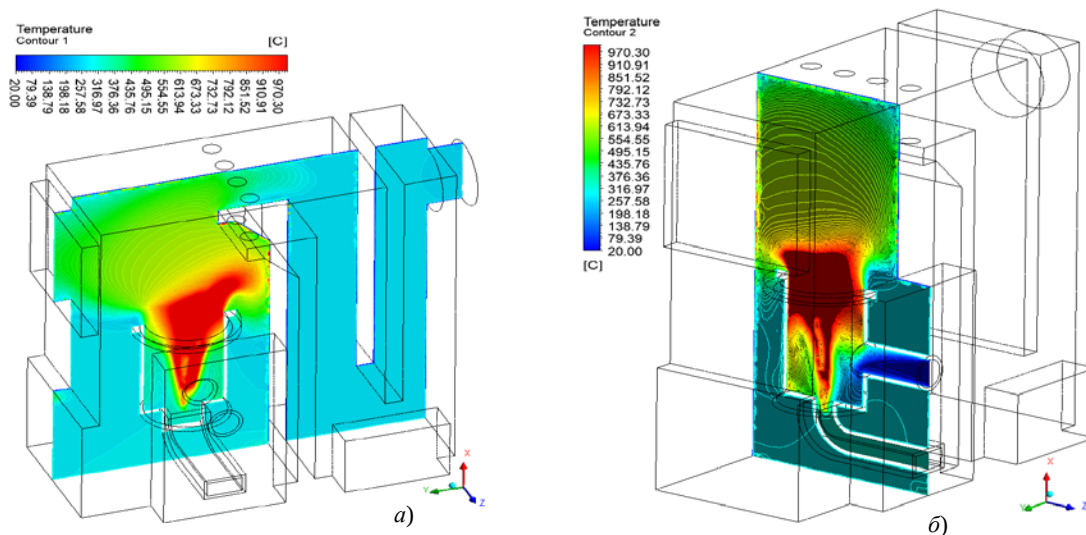


Рис. 4. Розподіл температур в: *a* — поздовжньому; *б* — поперечному перерізах прототипу котла CET-25 під час спалювання мішаної деревини різних порід

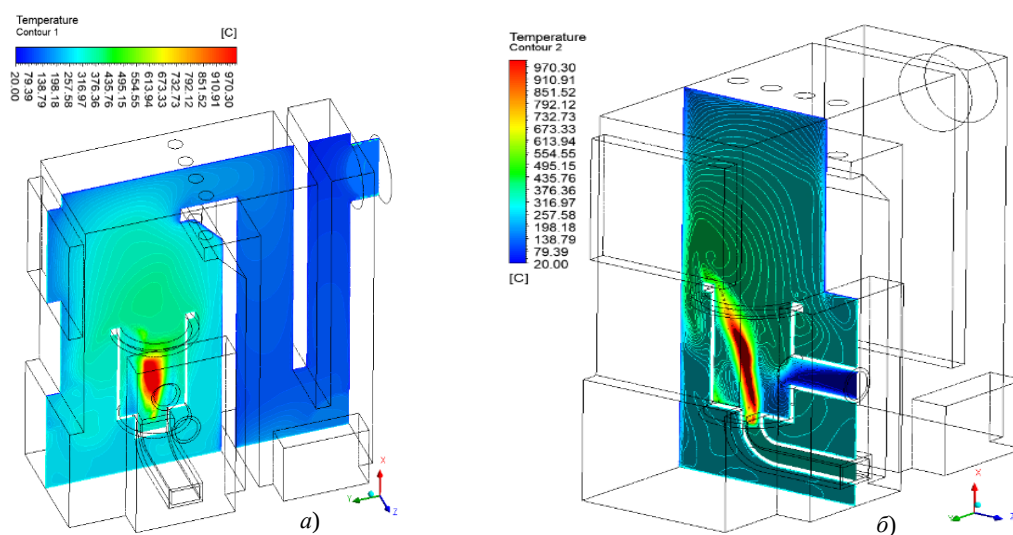


Рис. 5. Розподіл температур в: *a* — поздовжньому; *б* — поперечному перерізах прототипу котла CET-25 під час спалювання пелет з деревини хвойних порід

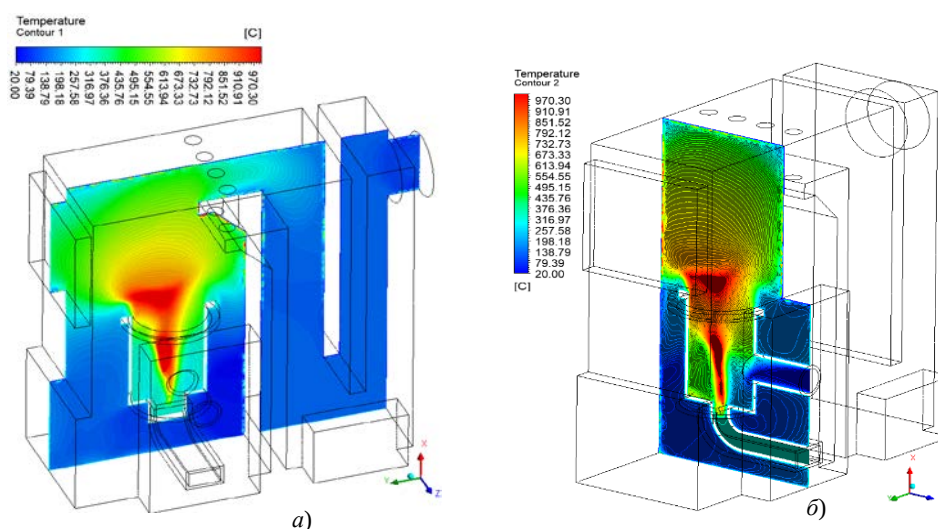


Рис. 6. Розподіл температур в: *a* — поздовжньому; *б* — поперечному перерізах прототипу котла CET-25 під час спалювання рапсових пелет

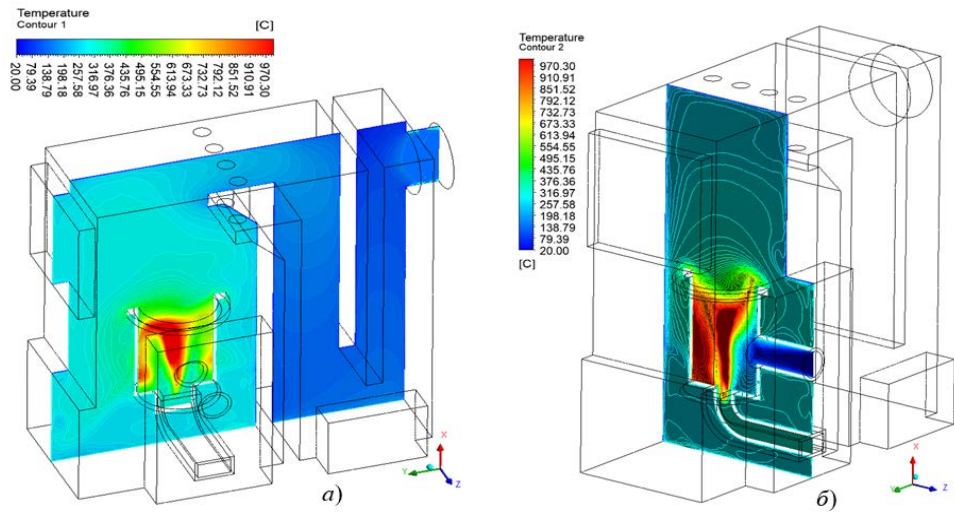


Рис. 7. Розподіл температур в: *a* — поздовжньому; *б* — поперечному перерізах прототипу котла CET-25 під час спалювання пелет з пташиного посліду та соломи

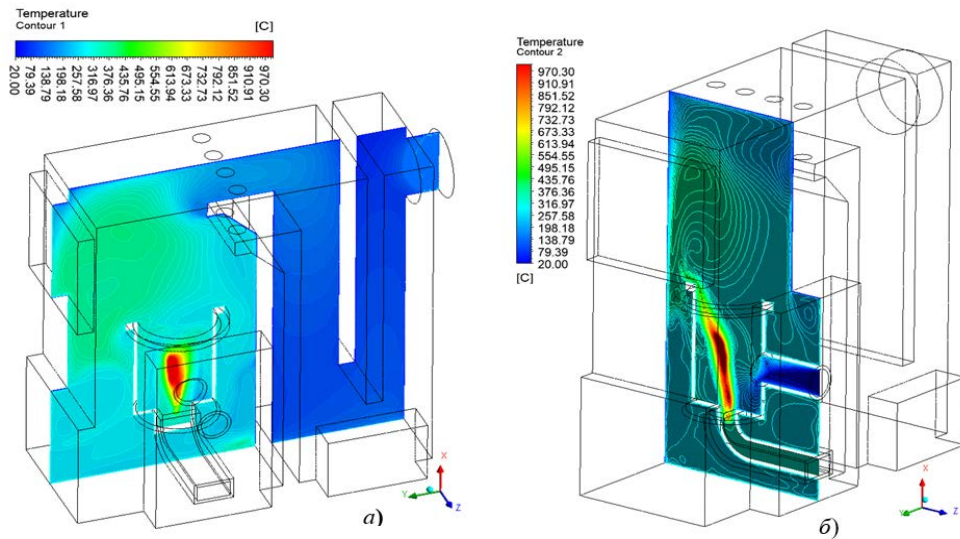


Рис. 8. Розподіл температур в: *a* — поздовжньому; *б* — поперечному перерізах прототипу котла CET-25 під час спалювання пелет з донних мулів

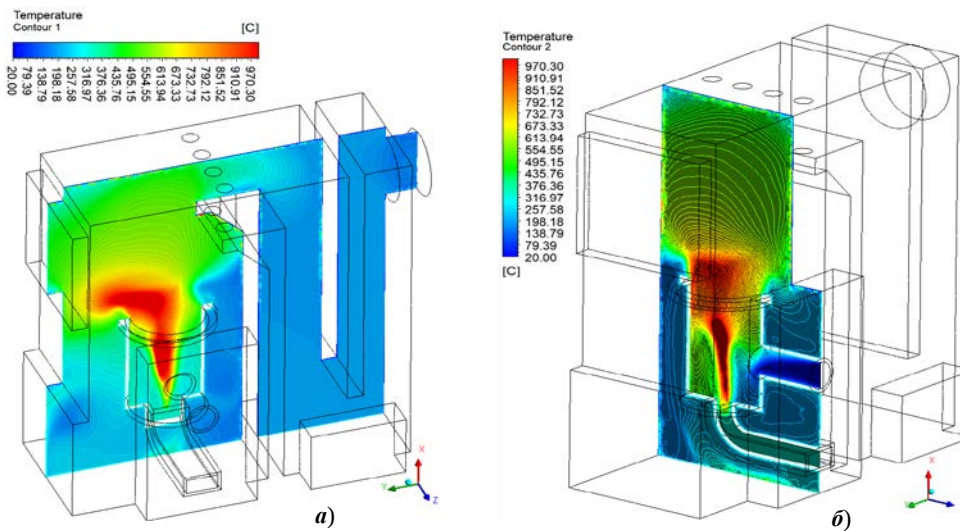


Рис. 9. Розподіл температур в: *a* — поздовжньому; *б* — поперечному перерізах прототипу котла CET-25 під час спалювання пелет з твердих сортів деревини

Найкомпактніший фронт полум'я спостерігається у разі спалювання пелет з донних мулів — його висота не перевищує 300 мм, а максимальний діаметр досягає 70 мм. Вища теплотворна здатність цього палива найменша з досліджених і становить 13,4 МДж/кг.

Як перспективу подальших досліджень, варто розрахувати розподіли забруднювальних речовин (CO та NO_x) у топці і конвективній частині котла.

Висновки

Проведена валідація розрахункової CFD-моделі з паспортними даними котла під час спалювання пелет з твердих сортів деревини. Показано, що комп'ютерне моделювання дозволяє проводити попереднє, досить точне оцінювання характеристик роботи котла під час спалювання твердих палив різного складу.

Розглянуто особливості горіння паливних пелет різного походження для умов їх використання в конкретному технологічному пристрої. Визначено характер розвитку та розміри фронту горіння (полум'я) та відповідний вплив параметрів факелу на характеристики роботи котла (температуру відхідних газів). Найбільші розміри факелу характерні під час спалювання мішаної деревини різних порід та становлять близько 250 мм у діаметрі, а висота фронту становить близько 500 мм. Найкомпактніший факел фронту полум'я спостерігається під час спалювання пелет з донних мулів, його висота не перевищує 300 мм, а максимальний діаметр досягає 70 мм.

Встановлено, що зі зміною типу палива забезпечується виконання режимних параметрів роботи котла, найбільше значення температури відхідних газів у $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ спостерігається для мішаної деревини різних порід, а найменше — $98\text{ }^{\circ}\text{C}$ для пелетів з донних мулів.

Отримані дані CFD-моделювання можуть бути використані для проектування енергетичного обладнання для спалювання твердих палив різного походження: біомаси, вугілля та їх сумішей тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] *Про види твердопаливних котлів*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://altep.ua/articles/pro-vikidi> . Дата звернення 16.01.2022.
- [2] *Паливні пелети. Характеристики і види*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://galmet.com.ua/yak-tse-pratsyuye/palyvni-pelety-harakterystyky-ta-vydy.html> . Дата звернення 13.03.2025.
- [3] *Все про пелети*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://liberator.com.ua/ua/vse-pro-peleti/> . Дата звернення 16.01.2022 р.
- [4] M. Nekhamin, I. Beztseyny, N. Dunayevska, and V. Vyfatnuik, "On using the ANSYS FLUENT software for calculating the process of burning a mixture of particles from different types of solid fuels," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 4(8 (106)), pp. 48-53, 2020. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209762> .
- [5] A. A. Bhuiyan, and J. Naser, "CFD modelling of co-firing of biomass with coal under oxy-fuel combustion in a large scale power plant," *Fuel*, no. 159, pp. 150-168, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.05.011> .
- [6] F. Okasha, "Modeling combustion of straw-bitumen pellets in a fluidized bed," *Fuel Processing Technology*, no. 88, pp. 281-293, 2007.
- [7] T. Ferreira, J. M. Paiva, and C. Pinho, "Comparative analysis of fluidized and fixed beds to obtain data on the Char Pellet's combustion regime," *International Journal of Energy for Clean Environment*, no. 21, pp. 237-68, 2020. <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2020034698> .
- [8] A. S. Mikhailov, O. A. Evdokimov, A. I. Guryanov, and N. S. Spesivtseva, "Influence of the fractional composition of composite fuel granules on their characteristics as an energy source," *International Journal of Energy for Clean Environment*, no. 18, pp. 231-42, 2017. <https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2017020710> .
- [9] H. D. Yildizay, and A. Esiyok, "Experimental investigation of coal and pellet combustion in a manual loaded stove. Energy Sources," *Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, no. 1, pp. 1-15, 2021. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1983085> .
- [10] *Автоматичний пелетний котел СЕТ 25 АП, 25 кВт*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://teplo-mag.com.ua/p1166584039-avtomaticheskij-pelletnyj-kotel.html> . Дата звернення 13.03.2025.
- [11] *FLUENT 5.5 UDF User's Guide*. Fluent Inc. September 2000, 563 p.
- [12] О. А. Сірий, М. З. Абдулін, і О. В. Баранюк. «Дослідження гідродинаміки потоку повітря в струменеві-нішевій системі спалювання палива», *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Збірник наукових праць. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, Харків : НТУ «ХПІ», № 9 (1181), 162 с., 2016.

Рекомендована кафедрою екології, хімії та технологій захисту довкілля ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 16.04.2025 р.

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

Баранюк Олександр Володимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики; науковий співробітник Інституту теплоенергетичних технологій Національної академії наук України, e-mail: AleksandrW@i.ua ;

Пікенін Олексій Олександрович — старший викладач кафедри космічної інженерії, Навчально-наукового інституту аерокосмічних технологій, e-mail: pikenin.work@gmail.com ;

Бордіян Артем Ігорович — аспірант кафедри цифрових технологій в енергетиці, e-mail: bordyanartem@gmail.com .

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

A. Yu. Rachynskyi¹

O. V. Baranyuk^{1,2}

O. O. Pikenin¹

A. I. Bordiian¹

CFD Modeling of the Acceptability of Using Pellets Common on the Ukrainian Market as Fuel for a Pellet Boiler with a Retort Type Burner

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

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

SET boilers are designed for heat supply of residential buildings, municipal and industrial buildings, equipped with heating systems with natural or forced circulation of water as a coolant. Sketch drawings and some thermal hydraulic characteristics of these boilers are presented in the open access. The developer's website states that the boilers operate with automated loading of pellets from wood waste. The developers emphasize that it is possible to use other types of solid fuel with a change in the technical characteristics and service life of the boiler.

In order not to conduct a costly experiment with the existing equipment, the authors developed a CFD (Computation Fluid Dynamics) model of the processes taking place in a SET water-heating boiler with a capacity of 25 kW when burning various types of pellets using the modern ANSYS-Fluent software package. The calculations were performed using the academic license of the ANSYS Student software package. This license is completely free (since 2015) and is intended for solving introductory and educational tasks in the academic environment. When modeling the processes, occurring during the combustion of pellets as a fuel, the authors conducted a simulation of the thermal hydraulic characteristics of the flow of a continuous gas phase during its interaction with a discrete phase in the form of pellet granules. The results of CFD modeling were verified according to the passport data, presented by the developer of the SET-25 boiler for the case of burning wood pellets. It was shown that the discrepancy of the results does not exceed 2 %, therefore the developed model can be used to simulate the combustion of other common types of pellets - from coniferous wood, rapeseed, from bird droppings and straw, as well as from bottom sludge. The results obtained can be useful when designing new designs of water heating boilers and verifying the calculation of existing ones.

Keywords: pellets, CFD modeling, combustion model without premixing, heat transfer, radiant heat transfer, convection.

Rachynskyi Artur Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Heat and Alternative Power Engineering, e-mail: arturrachinskiy@gmail.com ;

Baranyuk Oleksandr V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Heat and Alternative Power Engineering; Researcher of the Institute of Thermal Power Technologies of the NAS of Ukraine, e-mail: AleksandrW@i.ua ;

Pikenin Oleksii O. — Senior Lecturer, of the Chair of Space Engineering, Educational and Research Institute of Aerospace Technologies, e-mail: pikenin.work@gmail.com ;

Bordiian Artem I. — Post-Graduate Student of the Chair of Digital Technologies in Power Engineering Educational and Scientific, e-mail: bordyanartem@gmail.com