

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.64>

УДК 536.24:536.423

CFD-моделювання генерації забруднюючих речовин при спалюванні пелет, поширених на ринку України, в котлі типу CET-АП 25

Рачинський Артур Юрійович¹⁾

Канд. техніч. наук, доцент каф. Теплової та Альтернативної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-1517>; 57190884322; arturachinskiy@gmail.com. Scopus Author ID

Черноусенко Ольга Юріївна¹⁾

Д-р техніч. наук, професор, завідувач каф. Теплової та Альтернативної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>; chernousenko20a@gmail.com. Scopus Author ID: 57222080457

Баранюк Олександр Володимирович^{1,2)}

Канд. техніч. наук, доцент каф. Теплової та Альтернативної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-1403>; olexandr.baranyuk@gmail.com. Scopus Author ID: 57201024575

¹⁾ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
пр. Берестейський, 37. Київ, 03056, Україна

²⁾ Інститут теплоенергетичних технологій Національної академії наук України вул. Андріївська, 19,
Київ, 04070, Україна

АНОТАЦІЯ

Представлена робота присвячена аналізу енергетичних та екологічних характеристик паливних пелет, доступних на ринку України, при їх спалюванні у побутовому водогрійному котлі типу CET потужністю 25 кВт. Котли цієї серії призначені для теплопостачання житлових будинків, об'єктів комунально-побутового та промислового призначення, обладнаних системами опалення з природною або примусовою циркуляцією води як теплоносія. Ескізи кресленики та частина теплогідрравлічних характеристик котлів CET знаходяться у відкритому доступі. Моделювання процесів спалювання твердого біопалива здійснювалося з використанням скінченно-елементного підходу в середовищі програмного комплексу ANSYS Student. Цей програмний продукт, що з 2015 року безкоштовно доступний для академічного використання, широко застосовується для вирішення ознайомлювальних і навчальних задач у технічних вищих навчальних закладах. З метою підтвердження достовірності моделі була проведена верифікація результатів CFD-моделювання на основі паспортних даних прототипу котла «CET-25» для випадку спалювання пелет з твердих листяних порід деревини. Результати показали, що розбіжність між паспортними характеристиками і результатами числового моделювання не перевищує 2%. Це свідчить про коректність побудованої моделі та дозволяє використовувати її для моделювання спалювання інших типів біопалива: пелет з хвойних порід деревини, рапсу, пташиного посліду, соломи, а також донних мулів. Отримані дані дозволили оцінити теплотехнічні та екологічні характеристики роботи котла при використанні зазначених типів пелет. Ці результати можуть бути корисними як для проектування нових конструкцій водогрійних котлів, так і для вдосконалення існуючих моделей шляхом повіркових розрахунків. У ході дослідження було встановлено рівні емісії шкідливих речовин, зокрема оксидів азоту (NO_x), під час спалювання різних типів пелет. Найвищий рівень емісії NO_x (до 550 ppm) спостерігався при використанні пелет із донних мулів, тоді як найнижчий (близько 180 ppm) – при спалюванні пелет з твердих сортів деревини. Показано, що незалежно від типу використаного біопалива, котел здатен забезпечити необхідні режимні параметри роботи. Однак для пелет з нижньою теплотворною здатністю потребується збільшення добової витрати палива у порівнянні з базовим варіантом – пелетами з деревини твердих порід.

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

Актуальність. Останнім часом як альтернативне паливо все ширше застосовуються відходи деревообробної промисловості та сільського господарства, спресовані у вигляді гранул – пелет. На ринку України представлені два основні типи пелет: так звані «білі» пелети, виготовлені з деревини твердих порід, та «сірі» пелети – із хвойної деревини, рапсу, соломи, а також із пташиного посліду. Всі ці види палива пресуються у гранули для можливості автоматичної подачі в пальник. Зазначені пелети істотно відрізняються між собою за хімічним складом, теплотворною здатністю та ціною. Постає актуальне питання: якими саме пелетами доцільно користуватись для опалення побутових будинків?

На сьогоднішній день основним нормативним документом, що регламентує якість пелет, є стандарт ENplus [1]. Він встановлює вимоги до фізико-хімічних властивостей пелет і визначає сфери їх застосування (побутовий сектор, котельні, теплові станції). Особливо жорсткі вимоги висуваються до пелет, які використовуються в побутовому секторі, де, як

This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

правило, відсутнє високотехнологічне обладнання для очищення димових газів. Згідно з вимогами стандарту ENplus-A1, що стосується саме пелет для побутового використання, головним критерієм якості є зольність: вона не повинна перевищувати 0,5% для пелет з хвойних порід та 0,7 % – для листяної деревини. Перераховані вище види пелет відповідають цим критеріям. Виробники котельного обладнання можуть контролювати кількість забруднюючих речовин лише у димових газах. Натомість, щоб оцінити генерацію шкідливих викидів безпосередньо в пальнику, топковій камері чи конвективній частині котла, необхідно використовувати числове моделювання.

У країнах Європи тверде біопаливо на основі рослинної, переважно деревної, біомаси щороку дедалі активніше витісняє викопні види палива з ринку теплової енергії. Таким чином реалізуються заходи щодо зменшення викидів парникових газів та пилу в атмосферу [2]. За співвідношенням вартості та зручності експлуатації опалення пелетами конкурує лише з природним газом – за умови, що будинок вже під'єднаний до централізованого газопроводу. При цьому вартість підключення до газової мережі та оформлення відповідної документації значно перевищує витрати на встановлення твердопаливного пелетного котла [3].

На сучасному етапі розвитку енергетики пелети виступають одним із головних джерел теплової енергії в Європі. Вони являють собою гранули з відходів деревообробної та сільськогосподарської продукції. Сьогодні пелети є особливо популярними в країнах ЄС, зокрема в Данії, Швеції та Австрії – світових лідерах з виробництва обладнання для їх спалювання. Вони характеризуються високою екологічністю, мають теплотворну здатність, порівнянну з вугіллям, прийнятну ціну, а також придатні як для побутового, так і для промислового використання [3]. Обсяги споживання пелет у приватному, муніципальному та промисловому секторах постійно зростають [2]. Це зумовлено їхньою екологічною чистотою: під час спалювання пелет в атмосферу викидається приблизно стільки ж CO_2 , скільки утворюється при природному розкладанні деревини. Пелети мають стабільно високу якість, безпечні у використанні, мають постійну насипну щільність, що полегшує їх транспортування. Найважливішою перевагою є можливість автоматизованого управління процесом горіння. Отже, пелети (паливні гранули) – це єдиний вид твердого палива, який за своїми експлуатаційними та екологічними характеристиками справді може стати повноцінною альтернативою природному газу в побутовому секторі [2].

На сьогоднішній день все більше людей підтримують думку, що перехід на тверде біопаливо є ефективним способом поліпшення екологічної ситуації на планеті. Дійсно, його застосування суттєво знижує рівень викидів вуглекислого газу, що сприяє боротьбі зі змінами клімату.

Суттєвою перевагою є те, що для виробництва біопалива немає потреби вирубувати ліси. Воно виготовляється переважно з відходів деревообробної, харчової та сільськогосподарської промисловості. Це дозволяє вирішити ще одну важливу проблему — утилізацію органічних відходів, яка тривалий час залишалася відкритою.

Яскравим прикладом є лушпиння соняшника – побічний продукт олійноекстракційних підприємств. За малої маси воно займає великі об'єми, легко запалюється, виділяє неприємний запах, а при гнитті – вивільняє значну кількість вуглекислого та інших газів, що негативно впливає на навколишнє середовище. Наразі ці відходи активно використовуються для виробництва пелет і брикетів, які мають високу теплотворну здатність. При їх спалюванні не утворюються небезпечні для здоров'я речовини, а кількість викидів CO_2 значно менша, ніж у разі природного гниття сировини.

Отже, можна впевнено стверджувати, що використання твердого біопалива є екологічно безпечним і водночас економічно вигідним рішенням [4].

Як показують результати експериментальних досліджень [5], поєднання твердопаливного котла з пальником малої потужності (до 25 кВт) дозволяє ефективно спалювати широкий спектр пелет рослинного походження. Особливу увагу необхідно приділяти дослідженню режимних карт спалювання, які враховують повноту згоряння, рівень викидів шкідливих

речовин (зокрема оксидів азоту – NO_x), характеристику зольного залишку та температуру теплоносія. Як показано в дослідженні, впродовж 12 годин безперервної роботи котла рівень NO_x не перевищував 100 ppm, що свідчить про високий екологічний потенціал такої системи.

Метою дослідження є оцінка рівня генерації забруднюючих речовин у вигляді NO_x і CO після використання як палива поширених на ринку України пелет шляхом аналізу теплогідравлічних характеристик прототипу пелетного водогрійного котла типу «СЕТ-АП» потужністю 25 Вт [6]. Дослідження проводилось 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 [7] і так звані «білі» пелети з деревини твердих сортів, для яких є паспортні дані щодо режимних характеристик котла.

Для досягнення поставленої мети постановка задачі в загальному випадку містить геометричну модель котла прототипа, створеної на її основі скінчено-елементної моделі з граничними умовами і математичним описом розрахункового процесу, який реалізовано засобами ANSYS-Fluent [8]. Як прототип вибрано автоматичний пелетний котел СЕТ 25 АП [6], для якого в 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.

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-рідина.

Область між «примезовими шарами» апроксимується нерівномірною (зі згущенням до зовнішніх меж примезових шарів) неструктурованою розрахунковою сіткою, відстань між вузлами якої регулювалась параметром *Relevance Fine*, який визначає характеристику щільності сітки й 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.

Моделювання спалювання твердого палива [7] виконувалось за допомогою скінчено-елементних CFD-моделей котельного агрегату в середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent.

Математична модель процесу, що досліджується містить рівняння нерозривності, осереднені за Рейнольдсом 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 підхід Буссінеска, який є найбільш поширеним при числовому моделюванні. Для замикання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса використовувалась *Realizable k- ϵ* модель турбулентності. Використання в розробленій CFD-моделі обрано тому, що вона розроблена для потоків, що містять струмені (вприск нагрітого повітря крізь прошарок палива), примезові 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 примезовому шарі використані нерівноважні пристінні функції. Сильними сторонами яких є те, що вони призначені враховувати чутливість логарифмічного закону, який постулює розподіл швидкості потоку в примезовому шарі, до градієнта тиску. Тим самим вони краще прогнозують виникнення від'ємного градієнту тиску і появу зворотних течій чим стандартні пристінні функції.

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 файл містить інформацію про залежність змісту компонентів і температур від фракційного складу суміші і використовується ANSYS-Fluent для набуття цих значень в процесі рішення.

Для підтвердження достовірності розрахункової моделі виконано порівняння результатів моделювання з паспортними даними характеристик котла «СЕТ-25» при спалюванні пелет з твердих порід деревини. Згідно характеристик котла [6] 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.

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. 1) та NO_x (рис. 2).

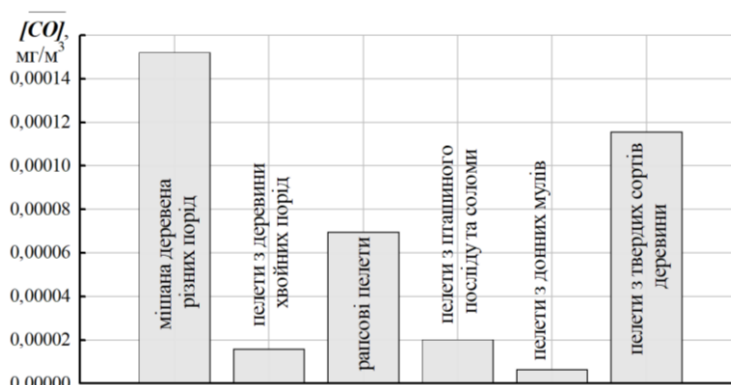


Рис. 1. Діаграма залежності об'ємної концентрації CO (мг/м³) від типу пелет, що спалюються

Аналіз результатів CFD-моделювання свідчить, що концентрація забруднюючої речовини CO максимальна в об'ємі пальника, а в паливні і конвективній шахті котла створюються умови її догорання. При чому, 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 паливні котла внаслідок збільшення теплового ефекту внаслідок догорання CO.

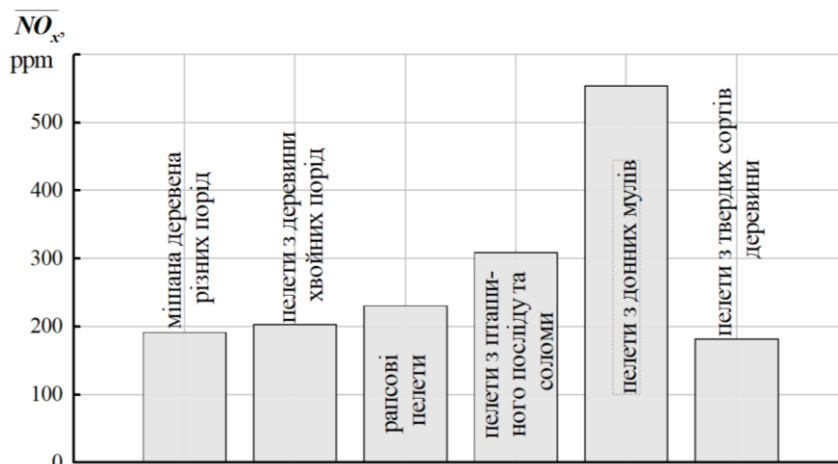


Рис. 2. Діаграма осереднених по площі димаря значень NO_x в [ppm] в залежності від типу пелет, що спалюються

Рис. 2 свідчить, що найбільшим рівень емісії NO_x , який спостерігається на вході в димар котла при спалюванні пелет з донних мулів (550 ppm), а найменший (180 ppm) – при спалюванні пелет з твердих сортів деревини. Відомо, що окисли азоту здатні викликати утворення тропосферного озону, та сприяти негативному впливу на здоров'я людини у глобальному масштабі [9] виникають при спалюванні пелет з донних мулів, а найнищі – при спалюванні пелет з твердих сортів деревини.

В якості перспективи подальших досліджень, отримані розрахункові дані слід порівняти з експериментальними.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. «Про види твердопаливних котлів». – URL: <https://altep.ua/articles/pro-vikidi> (дата звернення 16.01.2022).
2. «Паливні пелети. Характеристики і види». – URL: <https://galmet.com.ua/yak-tse-pratsyuye/palyvni-pelety-harakterystyky-ta-vydy.html> (дата звернення 13.03.2025).
3. «Все про пелети». – URL: <http://liberator.com.ua/ua/vse-pro-peleti/> (дата звернення 16.01.2022).
4. Krona Impulse. «Тверде біопаливо і екологія». – URL: <https://www.kronaimpuls.com.ua/tverde-biopaliwo-i-ekologiya> (дата звернення 10.04.2025).
5. Лисенко О. М., Веремійчук Г. М., Сірий О. А. «Дослідження спалювання пелет сільськогосподарського походження у котлах потужністю до 25 кВт». *Теплофізика та теплоенергетика*. 2022; 44 (3). DOI: <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2022.11>.
6. «Автоматичний пелетний котел CET 25 АП, 25 кВт». – URL: <https://teplo-mag.com.ua/p1166584039-avtomaticheskij-pelletnyj-kotel.html> (дата звернення 13.03.2025).
7. N. Striugas, B. Soroka, K. Zakarauskas, N. Vorobyov. “Thermodynamic analysis and experimental tests of wood waste gasification and combustion plants”. *11-th International Research and Practical Conference Coal Heat Power Industry: Rehabilitation and Development Problems*. Kyiv: Ukraine. 2015. p. 16–20.
8. “ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide”. ANSYS Inc. USA: New-York, 2012.
9. Correa S. M. “A review of NO_x formation under gas turbine combustion” *Combustion Science and Technology*. Pittsburgh, USA. 1992; 87: 329.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.64>

UDC 536.24:536.423

CFD modeling of pollutant generation during the combustion of pellets, common on the Ukrainian market, in a SET-AP 25 boiler

Arthur Yu. Rachynskyi¹⁾

PhD, Associate Professor of the Department of Heat and Alternative Power Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6622-1517>; arturrachinskiy@gmail.com

Olga Yu. Chernousenko¹⁾

Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Heat and Alternative Power Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1427-8068>; chernousenko20a@gmail.com

Oleksandr V. Baraniuk^{1,2)}

PhD, Associate Professor of the Department of Heat and Alternative Power Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0610-1403>; olexandr.baranyuk@gmail.com

¹⁾ National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
37, Beresteyskyi Ave. Kyiv, 03056 Ukraine

²⁾ Institute of Thermal Energy Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine
19, Andriivska Str. Kyiv, 04070, Ukraine

ABSTRACT

The presented work is devoted to the analysis of energy and environmental characteristics of fuel pellets available on the Ukrainian market when they are burned in a domestic hot water boiler of the SET type with a capacity of 25 kW. Boilers of this series are intended for heat supply of residential buildings, municipal and industrial facilities equipped with heating systems with natural or forced circulation of water as a coolant. Sketch drawings and part of the thermal hydraulic characteristics of SET boilers are in the public domain. Modeling of solid biofuel combustion processes was carried out using the finite element approach in the ANSYS Student software package. This software product, which has been available for academic use free of charge since 2015, is widely used to solve introductory and educational tasks in technical higher educational institutions. In order to confirm the reliability of the model, verification of CFD modeling results was carried out based on the passport data of the boiler prototype "SET-25" for the case of burning pellets from hardwood. The results showed that the discrepancy between the passport characteristics and the results of numerical modeling does not exceed 2%. This indicates the correctness of the constructed model and allows it to be used to simulate the combustion of other types of biofuels: pellets from coniferous wood, rapeseed, bird droppings, straw, as well as bottom sludge. The data obtained allowed us to evaluate the thermal and environmental characteristics of the boiler when using the specified types of pellets. These results can be useful both for designing new designs of water-heating boilers and for improving existing models through calibration calculations. During the study, emission levels of harmful substances, in particular nitrogen oxides (NO_x), were established during the combustion of different types of pellets. The highest level of NO_x emission (up to 550 ppm) was observed when using pellets from bottom sludge, while the lowest (about 180 ppm) was observed when burning pellets from hardwood. It was shown that regardless of the type of biofuel used, the boiler is able to provide the necessary operating parameters. However, for pellets with a lower calorific value, an increase in the daily fuel consumption is required compared to the basic option - hardwood pellets.

Keywords: Hot water boiler; fuel pellets; CFD modeling; formation of harmful substances; radiant and convective heat transfer