

А. Ю. Рачинський¹О. В. Баранюк^{1,2}О. О. Пікенін¹А. І. Бордіян¹

ВИКИДИ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН ВІД СПАЛЮВАННЯ 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

Ця робота виконана з метою оцінювання енергетичних та екологічних характеристик доступних в Україні паливних пелет, використаних у вигляді палива в побутовому водогрійному котлі СЕТ потужністю 25 кВт. Котли СЕТ призначені для теплопостачання житлових будинків, споруд комунально-побутового та промислового призначення, обладнаних системами опалення з природною або примусовою циркуляцією води як теплоносія. Ескізи креслення та деякі теплогідравлічні характеристики цих котлів представлені у відкритому доступі.

Моделювання спалювання твердого палива виконувалось за допомогою скінченно-елементних CFD-моделей котельного агрегату з подальшим визначенням екологічних і енергетичних характеристик роботи котла в середовищі програмного комплексу ANSYS Student, безкоштовним з 2015 року і призначеним для розв'язання ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі.

Проведена верифікація результатів CFD-моделювання на комп'ютерній моделі прототипу котла «СЕТ-25» згідно з паспортними даними, представленими його розробником. Верифікація виконувалась для випадку спалювання пелет з твердих сортів деревини. 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 теплотехнічних та екологічних характеристик роботи водогрійного котла, які можуть бути корисними для проектування нових конструкцій водогрійних котлів і під час повіркового розрахунку наявних. Визначено рівень утворення шкідливих речовин під час спалювання в котлі різних типів паливних пелет. Встановлено, що найбільший рівень емісії NO_x, спостерігається під час спалювання пелет з донних мулів (550 ppm), а найменший (180 ppm) — під час спалювання пелет з твердих сортів деревини. Показано, що у разі використання в котлі різних типів паливних пелет забезпечується виконання режимних параметрів роботи котла за умови підвищення добової витрати палива у порівнянні з використанням базового палива — пелет з деревини твердих сортів.

Ключові слова: водогрійний котел, паливні пелети, CFD-моделювання, утворення шкідливих речовин, променевий і конвективний теплообмін.

Вступ

Достеменно відомо, що пелети мають більшу теплотворну здатність ніж деревна тріска і власне дрова. Тому під час вибору котла і типу палива для опалювання замиського будинку, користувач зупиняє свій вибір саме на пелетах. Оскільки, окрім вищезазначеного факту, з доступної літератури відомо, що пелети — це екологічно чисте паливо з вмістом золи не більше 3 %. Під час спалювання пелет в атмосферу виділяється саме стільки CO₂, скільки поглинула рослина під час життя. Світовий досвід, зокрема Данії та інших країн, показує, що ефективне енергетичне використання агро-пелет є цілком можливим та доцільним за умови застосування відповідного обладнання і

технологій [1]. Стаття є продовженням раніше опублікованої роботи [2], де були викладені результати теплообміну в паливні.

Зважаючи на актуальність проблеми, визначення можливостей виробництва і використання українських агропелет кінцевими споживачами та основних шляхів стимулювання щодо їхнього використання також є *завданням цієї роботи* [3], [4].

Протягом багатьох років лідируючі позиції на ринку палива, що використовується для обігріву житла, громадських установ, і підігріву води, займав природний газ. Вся система опалення, що збудована у країні, орієнтована саме на нього. У деяких регіонах, містах застосування блакитного палива сягає 95 % від всього ринку. Це призвело до залежності країни від поставок, позбавила можливості створити енергетичну безпеку держави.

У 80-ті роки минулого століття паливо, що отримують з біологічної сировини, стало завойовувати популярність. Першими його оцінили жителі Скандинавії, потім — інших європейських держав. В Україні поширення подібного виду палива відбулося близько 15-ти років тому, поступово завойовуючи все більше споживачів, які бажають заощадити [5].

На сьогодні багато хто знайомий з такою думкою, що «перехід на тверде біопаливо дозволить значно поліпшити екологічний стан на планеті». Тут потрібно розуміти, що його застосування дійсно істотно знижує рівень викидів вуглекислого газу. До того ж, для його виробництва немає потреби знищувати дерева. Воно виготовляється з відходів деревообробної, харчової та сільськогосподарської продукції. Більше того, протягом багатьох років існувала проблема утилізації відходів. Наприклад, що утворюються на олійноекстракційних комбінатах, це лушпиння соняшника. За малої ваги воно має великі об'єми, легко запалюється, виділяє неприємний запах. Під час його гниття активно виділяється вуглекислий та інші гази, що негативно позначається на навколишньому середовищі. Зараз лушпиння соняшника використовується для виробництва пелет і брикетів. Вони мають високий рівень теплоутворення, під час спалювання не виділяють небезпечних речовин. А виділення вуглекислого газу значно менше ніж під час їх природного гниття. Тому можна з упевненістю говорити, що тверде біопаливо несе тільки користь планеті. Як з екологічної, так і з економічної точки зору [6].

Як впливає з аналізу експериментальної роботи [7], у разі поєднання твердопаливного котла і запропонованого пальника (малої потужності — до 25 кВт) можна спалювати пелети рослинного походження в широкому асортименті. Вкрай важливо дослідити і виявити оптимальні режимні карти спалювання в залежності від повноти спалювання, викидів шкідливих газів (NO_x), структури золи, температури теплоносія. Причому, як показано в цій роботі, рівень генерації NO_x протягом 12-ти годин роботи котла не перевищував 100 ppm.

В роботі [8] виконано порівняння значень викидів шкідливих речовин під час спалювання традиційних видів палива (природного газу та мазутів з різним вмістом сполук сірки) та біомаси, що використовується під час роботи паливних котлоагрегатів з урахуванням теплових характеристик та хімічного складу палива. Порівнюючи невідновлювальні види палива з біомасою, остання є безпечнішою з екологічного погляду. Забезпечуючи раціональні режими спалювання видів палива та зниження рівня викидів суспендованих твердих частинок, метану та неметанових летких органічних сполук, перспективи використання альтернативних видів палива будуть безперечними.

В експериментальній роботі [9], також зазначено, що деревне паливо (насамперед пелети і брикет) найкраще, з точки зору забруднення атмосфери, у порівнянні з мазутом (тим більше з вугіллям), оскільки має практично «нульовий ефект» за викидами парникових газів, насамперед CO_2 . Використання деревного палива як енергоносія повною мірою відповідає положенням Кіотського протоколу, щодо обмеження та скорочення викидів парникових газів.

Автори [10] провели експериментальне кількісне визначення та проаналізували викиди газу та твердих частинок (PM_{10}) від згоряння гранульованих інвазивних видів, що ростуть у прибережних районах Португалії. Їхні експерименти за допомогою сучасної техніки встановили, що викиди, які виникають від спалювання таких пелет, можуть бути значно вищими ніж рекламують виробники. Це спричинить негативний вплив на здоров'я людини та навколишнє середовище і призведе до помітного виробництва екологічно важливих забруднювачів, таких як оксид вуглецю (CO , $2468 \pm 485 \text{ мгМДж}^{-1}$), діоксид сірки (SO_2 , $222 \pm 115 \text{ мгМДж}^{-1}$) і оксиди азоту (NO_x , $478 \pm 87 \text{ мгМДж}^{-1}$).

А в іншій експериментальній роботі [11] зазначено, що домогосподарства, які використовують гранульовану біомасу, можуть досягти значного скорочення (51...95 %) викидів CH_4 , NMHC , CO , $\text{PM}_{2.5}$, OC , EC , PAH та EPFR порівняно з домогосподарствами, які використовують сиру біомасу, тоді як відмінності у викидах NO_x і SO_2 статистично незначущі.

Метою статті є оцінка рівня генерації забруднювальних речовин у вигляді NO_x і CO після використання як палива поширених на ринку України пелет шляхом аналізу теплогідрравлічних характеристик прототипу пелетного водогрійного котла типу «СЕТ-АП» потужністю 25 Вт [5]. Дослідження проводилось засобами CFD-моделювання. Паливом, можливості використання якого оцінювалось, 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

Це дослідження — продовження роботи [2], тому, на основі вже розробленої моделі та методики досліджень, засобами ANSYS-Fluent розраховано рівні термічних і швидких NO_x (рис. 1а). Модель враховує турбулентно-хімічну взаємодію компонентів і дозволяє визначати рівні NO_x з урахуванням впливу турбулентних пульсацій з осередненою за часом швидкістю реакції. Для прогнозування концентрації радикала O, необхідного для прогнозування температурних NO_x , використовується модель часткової рівноваги (partial-equilibrium). Вуглецеве число палива (число атомів вуглецю у молекулі палива (Fuel Carbon Number)) позначається цифрою 1 (рис. 1б), а коефіцієнт еквівалентності (Equivalence Ratio), що визначає співвідношення паливо-повітря (щодо стехіометричних умов), становив 0,76. Ці параметри використовуються для розрахунку швидкості утворення NO_x [12].

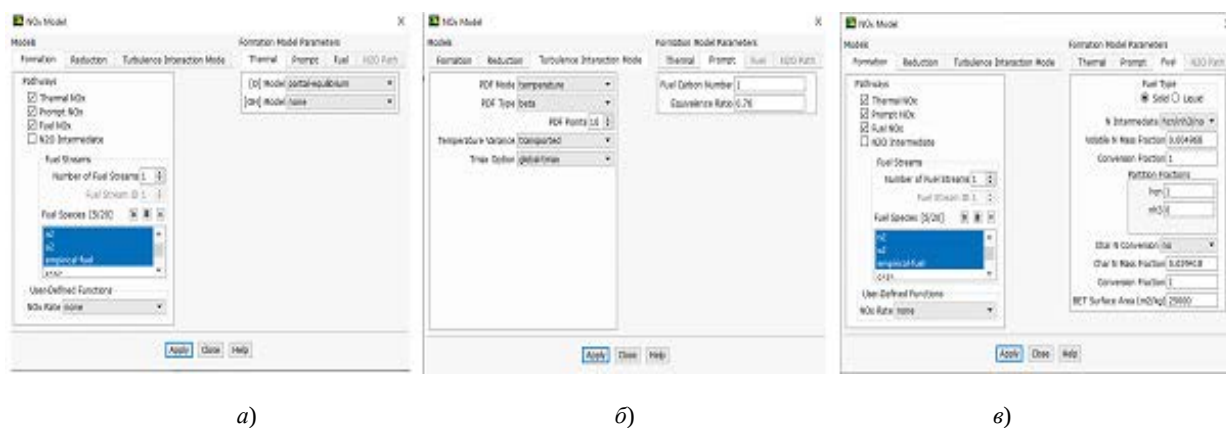


Рис. 1. Модель ANSYS-Fluent, для прогнозування утворення: а — термічних; б — швидких NO_x ; в — сполук NO_x , що знаходяться в паливі

Програмний комплекс ANSYS-Fluent також дозволяє в розробленій CFD-моделі прогнозувати утворення NO_x на основі подальших механізмів утворення оксидів азоту [12]:

- термічний механізм, який включає окислення N_2 за ланцюгом механізму Зельдовича і взаємодії атомів N з радикалами OH, а також механізми N_2O , NO_2 і NO; механізм N_2O визначається групою реакцій, в яких N_2O виступає як проміжна речовина при утворенні NO.

- механізм NO визначається взаємодією «швидких» оксидів азоту, які утворюються під час горіння палива у фронті полум'я в результаті взаємодії N_2 з радикалами CH і CH_2 , що з'являються при руйнуванні складних молекул вуглеводневого палива.

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).

Для дослідження вищезазначених видів твердого палива необхідно в CFD-моделі задати значення хімічних компонентів реакції, що входять до складу як сухої знезоленої маси (dry-ash-free basis), так і для «робочої» (ultimate analysis). Числові значення хімічного складу всіх досліджених типів палив подано на рис. 2.

Результати дослідження

Перед тим як безпосередньо перейти до аналізу екологічних характеристик котельного агрегату під час спалювання різних видів пелет, варто визначитись з швидкістю горіння палива. З цією метою

на рис. 3, 4 подано візуалізацію розподілу суміші палива і окислювача (Mixture Fraction) в паливній і конвективній частині котла. Цей параметр, свідчить про інтенсивність реакції суміш палива та окислювача (наприклад, у прореагованому полум'ї). Нульове значення відповідає 100 % окислювача, а значення 1 відповідає 100 % палива. Визначено, що вихід летких сполук зі складу твердого палива відбувається в пальнику. Вигорання вуглецю, що входить до складу палива відбувається після повного виходу летких сполук і закінчується в пальнику.

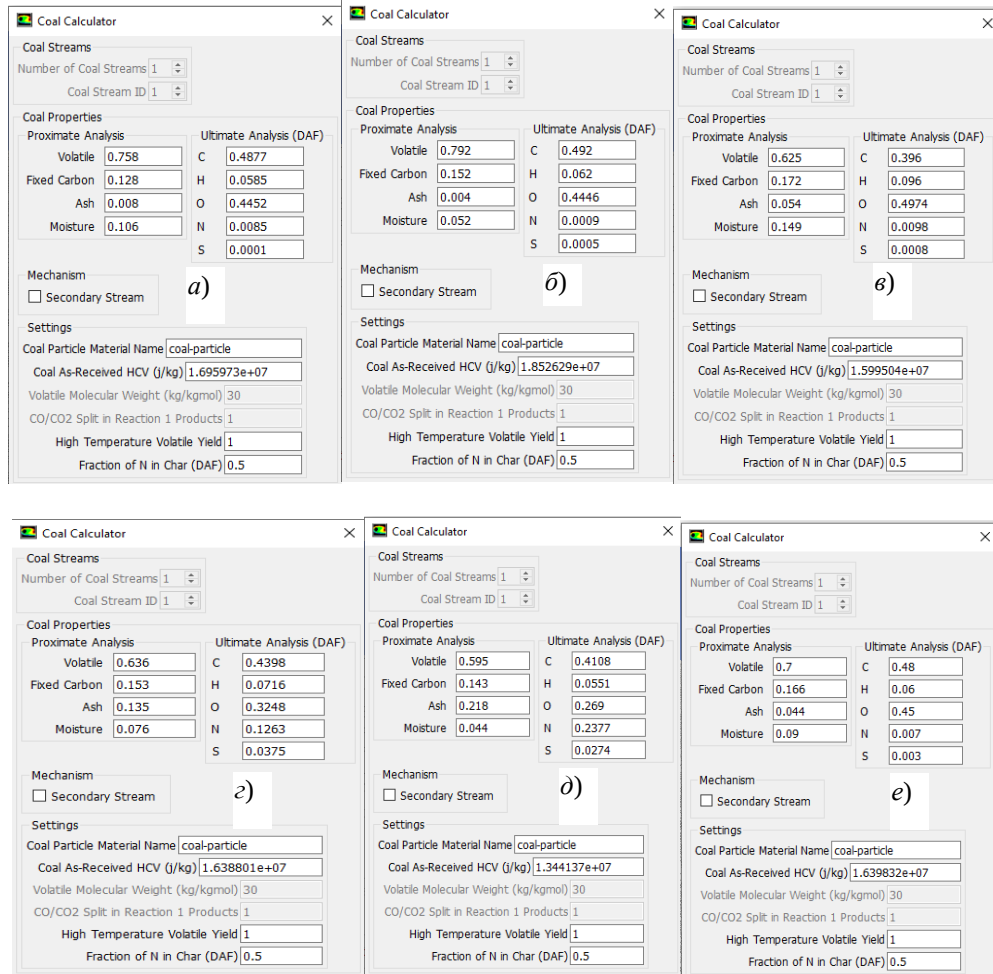


Рис. 2. Хімічний склад палива для наближеного і точного аналізу: а — мішана деревина різних порід; б — пелети з деревини хвойних порід; в — рапові пелети; г — пелети з пташиного посліду та соломи; д — пелети з донних мулів; е — пелети з твердих сортів деревини

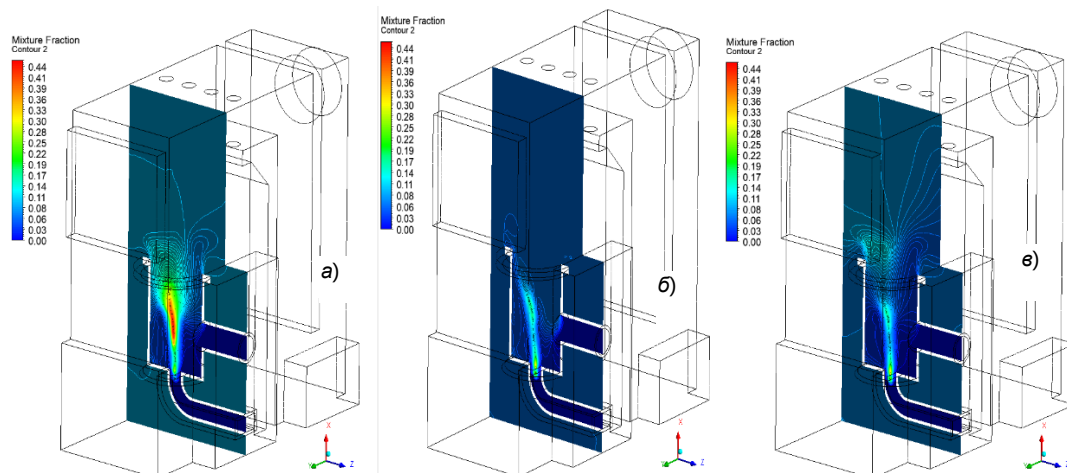
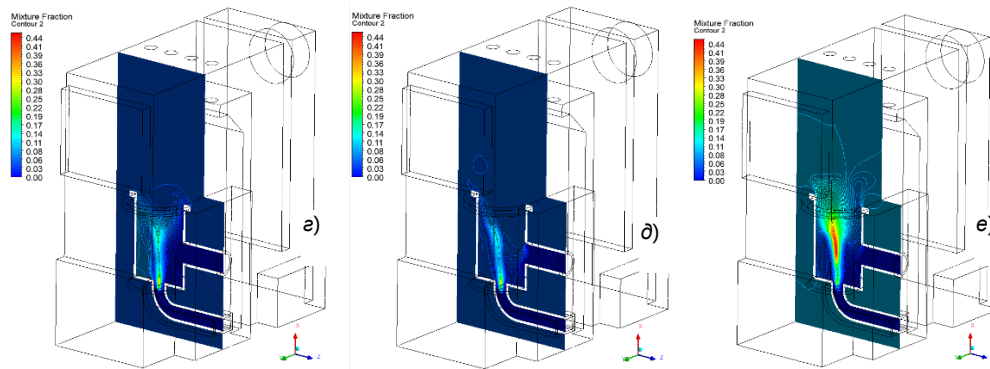


Рис. 3. Взаємодія палива і окислювача в поперечному перерізі прототипу котла CET-25 під час спалювання: а — мішаної деревини різних порід; б — пелет з деревини хвойних порід; в — рапових пелет



Продовження рис. 3. Взаємодія палива і окислювача в поперечному перерізі прототипу котла CET-25 під час спалювання: *г* — пелет з пташиного посліду та соломи; *д* — пелети з донних мулів; *е* — пелет з твердих сортів деревини

З рис. 3 випливає, що під час спалювання пелет з деревини хвойних порід, рапсу, пелет з пташиного посліду та соломи і донних мулів створюються умови інтенсивного перемішування палива і окислювача. В перерізі пальника відсутні значення, що відповідають наявності палива. Це опосередковано свідчить про високу швидкість згорання палива, що свідчить про підвищену добову витрату такого виду палива під час експлуатації котла.

Екологічні характеристики спалювання мішаної деревини різних порід, пелет з деревини хвойних порід, рапсу, пелет з пташиного посліду та соломи, пелет з донних мулів і пелет з деревини твердих сортів представлені візуалізацією генерації CO (рис. 4) та NO_x (рис. 6).

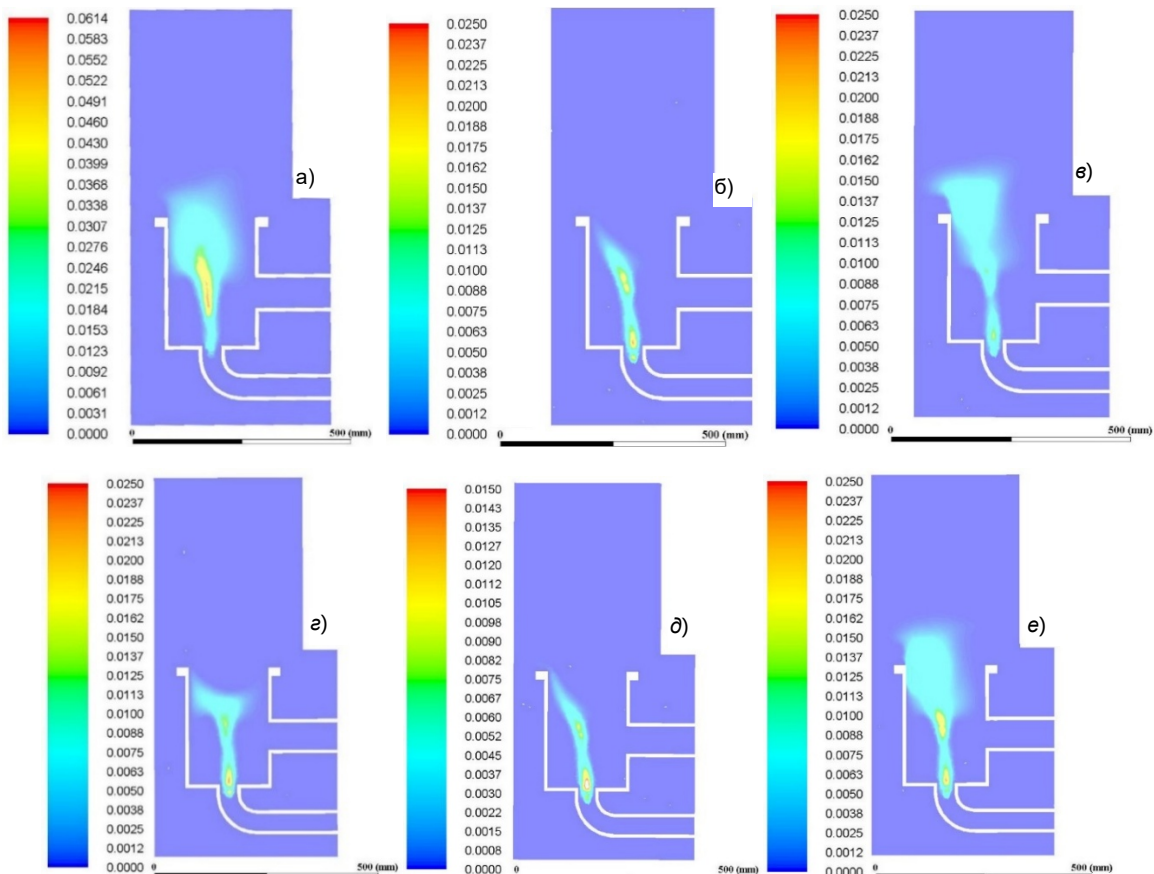


Рис. 4. Розподіл CO (мг/м³) в поперечному перерізі прототипу котла CET-25 під час спалювання: *а* — мішаної деревини різних порід; *б* — пелет з деревини хвойних порід; *в* — рапсових пелет, *г* — пелет з пташиного посліду та соломи; *д* — пелети з донних мулів; *е* — пелет з твердих сортів деревини

Аналіз результатів CFD-моделювання свідчить, що концентрація забруднювальної речовини CO максимальна в об'ємі пальника, а в паливні і конвективній шахті котла створюються умови її догорання. До того ж, в димар ця домішка майже не потрапляє.

Найбільші значення концентрації CO спостерігаються у випадку спалювання мішаної деревини різних порід, що опосередковано свідчить про вищу температуру в паливній котла внаслідок збільшення теплового ефекту через догорання CO.

Для порівняльного аналізу визначено осереднену в об'ємі (Volume Average) концентрацію CO за допомогою процедури осереднення в об'ємі засобами ANSYS-Fluent:

$$\overline{CO} = \frac{1}{V} \int [molar\ concentration\ CO \times molar\ mass\ CO], \quad (1)$$

де V — об'єм чарунки m^3 ; $[molar\ concentration\ CO]$ — значення молярної концентрації $[кмоль/м^3]$, що визначені засобами ANSYS-Fluent в центрі кожної чарунки; $[molar\ mass\ CO]$ — значення молярної маси CO $[мг/кмоль]$.

Розраховані осереднені в об'ємі значення концентрації, показані на діаграмі (рис. 5) підтверджують попередні висновки.

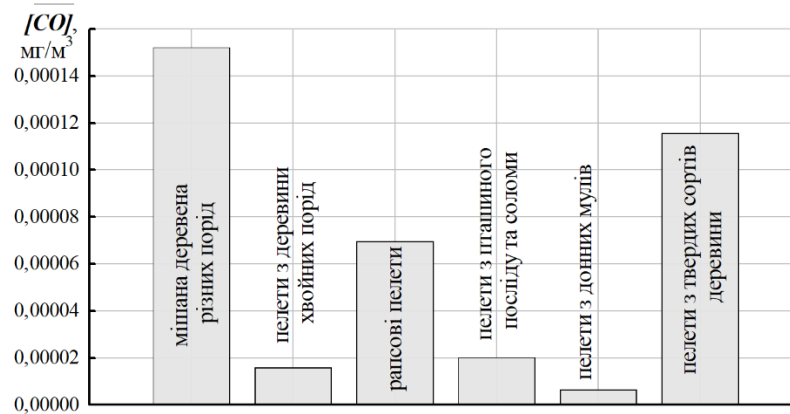


Рис. 5. Діаграма залежності об'ємної концентрації CO (мг/м³) від типу спалюваних пелет

Оцінка можливості спалювання пелет з метою контролю емісії оксидів азоту, а також впровадження заходів щодо його зниження, викликаних значним негативним впливом NO_x на навколишнє середовище, має містити дані щодо генерації цих забруднювальних частинок.

На рис. 6 і 7 подано розподіл NO_x в поздовжньому та поперечному перерізі прототипу котла CET-25 з метою оцінювання тривимірного характеру генерації цих частинок.

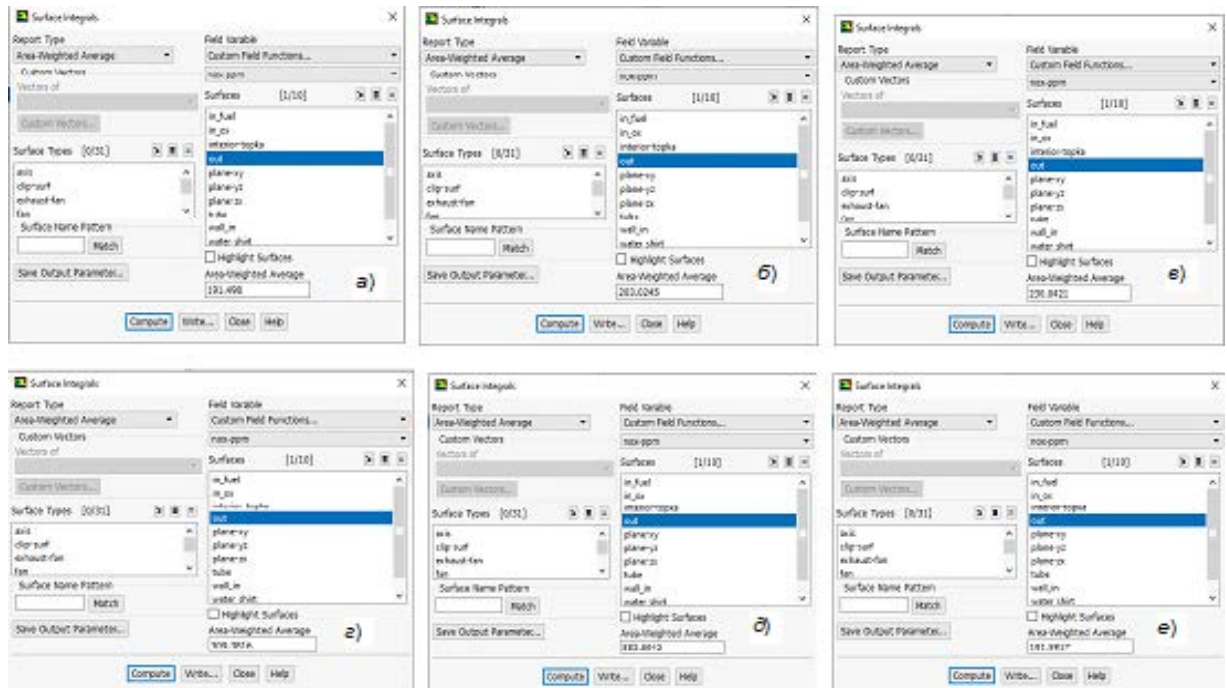


Рис. 6. Значення осереднених за площею димаря NO_x в [ppm]: а — мішаної деревини різних порід; б — пелет з деревини хвойних порід; в — рапсових пелет, г — пелет з пташиного посліду та солом; д — пелети з донних мулів; е — пелет з твердих сортів деревини

Як одиниця вимірювання вибрана загальноприйнята одиниця у вигляді кількості частин на мільйон (промиле) — NO_x [ppm]. Одиниця вимірювання [ppm] — це незалежний від температури та тиску параметр, який використовується у разі вимірювань низьких концентрацій. NO_x [ppm] в цьому дослідженні обчислювалось за допомогою такого рівняння:

$$\text{NO}_x \text{ ppm} = \frac{\text{NO mole fraction} \cdot 10^6}{11 - \text{H}_2\text{O mole fraction}}, \quad (2)$$

Осереднені за площею значення NO_x в [ppm] подані на рис. 6 і на діаграмі (рис. 8).

Розподіли мольної концентрації (mole fraction) окислів азоту і водяної пари, що входять в залежність (2) обчислювались засобами ANSYS-Fluent.

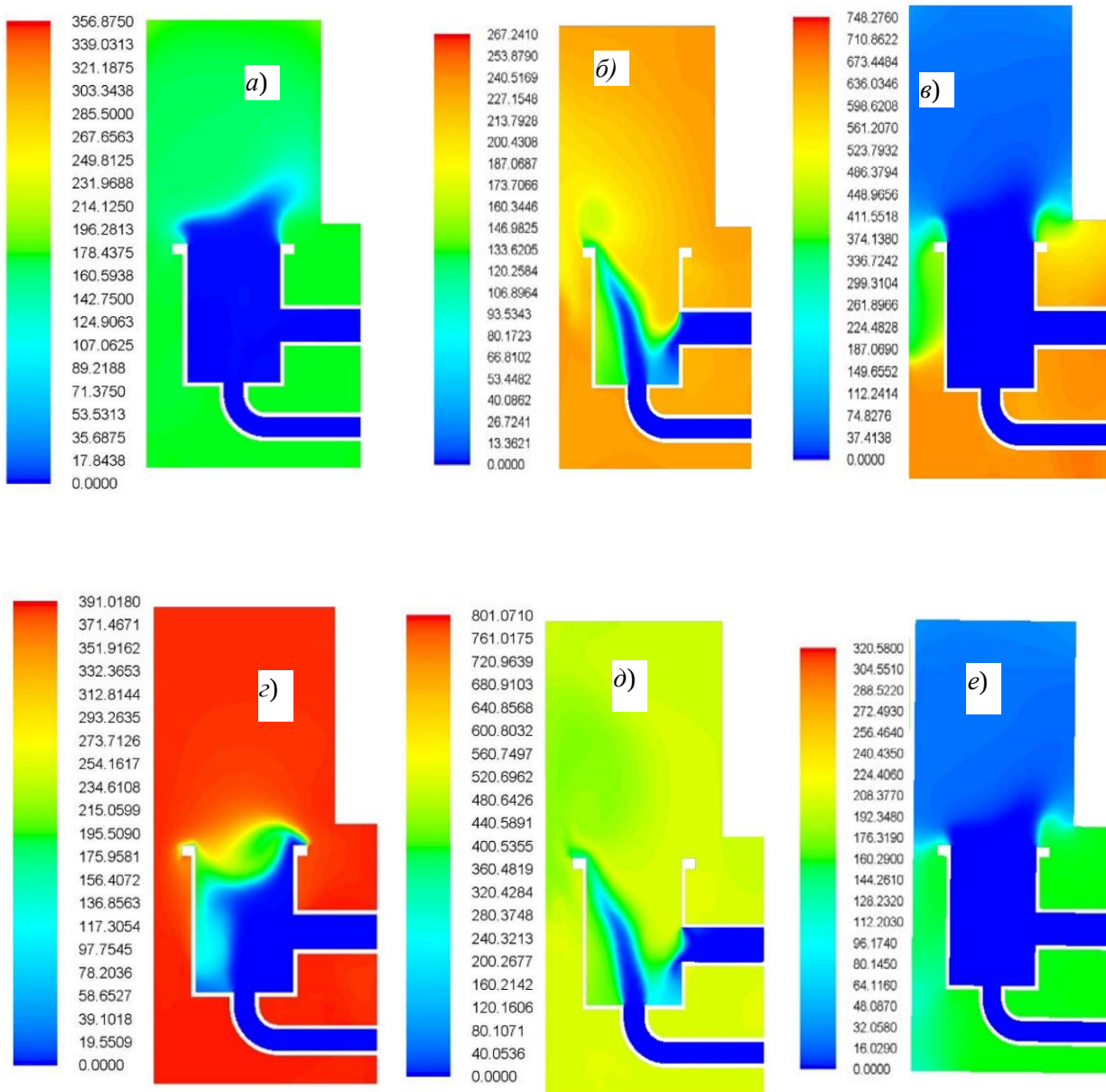


Рис. 7. Розподіл NO_x (ppm) в поперечному перерізі прототипу котла CET-25 під час спалювання: *a* — мішаної деревини різних порід; *б* — пелет з деревини хвойних порід; *в* — рапсових пелет, *г* — пелет з пташиного посліду та соломи; *д* — пелети з донних мулів; *е* — пелет з твердих сортів деревини

Отже, найвищі значення емісії NO_x , що здатні викликати утворення тропосферного озону, та сприяти негативному впливу на здоров'я людини у глобальному масштабі [13] виникають під час спалювання пелет з донних мулів, а найнижчі — під час спалювання пелет з твердих сортів деревини.

Для перспективи подальших досліджень отримані розрахункові дані варто порівняти з експериментальними даними.

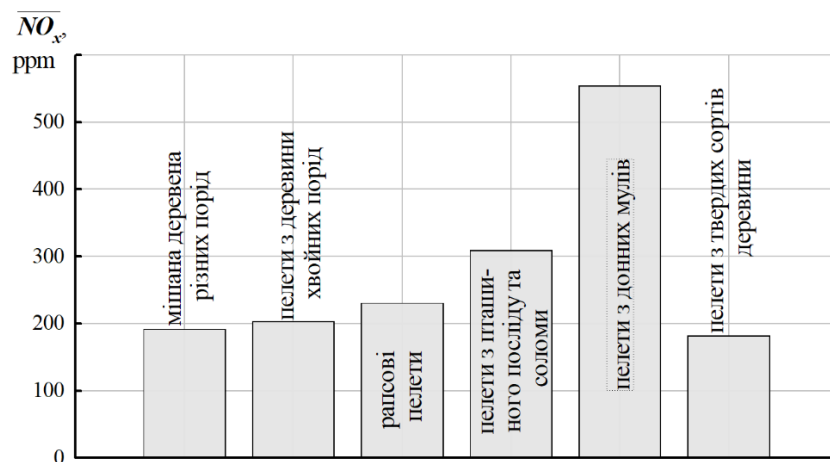


Рис. 8. Діаграма осереднених за площею димаря значень NO_x [ppm] в залежності від типу спалюваних пелет

Висновки

В загальному можна констатувати, що комп'ютерне моделювання дозволяє проводити попереднє, досить точне оцінювання емісійних характеристик енергетичного устаткування в процесі спалювання твердого палива. Основні висновки такі:

- під час спалювання пелет з деревини хвойних порід, рапсу, пелет з пташиного посліду та союми і донних мулів створюються умови щодо підвищення добової витрати такого виду палива під час експлуатації котла;
- концентрація забруднювальної речовини CO максимальна в об'ємі пальника, а в паливні і конвективній шахті котла створюються умови її догорання. При цьому, в димар ця домішка майже не потрапляє;
- найбільші значення концентрації CO (до 0,05 мг/м³) спостерігаються у випадку спалювання мішаної деревини різних порід, що опосередковано свідчить про вищу температуру в паливні котла внаслідок збільшення теплового ефекту завдяки догоранню CO.
- процес спалювання пелет в спрощеному прототипі котла СЕТ-25 організовано таким чином, що згенеровані окисли вуглецю (CO) «догорають» в пальнику і паливні, тому в конвективну шахту не потрапляють;
- найбільшим є рівень емісії NO_x , який спостерігається на вході в димар котла під час спалювання пелет з донних мулів (550 ppm), а найменшим (180 ppm) — під час спалювання пелет з твердих сортів деревини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] 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 р.
- [2] А. Ю. Рачинський, і О. В. Баранюк, «CFD-моделювання прийнятності застосування поширених на ринку України пелет, як палива для пелетного котла з пальником ретордного типу,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 3, с. 47-55, 2025. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-180-3-47-55> .
- [3] Георгій Гелетуша, Володимир Крамар, Олексій Епик, Тарас Антошук, і Василь Тітков, *Комплексний аналіз українського ринку пелет з біомаси*. ТОВ «Науково-технічний центр «Біомаса», 2016, 334 с.
- [4] *Паливні пелети. Характеристики і види*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://galmet.com.ua/yak-tse-pratsyuve/palyvni-pelety-harakterystyky-ta-vydy.html> . Дата звернення 13.03.2025 р.
- [5] *Krona Impulse. Тверде біопаливо і екологія*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.kronaimpuls.com.ua/tverde-biopalivo-i-ekologiya/>. Дата звернення 10.04.2025 р.
- [6] *Все про пелети*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://liberator.com.ua/ua/vse-pro-peleti/>. Дата звернення 16.01.2022 р.
- [7] О. М. Лисенко, Г. М. Веремійчук, і О. А. Сірий, «Дослідження спалювання пелет сільськогосподарського походження у котлах потужністю до 25 кВт,» *Теплофізика та теплоенергетика*, т. 44, № 3, 2022. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2022.11> .

[8] О. Г. Левицька, і О. В. Січевий, «Порівняльний аналіз викидів шкідливих речовин при застосуванні альтернативних природному газу біопалив», *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. т. 20, 2019. <https://doi.org/10.32447/20784643.20.2019.13>.

[9] *Екологічні аспекти використання деревних паливних ресурсів*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://bio.ukr.bio/ua/articles/3589/>. Дата звернення 10.04.2025 р.

[10] E. D. Vicente, et al., “Emissions from residential pellet combustion of an invasive acacia species,” *Renewable Energy*, vol. 140, pp. 319-329, September 2019 <https://doi.org/10.1016/j.renene>.

[11] Lu Zhang, et al., “Pollutant Emissions and Oxidative Potentials of Particles from the Indoor Burning of Biomass Pellets Environ,” *Sci Technol.*, vol. 58 (36). pp. 16016-16027, 2024. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c03967>.

[12] *ANSYS FLUENT 14.5. Theory Guide*, Canonsburg, PA, USA: ANSYS Inc., USA, pp. 789, 2012.

[13] S. M. Correa. “A Review of NO_x Formation under Gas Turbine Combustion conditions,” *Combustion Science and Technology*. Pittsburgh, USA, vol., p. 329, 1992.

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

Pollutant Emissions from the Combustion of Pellets Common on the Ukrainian Market as Fuel for a Pellet Boiler with a Retord-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

The presented work was carried out with the aim of assessing the energy and environmental characteristics of fuel pellets available in Ukraine, which are used as a fuel in a domestic hot water boiler SET with a capacity of 25 kW. 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.

Solid fuel combustion modeling was performed using finite element CFD models of the boiler unit with subsequent determination of the ecological and energy characteristics of the boiler operation in the ANSYS Student software package, which is absolutely free (since 2015) and is intended for solving introductory and educational tasks in an academic environment.

The results of CFD modeling were verified on a computer model of the prototype boiler «SET-25» according to the passport data presented by its developer. The verification was performed for the case of burning pellets from hardwood. It was shown that the discrepancy of the results does not exceed 2 %, therefore the developed model can be used to model the burning of other common types of pellets — from coniferous wood, rapeseed, from bird droppings and straw, as well as from bottom sludge. The results of the thermal and environmental characteristics of the water heating boiler operation were obtained, which can be useful in the design of new water heating boiler designs and the verification calculation of existing ones. The level of formation of harmful substances during the combustion of different types of fuel pellets in the boiler was determined. It was established that the highest level of NO_x emission is when burning pellets from bottom sludge (550 ppm), and the lowest (180 ppm) is when burning pellets from hardwood. It has been shown that when using different types of fuel pellets in a boiler, the boiler's operating parameters are met, provided that the daily fuel consumption is increased compared to the use of the base fuel — pellets made from hardwood.

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