

УДК 662.636

ДОСЛІДЖЕННЯ СПАЛЮВАННЯ ПЕЛЕТ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПОХОДЖЕННЯ У КОТЛАХ ПОТУЖНІСТЮ ДО 25 КВт

Лисенко О.М.¹, канд. техн. наук, Веремійчук Г.М.², аспірантка, Сірий О.А.³, канд. техн. наук

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, lisenko_oks@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3981-9796>

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, averemiichuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1893-3637>

³Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", просп. Перемоги 37, Київ, 03056, Україна, oasiryi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5811-9037>

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2022.11>

Робота присвячена дослідженню процесу спалювання пелет сільськогосподарського походження з метою покращення експлуатаційних та екологічних показників побутових котлів потужністю до 25 кВт. Наведено результати експериментальних досліджень спалювання пелет сільськогосподарського походження. На основі даних експерименту визначено характерні особливості температурних режимів в об'ємі котла та процесу горіння при спалюванні пелет.

The work is devoted to the study of the process of burning pellets of agricultural origin in order to improve the operational and environmental performance of domestic boilers up to 25 kW. The results of experimental studies of burning pellets of agricultural origin are presented. Based on the experimental data, the characteristic features of the temperature regimes in the boiler volume and the combustion process during pellet combustion were determined.

Бібл. 15, рис. 9.

Ключові слова: агропелети, спалювання, паливо, температура, побутовий котел.

Вступ. Значний обсяг паливних потреб Україна задовольняє за рахунок імпортованого природного газу. Частина його можна замінити, використовуючи біопаливо аграрного походження, що являє стратегічний ресурс України. Це важливо в умовах економічної кризи, необхідності імпортозаміщення і найсуворішої економії паливно-енергетичних ресурсів, особливо у воєнний час.

Біомаса, включаючи товарні відходи сільського господарства, займає важливу роль у досягненні цілі ЄС [1] щодо 32% відновлюваних джерел у загальному споживанні енергії до 2030 року. Згідно з [2] біомаса, у поєднанні з сонячною тепловою та вітровою енергією, має найбільший потенціал у енергетичних цілях ЄС до 2050 року (повне покриття енергетичних потреб для опалення та охолодження, скорочення викидів парникових газів на 80-95%).

У наш час біомаса в основному використовується для виробництва теплоти у великих або середніх по потужності котлах систем централізованого опалення та у побутових котлах на дровах/пелетах, у печах і у камінах. Спалювання біомаси в житлових приміщеннях

вважається одним з основних джерел забруднення атмосферного повітря. У зв'язку з цим особливе занепокоєння викликають викиди оксидів вуглецю, органічних газоподібних сполук та твердих часток [3, 4].

Окрім деревини біомаса також може бути взята зі сільського господарства (наприклад, для виробництва пелет) [5]. Наразі основними джерелами біомаси в Україні (якщо не брати до уваги деревину) є відходи і залишки сільського господарства (солома, стебла та стрижні кукурудзи, стебла та лушпиння соняшника), а також – у перспективі – енергетичні культури (верба, тополя, міскантус тощо), що спеціально вирощуються. Використання біомаси як палива при виробництві теплової енергії для забезпечення потреб в опаленні та гарячому водопостачанні дає значні економічні переваги, адже це дозволить зменшити витрати на опалення, а також скоротити викиди парникових газів на понад 8,0 млн. т CO₂-екв.

Успішна технічна реалізація процесу спалювання пелет пов'язана з вибором раціональних технічних рішень та режимних параметрів роботи відповідного обладнання. Тому вдосконалення технологій та устатку-

вання для спалювання біопалива аграрного походження є актуальною задачею, що обумовлена екологічним станом довкілля та необхідністю залучення в енергетику альтернативних та відновлювальних джерел енергії у зв'язку з вичерпністю та постійним зростанням цін на викопні енергоносії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [6, 7] наведено результати дослідження процесу горіння, проведених з деревними пелетами, які містять виноградні витиски та відходи томатів, котрі змішані з тирсою сосни. Результати випробувань показують, що ці пелети від товарних залишків сільськогосподарської продукції досягають ефективності згорання в котлах, порівняної з деревними пелетами, тоді як викиди газів татвердих частинок вищі і на них суттєво впливають робочі параметри. У [8] представлені викиди від спалювання 4-х видів пелет (з трави та деревної біомаси) у камері згорання, спеціально сконструйованій для спалювання високозольних пелет. Дослідження показали, що недеревна біомаса також може бути успішно спалена у відповідних камерах згорання з рівнем викидів, аналогічним, як для деревних пелет. У [9] досліджено взаємозв'язок між викидами NO_x та надлишком повітря. Кількість та розподіл подачі повітря показали помітний вплив на викиди NO_x . У [10] отримані дані для розгляду агропелет (у сумішах із сосною тирсою) як альтернативи класичним деревним пелетам шляхом дослідження викидів забруднюючих речовин у випробуваннях, проведених в [11].

Як показав проведений аналіз, при спалюванні агропелет досягаються рівні викидів забруднюючих речовин, що порівнянні із викидами для деревних пелет, лише якщо їх використовувати в сумішах із сосною тирсою або іншою деревною біомасою. Це узгоджується з дослідженням, проведеним в [12], де спостерігались вищі рівні викидів, коли використовувались пелети лише з агробіомаси (викиди CO приблизно в 12 разів і викиди NO_x у 3 рази вищі порівняно з деревними пелетами).

Спалювання біомаси вимагає спеціальної конструкції котлів. Основні вимоги стосуються теплової потужності котла; необхідності комплектації котельні надійним обладнанням для накопичення і подачі біомаси різної вологості; системою підготовки палива до спалювання; забезпеченості високоефективними системами очищення газових викидів від золи і дисперсних частинок до концентрацій, обумовлених проектом оцінки впливу на навколишнє середовище; можливості періодичного (бажано автоматизованого) очищення поверхонь нагрівання котлів від золи; розробки систе-

ми протидії утворенню скла та мінімізації ефектів скловання золи; забезпечення повноти згорання палива; забезпечення комплексу заходів із пожежної безпеки в котельні і в складі біопалива тощо [13].

Формулювання цілі. Враховуючи актуальність дослідження процесу спалювання біопалива в Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено та випробувано експериментальну установку твердопаливного котла з пелетним пальником для опалення експериментального будинку пасивного типу (м. Київ, вул. Булаховського, 2) [14, 15]. Основною метою даного дослідження є визначення основних закономірностей процесу горіння агропелет сільськогосподарського походження й дослідження впливу режимних параметрів на розподіл температур в топковій камері, а також дослідження продуктивних характеристик біопаливної сировини.

Опис методики проведення дослідження. У статті зосереджено увагу на таких видах пелет: деревні пелети, пелети з соломи ріпаку, пелети буякового жому.

Дослідження спалювання біопалива проводилися на експериментальній установці твердопаливного котла з пелетним пальником для опалення будинку пасивного типу (рис. 1, 2).

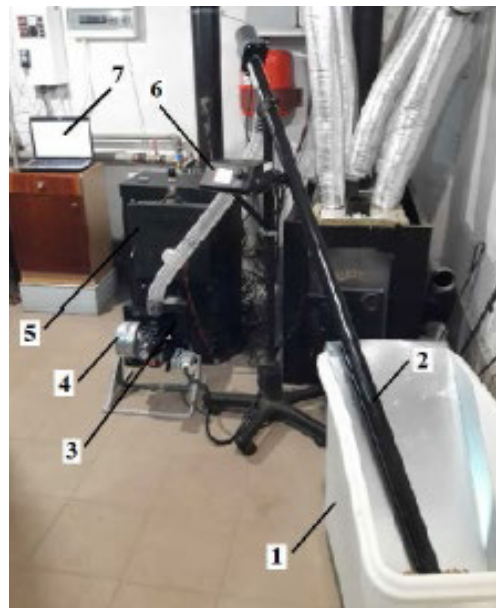


Рис. 1. Експериментальна установка пелетного пальника для спалювання рослинних пелет:
1 – бункер завантаження; 2 – зовнішній шнек транспортування біопалива; 3 – пелетний пальник;
4 – вентилятор; 5 – твердопаливний котел;
6 – блок керування котлом; 7 – блок вимірювання та архівування експериментальних даних

Розроблена експериментальна установка на основі твердопаливного котла типу Viadrus тепловою потужністю 25 кВт з оригінальним пелетним пальником дозволяє ґрунтовно досліджувати особливості спалювання різноманітних палив рослинного походження для опалення будинку.

Вимірювання температури здійснюється за допомогою гребінки ХА-термопар з відкритим спаєм, що розташовуються на різних відстанях від вихідного перетину пальника (рис. 3).

Похибка вимірювання температури становила не більше $\pm 0,5$ К. Під час усіх випробувань температура подачі води від котла стабілізується на рівні 65 ± 1 °С.



Рис. 2. Автоматичний пальник із рухомим скребком на поді

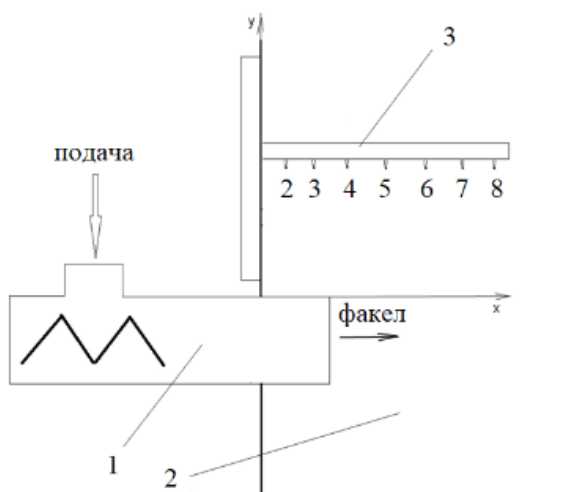


Рис. 3. Схема вимірювання температури:
1 – пелетний пальник; 2 – топковий простір котла; 3 – гребінка термопар, що розташована над факелом горіння

Залишки, зібрані після випробувань опалювальної установки, також аналізувалися, щоб визначити їх склад і вміст вуглецю (являє собою вміст незгорілого вуглецю в нижньому залишку).

Протягом кожного періоду випробування (для одного і того ж виду палива) швидкість подачі є постійною, що визначається тривалістю та частотою роботи шнекового конвеєра.

Вимірювання викидів. Після досягнення усталених режимів роботи концентрації CO , NO_x виражені на сухій основі вимірювались за допомогою газоаналізатора TESTO типу 330-1LL. Викиди NO_x при згорянні утворюються переважно у формі NO , вміст діоксиду азоту становить у середньому 5 %.

Опис досліджуваної паливоспалювальної установки. Опалювальна система закритого типу має в своєму складі котел Viadrus номінальною потужністю 25 кВт. Спалювання біомаси відбувається безпосередньо в топці котла, а теплота, що виділяється, передається теплоносію частково в самій топці, а частково – від продуктів згорання, які в топці завдяки своєму руху контактують з конвективними поверхнями теплообміну (конвективний теплообмінник) та поступово віддають теплоту теплоносію. В установці реалізовано комбіновану технологію спалювання, яка поєднує спалювання у шарі з псевдорозрідженням. Пальниковий пристрій являє собою автоматизований елемент пальникової системи з автоматичною подачею палива, регулюванням подачі окисника (повітря) та рухомих елементів – скребком на поді - для періодичного очищення від золи колосникової платформи.

Швидкість подачі палива встановлюється в ручному режимі, щоб отримати безперервну роботу з малою кількістю горючих елементів в залишку.

Важливим також є регулювання витрати повітря, що надходить до камери згорання ззовні, вентилятором з частотним регулюванням продуктивності. На початковій стадії камера згорання ще не розігріта до достатньої температури. Тому збільшена витрата повітря при розпалюванні, що надходить в камеру згорання, може суттєво уповільнити процес горіння. Подача повітря контролюється за допомогою вентилятора з регульованою частотою обертів насоса, встановленого всередині пальника. Котел має герметичну камеру згорання, і вважається, що фільтраційне проникнення повітря є незначним.

Витрата пелет, що надходять з бункера до камери згорання, регулюється електронним блоком управління твердопаливного котла. За його допомогою також можна налаштувати ряд параметрів роботи котла: потужність

роботи котла, максимальна і мінімальна продуктивність вентилятора, час роботи внутрішнього шнека у пальнику при підведенні пелет у високотемпературну зону, параметри очищення рухомим скребком поду пальника.

Варіації фізико-хімічних властивостей серед використовуваних пелет відносно великі. Встановлено, що механічна міцність і насипна маса нижчі за граничні значення. Це може спричинити проблеми з транспортуванням пелет та засмічення пальника. Останнє може викликати проблеми з керуванням пальником.

Вміст золи для агропелет коливався від 4,4 до 7,6%.

Результати експериментальних досліджень спалювання пелет. При спалюванні деревних пелет розпалювання відбулося протягом перших 300 с. Розпалювання палива реалізовано від спеціального запальника. Після розпалювання пелети починають горіти, а значення температури в об'ємі котла починає поступово зростати. Найбільший приріст температури відбувається біля фронтальної стінки котла, що протилежна до пальника. На момент часу 2550 с від початку експерименту максимальні значення температур сягають 680 °C (рис. 4, термопара №8).

З 2105 с до 2500 с експерименту відбувається стабільний процес горіння деревних пелет. Середня температура димових газів при цьому становить 260 °C. Протягом цього часу відбувалась автоматична періодична подача пелет з бункера за запрограмова-

ним алгоритмом. При цьому температура коливалась у таких межах:

- термопари № 4-8 – 400...590 °C;
- термопари № 2-3 – 350...450 °C.

Коливання температури відбуваються внаслідок періодичного вигорання порції біопалива в пальнику і надходження нової порції пелет з бункера. Гасіння пальника відбувається шляхом вибору пункту меню "Гасіння" в контролері. Як видно з графіка, починається поступове зниження температури в камері котла і димових газів. Після закінчення гасіння на дисплеї контролера з'являється відповідний символ.

Аналогічним чином, як і в попередньому експерименті зі спалюванням деревних пелет, отримано результати дослідження горіння агропелет із соломи ріпаку (рис. 5). В цьому випадку реалізується менший рівень температур (термопари №2-№6) у порівнянні з деревним паливом. Виміряні значення знаходяться у діапазоні 120...250 °C на усталеному режимі горіння (720-2000 с).

Одним з етапів експерименту було використання якості палива пелет з сухого бурякового жому. Як показали експерименти, вийти на усталений режим горіння досить проблематично, а процедура розпалу та згасання чередувалась з підвищеним діапазоном коливань температур у порівнянні з попередніми експериментами (рис. 6). Очевидно, що при налагодженні систе-

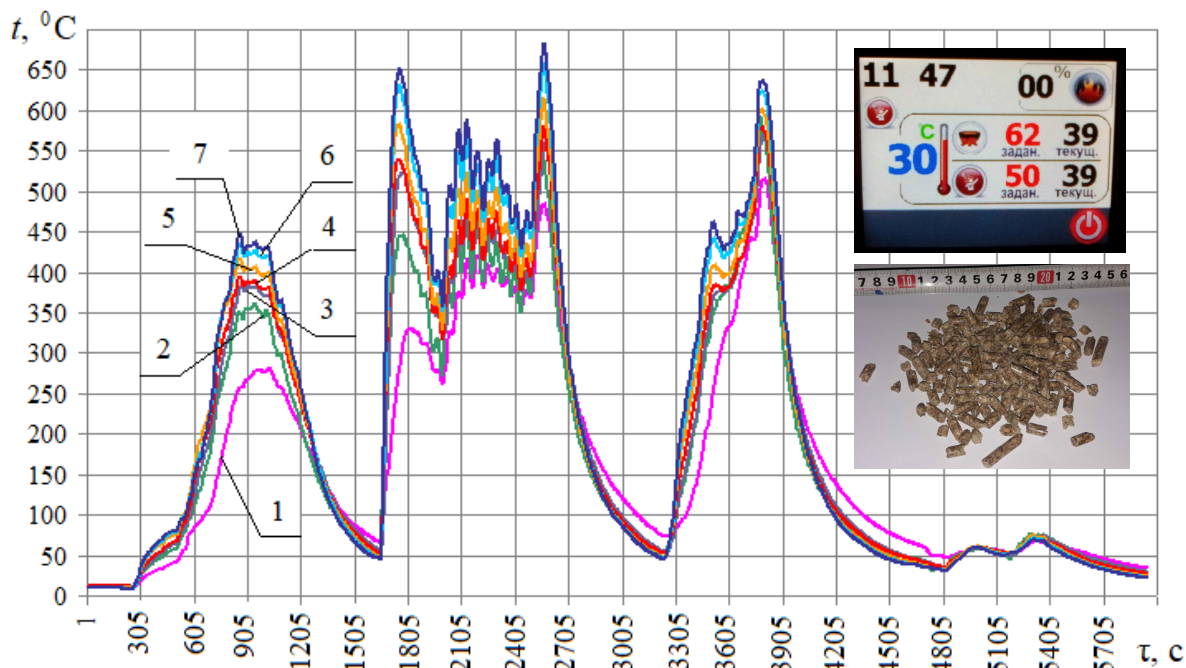


Рис. 4. Температура продуктів згорання у високотемпературній зоні топкової камери при спалюванні деревних пелет:

1-7 – значення температур, що вимірювались термопарами №2-№8 відповідно (див. рис. 3)

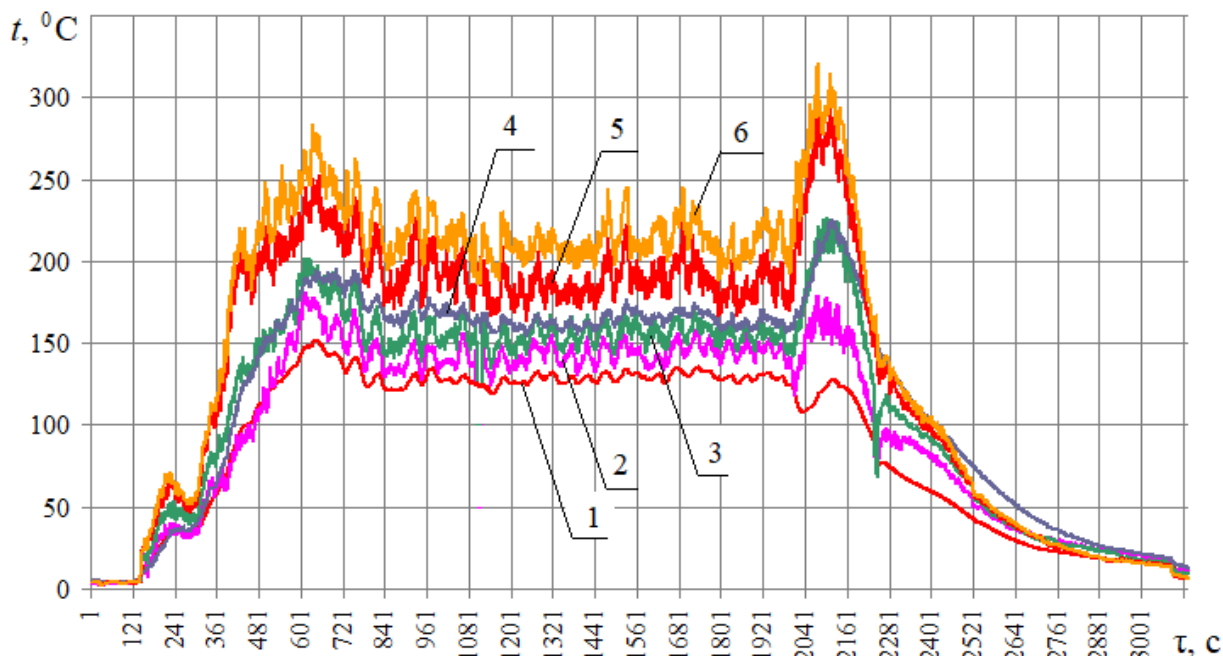


Рис. 5. Температура продуктів згоряння у високотемпературній зоні топкової камери при спалюванні ріпаку: 1 – температура димових газів;

2-6 – значення температур, що вимірювались термопарами №2-№6 відповідно (див. рис. 3)

ми паливоподачі і режимів роботи пальника потрібно враховувати теплофізичні характеристики палива, у першу чергу вологість та теплотворну здатність, а також вихід летючих горючих компонентів. У представленому вигляді досягти сталої роботи автоматизованої системи важко, одним з варіантів вирішення проблеми розглядається спалювання суміші пелетного палива.

На завершення кожного експерименту було сфотографовано залишки золи палива (рис. 7).

Виконання газового аналізу проводилося при спалюванні деревних пелет. Відбір продуктів спалювання виконувався у димоході відразу після котла. У результаті отримано концентрації NO_x та CO відповідної температури у місці забору проб. Зміна у часі концентрації цих речовин у димових газах відображена на рис. 8.

Значення концентрацій оксидів азоту слід вважати помірними, чого не можна стверджувати стосовно концентрації монооксиду вуглецю. Така картина характерна для процесу низькотемпературного горіння з наявністю значного хімічного недопалу. Отримано, що суттєва концентрація CO реалізується у перехідних фазах подачі палива, його розпалу та згасання. Максимуми концентрацій відповідають перехідним процесам між розпалом та процесом усталеного горіння. У цілому,

концентрації CO як основної складової хімічного недопалу мають завищений рівень і потребують подальшого корегування шляхом налагодження робочих режимів пальникової системи та, по можливості, впровадження додаткових конструктивних заходів.

Слід зазначити, що зменшення викидів CO через неповне згоряння може бути досягнуто шляхом подовження часу перебування продуктів спалювання (особливо в частинах з достатньо високою температурою $> 550^\circ\text{C}$), шляхом додаткової турбулізації потоку або шляхом досягнення вищих температур продуктів спалювання в окремих частинах водогрійного котла. Оскільки час перебування продуктів визначається швидкістю подачі палива і конструкцією топкової камери, на нього майже не можливо істотно вплинути. Одним з варіантів вирішення поставленої задачі можуть бути запропоновані заходи, які викликають локальне збільшення турбулентності потоку або підвищення температури димових газів. Як варіант, нескладна технічна модернізація топки із застосуванням турбулізатора горіння, розташованого на межі топкової камери і конвективної частини запропонована авторами [6] рис. 9. Рекомендоване місце розташування знаходиться в області досить високих температур, щоб потенційно підтримувати відносно інтенсивну швидкість горіння CO .

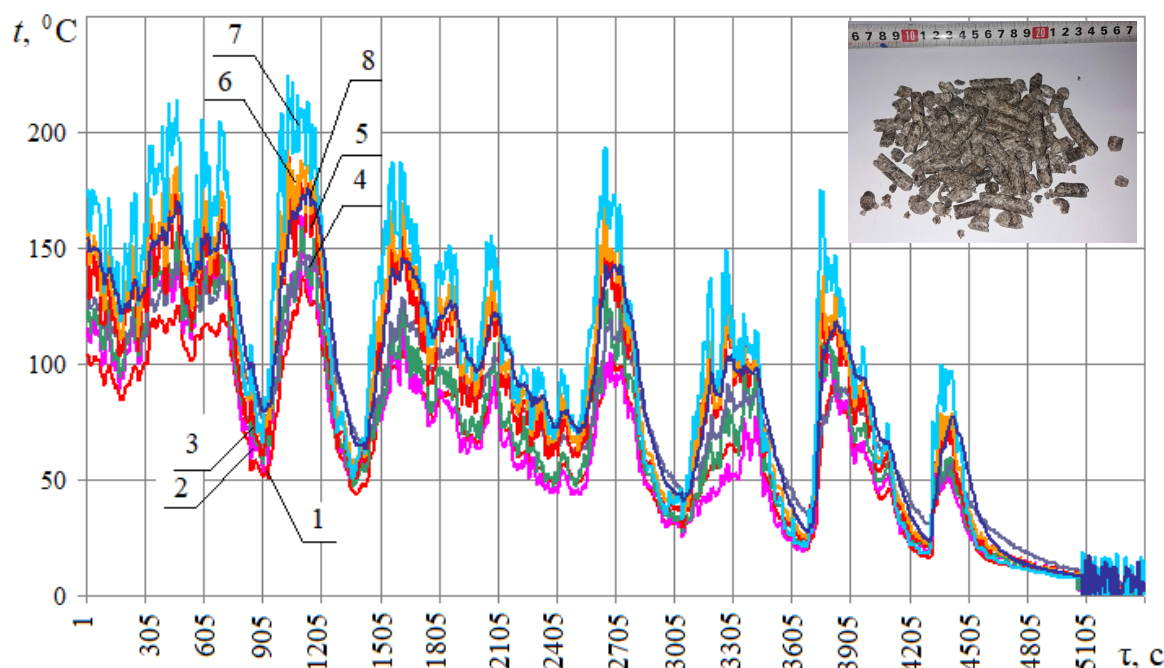
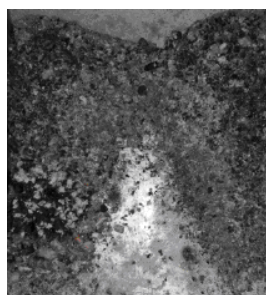


Рис. 6. Температура продуктів згоряння у високотемпературній зоні топкової камери при спалюванні пелет із бурякового жому: 1 – температура димових газів; 2-8 – значення температур, що вимірювались термopарами №2-№8 відповідно (див. рис. 3)



а)



б)



в)

Рис. 7. Золотий залишок при спалюванні:
а) пелет з деревного палива; б) пелет з соломн ріпаку; в) пелет із бурякового жому

Висновки. При поєднанні твердопаливного котла і запропонованого пальника (малої потужності – до 25 кВт) можна спалювати широкий асортимент пелет рослинного походження. Результати дослідження в подальшому можуть бути використані для підвищення ефективності процесу горіння при спалюванні біопалива та модернізації паливоспалюючих систем котлів малої потужності комунальної та промислової теплоенергетики, соціально-бюджетної сфери, індивідуально-побутового сектора та ін. Вкрай важливо дослідити і виявити оптимальні режимні карти спалювання в залежності від повноти спалювання, викидів шкідливих газів (NO_x), структури золи, температури теплоносія.

Необхідно комплексно дослідити склад та концентрації компонент відхідних газів, а також можливих режимів, при яких виникає конденсація парів води.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Directive 2018/2001/EC of 11 december 2018 on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sourc.
2. Andreu A., Calderoni M., Cremenescu C., Madani H., Pearson D., Rutz D., Schmitt B., Schmidt R., Skeiberg O., Urchueguia J., Van Helden W., Wilis M. 2050 vision for 100% renewable heating and cooling in Europe. RHC-Platform; 2019.

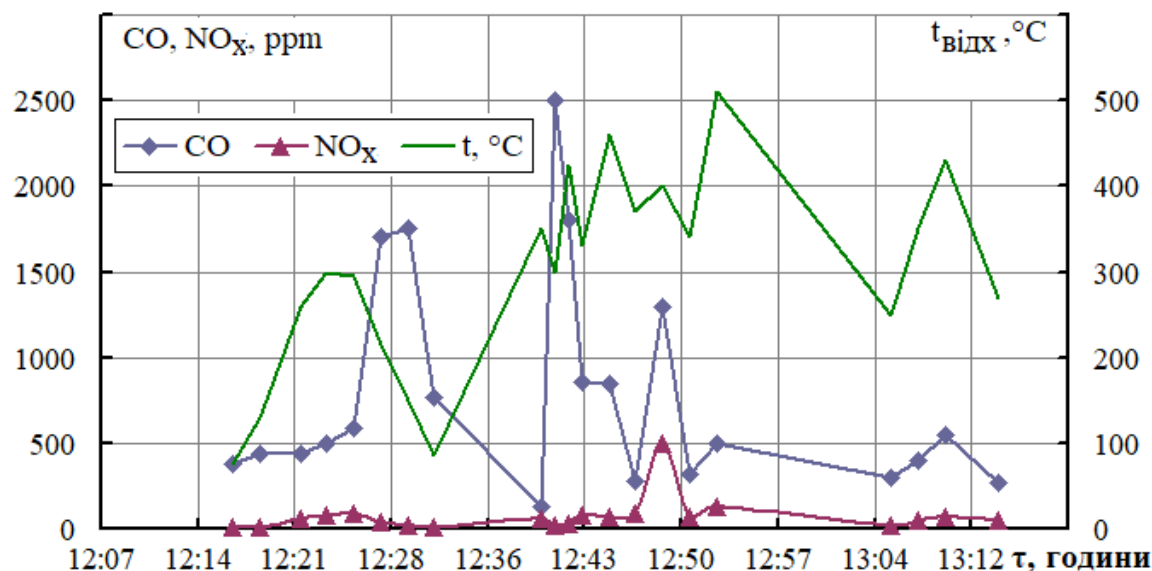


Рис. 8. Концентрації NO_x та CO у відхідних газах при спалюванні деревних пелет

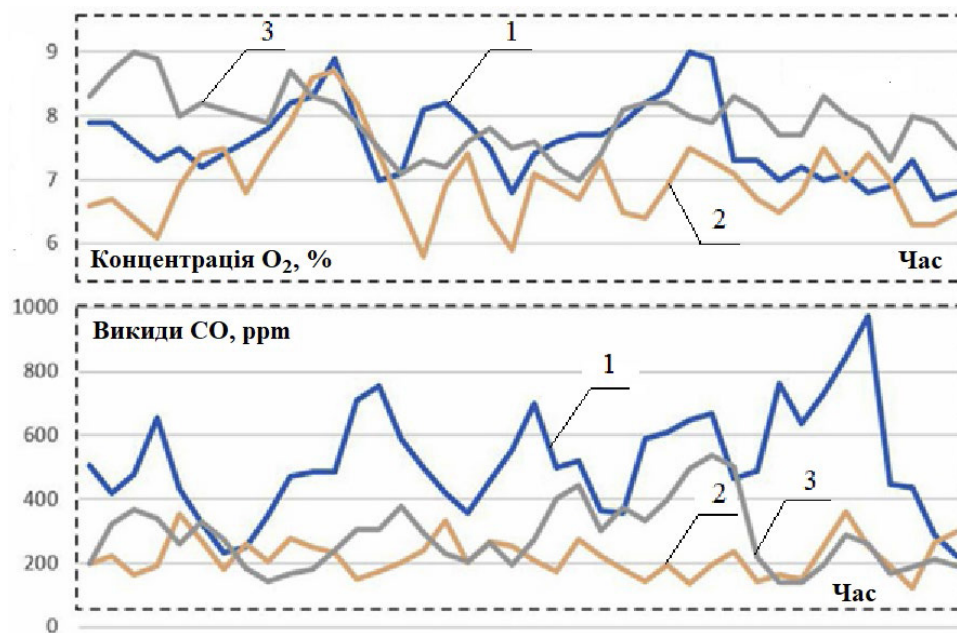


Рис. 9. Концентрації CO та O_2 у відхідних газах при спалюванні агропалива (1) при застосуванні решіткових турбулізаторів горіння сотової форми (2) та турбулізаторів V-подібної форми (3)

3. Boström C.-E., Gerde P., Hanberg A., Jernström B., Johansson C., Kyrklund T., Rannug A., Törnqvist M., Victorin K., Westerholm R.. Cancer risk assessment, indicators, and guidelines for polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air. *Environ Health Perspect.* 2002. V. 110. P. 451-488. DOI: 10.1289/ehp.110-1241197

4. Timothy V. Larson and Jane Q. Koenig. Wood smoke: emissions and noncancer respiratory effects. *Annu. Rev. Public Health.* 1994; 15. P. 133-156.

5. Cosic B., Stanic Z., Duic N. Geographic distribution of economic potential of agricultural and forest biomass residual for energy use: case study Croatia. *Energy.* 2011. 36(4). P. 2017-2028. DOI:10.1016/j.energy.2010.10.009

6. Horvat I., Dovic D., Filipovic P. Numerical and experimental methods in development of the novel biomass combustion system concept for wood and agro pellets. *Energy.* 2021. V. 231. P. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120929>

7. Kraiem N., Lajili M., Limousy L., Said R., Jeguirim M. Energy recovery from Tunisian agri-food wastes: evaluation of combustion performance and emissions characteristics of green pellets prepared from tomato residues and grape marc. *Energy*. 2016. V. 107. P. 409-418. DOI:10.1016/j.energy.2016.04.037
8. Roy M., Dutta A., Corscadden K. An experimental study of combustion and emissions of biomass pellets in a prototype pellet furnace. *Applied Energy*. 2013. V. 108. P. 298-307. DOI:10.1016/j.apenergy.2013.03.044
9. Diaz-Ramirez M., Sebastian F., Royo J., Rezeau A. Influencing factors on NOX emission level during grate conversion of three pelletized energy crops. *Applied Energy*. 2014. V. 115. P. 360-373. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.11.011
10. Lajili M., Jeguirim M., Kraiem N., Limousy L. Performance of a household boiler fed with agropellets blended from olive mill solid waste and pine sawdust. *Fuel*. 2015. V. 153. P. 431-436.
11. EN 303-5:2021. Heating boilers – Part 5: Heating boilers for solid fuels, manually and automatically stoked, nominal heat output of up to 500 kW – Terminology, requirements, testing and marking.
12. Horvat I., Dovic D., Filipovic P. Laboratory testing of domestic hot water boiler while fired with different biomass pellets. 13th Conference on sustainable development of energy, water and environment systems. Palermo, Italy. 2018.
13. Basok B., Veremiichuk A., Baranyuk O., Siryi O. Simulation of biopellet combustion process in low power boilers. Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering, Kielce. 2021. P. 141-144. – це опубліковано вже?
14. Басок Б.І., Давиденко Б.В., Кужель, Л.М., Лисенко О.М., Веремійчук, Г.М. Експериментальні дослідження спалювання рослинних пелет у побутовому кот-лі. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. 2021. Т. 37. С. 13-23. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.37.13-23>
15. Басок Б.І., Гончарук С.М., Приємченко В.П., Лисенко О.М., Веремійчук Г.М. Дослідження теплотехнічних характеристик роботи побутового котла з механічним пелетним пальником. Екологічна безпека та природоко-ристування. 2021. В. 4 (40). С. 60-72. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.4.60-72>

RESEARCH OF BURNING OF AGRICULTURAL PELLETS IN BOILERS WITH CAPACITY UP TO 25 kW

Lysenko O.M.^{1,2}, Veremiichuk H.M.^{1,2}, Siriyi O.A.²

¹*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Marii Kapnist str., 2a, Kyiv, 03057, Ukraine*

²*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Prosp. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/tpe.3.2022.11>

The main purpose of this research is to determine the main dependence's of the agricultural pellets combustion process and to study the influence of regime parameters on the distribution of temperatures in the combustion chamber, as well as to analyze the biofuels productivity characteristics.

Research methods: experimental and theoretical.

Results. The research of biofuel combustion process was carried out at the experimental facility of solid fuel boiler with a pellet burner for a passive type house heating. During experimental researches samples of wood pellets, rapeseed pellets and beets pulp were used. On the received graphs the changes in the temperature state of the combustion chamber at the stage of pellet's ignition, burning and fading were reflected. It was found that the largest increase in temperature occurs near the wall of the boiler, which is opposite to the burner. As can be seen on the graphs, temperature fluctuations occur as a result of the periodic burning of biofuel in the burner and the arrival of a new portion of pellet from the hopper. As the experiments showed, the temperature level at burning of rapeseed pellets is much lower than in comparison with wood pellets, and to go to the established mode of burning of beet pulp pellets is generally problematic. It is obvious that when setting up the fuel supply system and modes of operation of the fuel it is necessary to take into account heat physical characteristics of fuel, first of all moisture and heat capacity, as well as yield of volatile combustible components. For this purpose, a gas analysis was carried out when burning wood pellets. The selection of combustion products was done in the wild immediately after the boiler. As a result, the NO_x and CO concentrations of the appropriate temperature were obtained at the sample site. The nitrogen oxide concentrations should be considered moderate, which cannot be argued about the concentration of carbon monoxide, which requires further research. The obtained results can be used to increase the

efficiency of combustion process at burning biofuel in boilers of low power communal and industrial heat power, social-budget sphere and individual-household sector.

References 15, figure 9.

Key words: agropellets, combustion, burner, temperature, domestic boiler.

1. *Directive 2018/2001/EC* of 11 december 2018 on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sourc.

2. Andreu A., Calderoni M., Cremenescu C., Madani H., Pearson D., Rutz D., Schmitt B., Schmidt R., Skeiberg O., Urchueguia J., Van Helden W., Wilis M. 2050 vision for 100% renewable heating and cooling in Europe. RHC-Platform; 2019.

3. Boström C.-E., Gerde P., Hanberg A., Jernström B., Johansson C., Kyrklund T., Rannug A., Törnqvist M., Victorin K., Westerholm R. Cancer risk assessment, indicators, and guidelines for polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air. *Environ Health Perspect.* 2002. V. 110. P. 451-488. DOI: 10.1289/ehp.110-1241197

4. Timothy V. Larson and Jane Q. Koenig. Wood smoke: emissions and noncancer respiratory effects. *Annu. Rev. Public Health.* 1994; 15. P. 133-156.

5. Cosic B., Stanic Z., Duic N. Geographic distribution of economic potential of agricultural and forest biomass residual for energy use: case study Croatia. *Energy.* 2011. 36(4). P. 2017-2028. DOI:10.1016/j.energy.2010.10.009

6. Horvat I., Dovic D., Filipovic P. Numerical and experimental methods in development of the novel biomass combustion system concept for wood and agro pellets. *Energy.* 2021. V. 231. P. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120929>

7. Kraiem N., Lajili M., Limousy L., Said R., Jeguirim M. Energy recovery from Tunisian agri-food wastes: evaluation of combustion performance and emissions characteristics of green pellets prepared from tomato residues and grape marc. *Energy.* 2016. V. 107. P. 409-418. DOI:10.1016/j.energy.2016.04.037

8. Roy M., Dutta A., Corscadden K. An experimental study of combustion and emissions of biomass pellets in a prototype pellet furnace. *Applied Energy.* 2013. V. 108. P. 298-307. DOI:10.1016/j.apenergy.2013.03.044

9. Diaz-Ramirez M., Sebastian F., Royo J., Rezeau A. Influencing factors on NOX emission level during grate conversion of three pelletized energy crops. *Applied Energy.* 2014. V. 115. P. 360-373. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.11.011

10. Lajili M., Jeguirim M., Kraiem N., Limousy L. Performance of a household boiler fed with agropellets blended from olive mill solid waste and pine sawdust. *Fuel.* 2015. V. 153. P. 431-436.

11. *EN 303-5:2021*. Heating boilers – Part 5: Heating boilers for solid fuels, manually and automatically stoked, nominal heat output of up to 500 kW – Terminology, requirements, testing and marking.
12. *Horvat I., Dovic D., Filipovic P.* Laboratory testing of domestic hot water boiler while fired with different biomass pellets. 13th Conference on sustainable development of energy, water and environment systems. Palermo, Italy. 2018.
13. *Basok B., Veremiichuk A., Baranyuk O., Siruy O.* Simulation of biopellet combustion process in low power boilers. Actual problems of renewable energy, construction and environmental engineering, Kielce. 2021. P. 141-144.
14. *Basok B., Davydenko B., Kuzhel L., Lysenko O., Veremiichuk A.* Eksperymentalni doslidzhennia spalivannia roslynnykh pelet u pobutovomu kotli [Experimental studies of burning plant pellets in a domestic boiler], *Ventyliatsiia, osvithennia ta teplohozopostachannia* [Ventilation, Illumination and Heat-Gas Supply]. 2021. V. 37. P. 13-23. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.37.13-23> (in Ukr.),
15. *Basok B., Goncharuk S., Priemchenko V., Lysenko O., Veremiichuk H.* Doslidzhennia teplotekhnichnykh kharakterystyk roboty pobutovoho kotla z mekhanichnym peletnym palnykom [Research of thermotechnical characteristics of domestic boiler with a mechanical pellet burner], *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia* [Environmental safety and natural resources]. 2021. № 4 (40). P 60-72. DOI: 10.32347/2411-4049.2021.4.60-72 (in Ukr.).

Отримано 15.06.2022

Received 15.06.2022