

УДК 621.18

Л. А. Боднар, к. т. н., доц.; Д. В. Степанов, к. т. н., доц.; Р. В. Сливко

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА ПОТУЖНІСТЮ 1500 КВТ НА СОЛОМІ

Показано, що застосування теплогенераторів на альтернативних видах палива, зокрема соломі, є одним із найактуальніших завдань. Проведено експериментальні дослідження показників роботи теплогенератора на соломі потужністю 1500 кВт. Проаналізовано результати досліджень. Проведено порівняння розрахункових і експериментальних даних з температури димових газів на виході з топки. Проаналізовано можливість застосування нормативного методу теплового розрахунку котлоагрегатів під час проектування теплогенераторів на альтернативних видах палива.

Ключові слова: солома, альтернативні види палива, котел, коефіцієнт корисної дії, теплообмін у топці.

Вступ

У багатьох європейських державах важливе місце в їх паливно-енергетичному балансі посідає солома. Спалювання соломи є раціональним способом отримання теплової енергії. За статистичними даними [1], Україна щорічно споживає близько 180...210 млн. т. умовного палива й належить до енергозалежних країн. Ціни на імпортовані традиційні енергоносії постійно зростають. Одним із складників енергетичної стратегії України [2] до 2035 року є збільшення використання біомаси для виробництва енергії до 13,1 млн. т. н. е.

В Україні існує обладнання й демонстраційні проекти з ефективного використання соломи для теплопостачання. Але, як зазначено в роботі [3], вітчизняних теплогенераторів широкого типорозмірного ряду для спалювання соломи на ринку опалювального обладнання недостатньо. Для ширшого впровадження технологій спалювання соломи необхідні науково обґрунтовані методи проектування теплогенераторів. Аналіз вітчизняних наукових джерел показав, що експериментальні дослідження енергетичних і екологічних показників котлів для спалювання соломи практично не проводять. У літературі [4] наводять рекомендації щодо теплотехнічних випробувань водогрійних котлів із періодичним спалюванням цілих тюків соломи. Огляд наукових джерел показав також, що у відкритому доступі рекомендацій з проектування теплогенераторів на соломі немає.

Метою цієї роботи є аналіз та узагальнення результатів експериментальних досліджень показників роботи теплогенератора для спалювання соломи потужністю 1500 кВт.

Основна частина

Котел для спалювання тюків соломи потужністю 1500 кВт розташовано на території зернокомплексу на одному з підприємств Вінниччини. Теплогенератор призначений для нагрівання повітря, що надходить у сушарку зернокомплексу. На рис. 1 наведено загальний вигляд теплогенератора. Котел має дві топки і спільний теплообмінник, розташований над топкою. У топку одночасно завантажують два тюки соломи. Спочатку запалюють в одній топці; коли температура повітря на виході з теплообмінника знижується, запалюють солону в другій топці.

Охолодження топки водяне. Нагріта в топці вода надходить в оребрений повітрянагрівник, де нагріває повітря, що надходить у теплообмінник котла. Охолоджена в теплообміннику вода надходить у топку для охолодження її поверхні. Маса завантажуваних у топку тюків соломи 300 кг±20 кг. Котел обладнано автоматикою й датчиками.



Рис. 1. Загальний вигляд теплогенератора для спалювання соломи

Вимірюють автоматично і виводять на дисплей пульта управління такі параметри: температуру повітря на виході з теплообмінника котла; температуру води на виході із сорочки охолодження топки; температуру газів на вході в теплообмінник. Останній параметр вимірюють термопарами, розташованими у вихідному вікні топки. Температуру газів на виході з котла під час експерименту вимірювали за допомогою ртутного термометра із ціною поділки 5 °С. Для визначення витрати повітря на горіння у коробі, по якому надходило повітря, за допомогою термоанемометра виміряно швидкість і температуру. Виміряно також поперечний переріз короба. Теплообмінник котла виконано кожухотрубним із площею поверхні нагріву 136 м². У топці котла є два ряди отворів для подачі повітря на горіння. Площа поверхні стін топки 23,3 м².

На рис. 2 показано процес завантаження тюка соломи в теплогенератор, а також процес горіння тюка соломи.



Рис. 2. Процес завантаження тюка соломи в теплогенератор та горіння

Під час проведення експерименту фіксували такі показники: температуру повітря на виході з теплообмінника котла; температуру води на вході та виході з топки; температуру димових газів на виході з котла; температуру димових газів на виході з топки. Витрата повітря на котел становила $36000 \text{ м}^3/\text{год}$.

Аналіз складу соломи пшениці не проводився. Для розрахунків узято середньостатистичні показники [5] $W^p=14,49\%$, $C^p=40\%$, $N^p=0,35\%$, $H^p=5\%$, $S^p=0,16\%$, $O^p=36\%$, $A^p=4\%$, $Q_{н.р}=14,48 \text{ МДж/кг}$. Коефіцієнт корисної дії котла визначали за зворотнім тепловим балансом. При цьому втрати теплоти з відхідними газами визначали розрахунковим шляхом на основі виміряного значення температури відхідних газів. Втрати теплоти від хімічної і механічної неповноти згорання приймали на основі аналізу експериментальних даних авторів [6]: $q_3=1\%$, $q_4=4\%$, $q_5=1,5\%$. Коефіцієнт корисної дії котла змінювався упродовж експерименту в межах 71 – 73 %. Коефіцієнт надлишку повітря 1,8 – 2,8. Аналогічні дані були отримані в роботі [7].

Для теплового розрахунку теплогенератора створено математичну модель, реалізовану в Microsoft Excel. Під час побудови математичної моделі використано рекомендації, розроблені авторами в [8].

Теплогенератор працює в нестационарному режимі. Для забезпечення необхідного рівня температури повітря, що надходить на сушіння, процес горіння відбувається безперервно в обох топках. При цьому в одній з топок догорає залишок соломи, в іншій – горить чергова завантажена порція палива. Завдяки такому конструктивному виконанню топки основні показники котла залишаються на стабільному температурному рівні. На рис. 3 наведено зміну температур теплоносіїв упродовж експерименту. Як видно з рисунка, температура повітря змінювалася в межах $118\dots131 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура води на виході з топки $87\dots90 \text{ }^\circ\text{C}$. У разі досягнення температури води на виході з топки більше $90 \text{ }^\circ\text{C}$ вентилятор подачі повітря на горіння вимикається для запобігання закипання води в котлі.

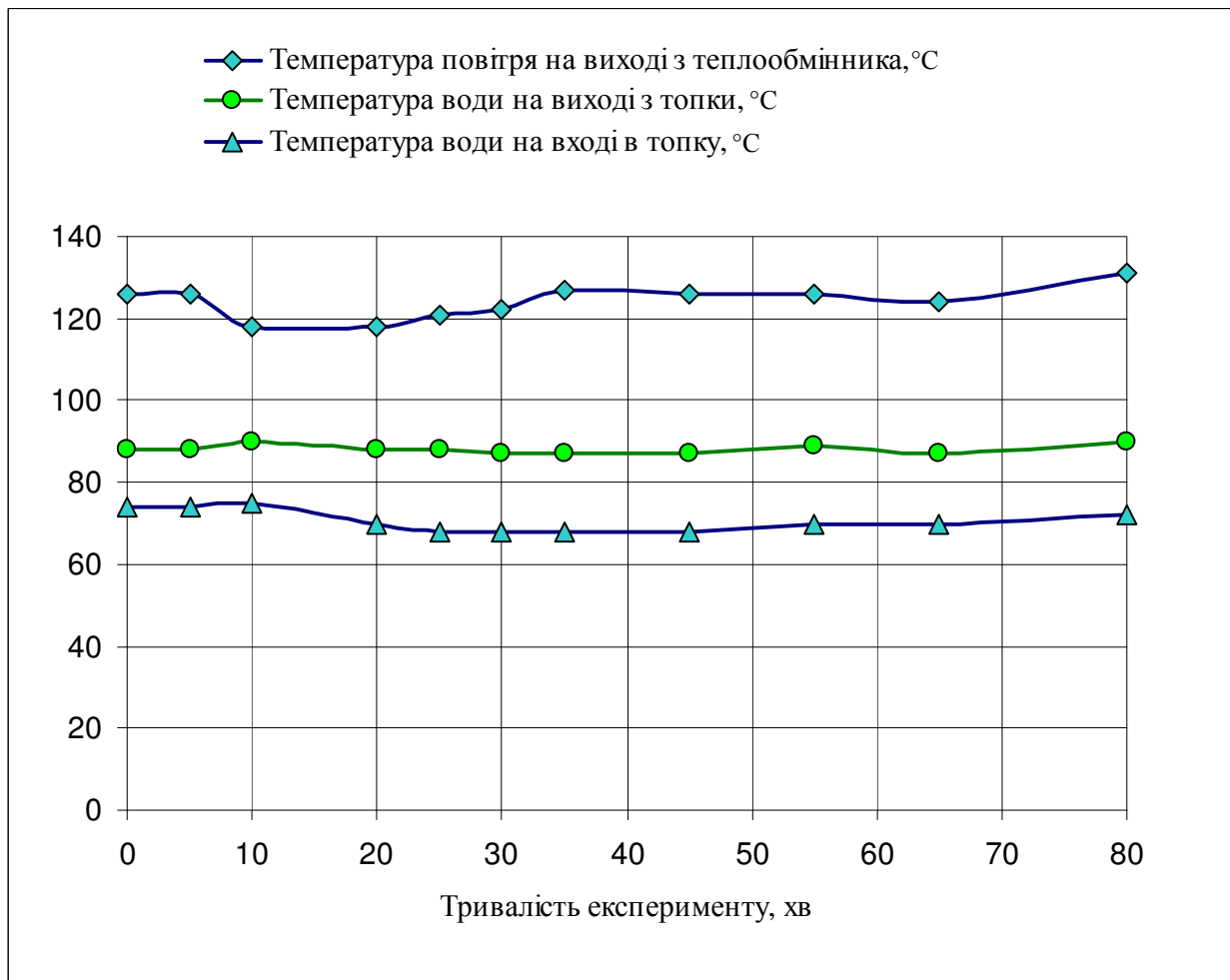


Рис. 3. Зміна температур повітря і води упродовж експерименту

За допомогою термопари виміряно температуру димових газів на виході з топки. Отримані дані для порівняння з розрахунковими. Для розрахунку теплообміну в топці використано рекомендації нормативного методу (НМ) теплового розрахунку котлоагрегатів [9]. Методика розрахунку сумарного теплообміну в топці ґрунтується на застосуванні теорії подібності до топкового процесу. У методиці враховано самопоглинання теплового випромінювання у пристінних шарах топкового середовища в критерії Бугера Bu , який вважають основною радіаційною характеристикою продуктів згорання. Нормативний метод було розроблено на основі чисельних експериментальних даних для теплового розрахунку енергетичних котлів на природному газі, вугіллі, мазуті, торфі та сланцях. Під час розрахунку теплогенераторів для спалювання цілих тюків соломи постає задача адаптації методики НМ розрахунку теплообміну в топці до особливостей горіння палива в таких котлах.

Температуру газів на виході з топки визначають за формулою (1)

$$t_m'' = \frac{T_a}{1 + M \cdot B\tilde{u}^{0,3} \left[\frac{\sigma_0 \cdot \psi_{cp} \cdot F_{cm} \cdot T_a^3}{\phi \cdot B_p \cdot (Vc)_{cp}} \right]^{0,6}} - 273, \quad (1)$$

де T_a – адиабатна температура горіння палива, яка відповідає в $I - \vartheta$ таблиці корисному

теплосприйняттю топки Q_m ; M – параметр, що враховує вплив на інтенсивність теплообміну рівня розташування пальників, міри забаластованості топкових газів та інших чинників; $B\tilde{u}$ – ефективне значення критерію Бугера за (2)

$$B\tilde{u} = 1,6 \cdot \ln \left(\frac{1,4 \cdot Bu^2 + Bu + 2}{1,4 \cdot Bu^2 - Bu + 2} \right), \quad (2)$$

$(Vc)_{cp}$ – середня сумарна теплоємність продуктів згорання, кДж/(м³·К)

$$(Vc)_{cp} = \frac{Q_T - I_{m.np.}''}{\vartheta_a'' - \vartheta_T''}, \quad (3)$$

де $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-11}$ кВт/(м²·К⁴) – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; $I_{m.np.}''$ – ентальпія продуктів згорання за температури газів на виході з топки ϑ_T'' і надлишку повітря на виході з топки α_m ; ψ_{cp} – середній коефіцієнт теплової ефективності екранів. Для визначення коефіцієнта ψ_{cp} необхідно вибрати з таблиці 6.3 НМ [9] значення коефіцієнта ζ , що враховує тепловий опір забруднення або закриття ізоляцією. Але для спалювання альтернативних видів палив значення коефіцієнта ζ немає. Для розрахунків узято $\zeta = 0,6$, як для настінних гладкотрубних і плавникових екранів у шарових топках для всіх палив.

Параметр M для шарових топок у НМ

$$M = M_0 \cdot (1 + \rho) \cdot \sqrt[3]{r_v}, \quad (4)$$

де M_0 – коефіцієнт, для шарових топок $M_0=0,46$; r_v – параметр забаластованості топкових газів; $\rho = R/F_{cm}$ – співвідношення між поверхнею R дзеркала горіння (шару) і поверхнею стін топки F_{cm} ; для цього випадку (топка циліндрична) поверхню шару пропонуємо визначати за формулою $R = d \cdot h$, де d – діаметр топки, а h – глибина топки.

На рис. 4 наведено порівняння експериментальних і розрахункових даних температури газів на виході з топки.

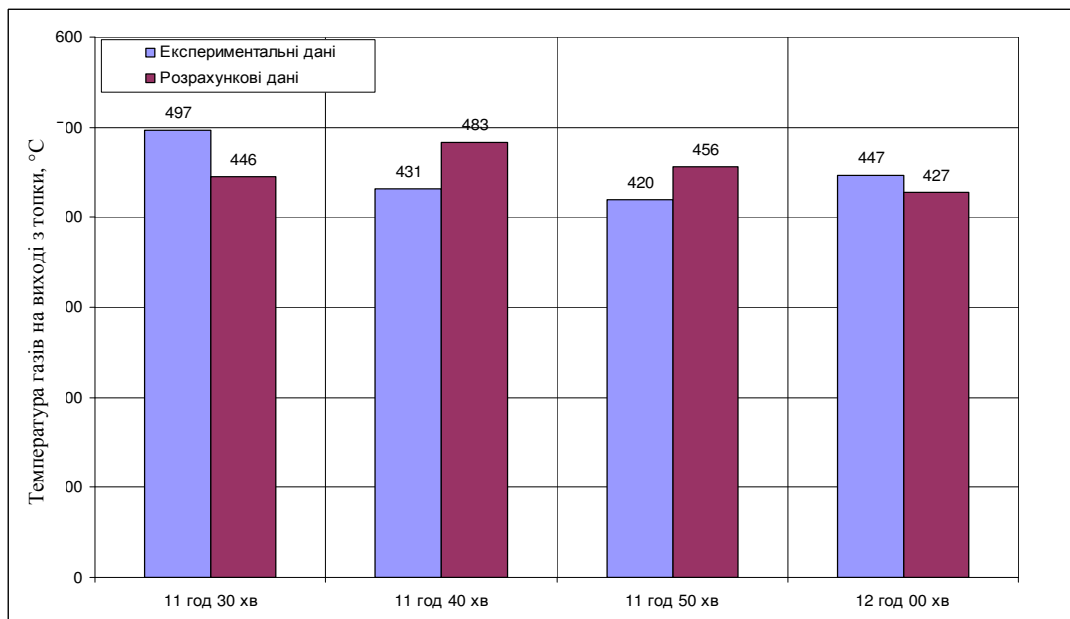


Рис. 4. Порівняння експериментальних і розрахункових значень температур димових газів на виході з топки

Слід зазначити, що площа дзеркала горіння змінюється протягом процесу вигорання тюка соломи. Як видно з рис. 4, розходження між експериментальними і розрахунковими значеннями становить 11,9%...17,34%. Такі розбіжності, на нашу думку, пов'язані з обмеженою кількістю початкових даних для розрахунку (складу палива), а також нормативної документації для теплового розрахунку теплогенераторів на альтернативних видах палива, зокрема тюках соломи. На цьому етапі досліджень для інженерних розрахунків пропонуємо користуватися НМ, але з адаптацією до особливостей конструкції котлів.

Висновки

Показано, що застосування теплогенераторів на альтернативних видах палива, зокрема соломи, є одним із найактуальніших завдань. Проведено експериментальні дослідження показників роботи теплогенератора потужністю 1500 кВт для спалювання тюків соломи. Проведено порівняння розрахункових і експериментальних даних з температури димових газів на виході з топки. Розходження між експериментальними і розрахунковими значеннями становить 11,9%...17,34%. Такі розбіжності пов'язані з обмеженою кількістю початкових даних для розрахунку (складу палива), а також нормативної документації для теплового розрахунку теплогенераторів на альтернативних видах палива. Проаналізовано можливість застосування нормативного методу до розрахунку теплообміну в топці теплогенераторів на альтернативних видах палива.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Баштовой А. И. Использование соломы для производства тепловой энергии в отопительных котельных Донецкой области / А. И. Баштовой, Н. М. Жовмир, С. В. Радченко, С. М. Чаплыгин // Промышленная теплотехника. – 2008. – № 3. – С. 54 – 59.
2. Енергетична стратегія України до 2030 року [Електронний ресурс] / Режим доступу : http://www.niss.gov.ua/public/File/2014_nauk_an_rozrobku/Energy%20Strategy%202035.pdf.
3. Боднар Л. А. Технічні та екологічні показники водогрійних котлів потужністю до 1 МВт для спалювання соломи /Л. А. Боднар, О. В. Дахновська, Р. Е Бойчук // Науково-технічний збірник "Сучасні технології матеріали і конструкції в будівництві". – 2015. – № 2. – С. 115 – 120.
4. Гелетуша Г. Г. Особливості теплотехнічних випробувань водогрійних котлів з періодичним спалюванням цілих тюків соломи / Г. Г. Гелетуша // Промышленная теплотехника. – 2010. – № 6. – С. 45 – 50.
5. Звіт про дослідження якості соломи як твердого біопалива [Електронний ресурс] / Інститут місцевого розвитку. – 2014. – 13 с. – Режим доступу : <http://myrgorod.pl.ua/files/images/Madem7.pdf>.
6. Corn Stover and Wheat Straw Combustion in a 176 kW boiler adapted for round bales [Електронний ресурс] / Rene Morissette, Philippe Savoie, Joey Villeneuve // Energies. – 2013. – P. 5760 – 5774. – Режим доступу : www.mdpi.com/journal/energies.
7. Development of a boiler for small straw bales combustion [Електронний ресурс] / Branislav S. Repić, Dragoljub V. Dakić, Aleksandar M. Erić, Dejan M. Đurović, Stevan D. J. Nemoda // Energy Engineering, Sustainable Energy - Recent Studies". – Режим доступу : <http://www.intechopen.com/books/sustainable-energy-recent-studies/development-of-the-technology-for-combined-heat-and-power-generation-utilizing-local-biomass>.
8. Степанов Д. В. Енергетична та екологічна ефективність водогрійних котлів малої потужності. Монографія / Д. В. Степанов, Л. А. Боднар. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 151 с.
9. Тепловой расчет котлоагрегатов (нормативный метод) : [під ред. Г. М. Кагана]. – Санкт-Петербург : НПО ЦКТИ, 1998. – 259 с.

Боднар Лілія Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики, тел.598339, Vodnar06@ukr.net.

Степанов Дмитро Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики Вінницького національного технічного університету.

Сливко Роман Володимирович – інженер.
Вінницький національний технічний університет.