

УДК 621.18

Л. А. Боднар, к. т. н., доц.; Д. В. Степанов, к. т. н., доц.; А. М. Довгаль

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ  
ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОГО ВОДОГРІЙНОГО  
КОТЛА ПОТУЖНІСТЮ 40 КВТ**

*Проаналізовано результати експериментальних досліджень екологічних показників водогрійного газогенераторного котла на деревині. Порівняно екологічні показники роботи котла з чинними стандартами. Наведено рекомендації щодо вдосконалення конструкції котла.*

**Ключові слова:** газогенераторний котел, екологічні показники, оксид азоту, оксид вуглецю.

### Вступ. Постановка завдання

Щорічне подорожчання енергетичних ресурсів призводить до необхідності використання поновлюваних джерел енергії. Одним з найперспективніших видів відновлювальних джерел енергії для України є біомаса: відходи сільського господарства, деревообробної промисловості, деревина. За даними [1], сумарні потенціальні ресурси відходів деревини, серед яких і кора в лісовому господарстві і деревообробних галузях промисловості, складають 3743 тис. м<sup>3</sup>, що еквівалентно 984 тис. т. у. п./рік.

Спалювання біомаси, за даними [2], є найбільшим джерелом забруднення атмосферного повітря. Для ефективного спалювання низькосортних видів палив існує низка заходів [3]. Найперспективнішим способом отримання теплової енергії з деревини та її відходів є термохімічна газифікація палива з подальшим допалюванням утвореного газу. Котли, у яких використовується цей принцип називаються газогенераторними. Це відносно новий тип котлів на ринку опалювального обладнання. Такий спосіб спалювання дозволяє суттєво підвищити теплову ефективність і керованість обладнання, а також досягти високого рівня екологічної чистоти.

У вітчизняній літературі майже не трапляються публікації про дослідження екологічних та енергетичних характеристик таких котлів, тому тематика статті є **актуальною**.

**Метою цієї роботи** є аналіз екологічних показників газогенераторного водогрійного котла потужністю 40 кВт для подальшого впровадження такого обладнання для теплозабезпечення будівель.

### Конструктивні особливості котла

Газогенераторний водогрійний котел спроектовано інженером Довгалем А. М. Налагоджувальні випробування котла проведено в цеху підприємства-виробника.

Топка котла виконана двокамерною із сталі та кераміки. Між камерою завантаження й камерою допалювання розташоване сопло для газифікації. У соплі є отвори для подачі вторинного повітря, яке підігривають у камері завантаження. Камера допалювання оточена водяною сорочкою та утеплена зсередини керамічним матеріалом. Продукти згорання видаляють за допомогою витяжного вентилятора. За допомогою вентилятора відбувається також регулювання кількості поданого повітря в котел. Котел оснащено автоматичними засобами контролю показників.

Конвективна частина котла складається із 30 труб діаметром 58/51 і довжиною 0,57 м. Навантаження котла 40 кВт.

Схема експериментальної установки наведена на рис. 1.

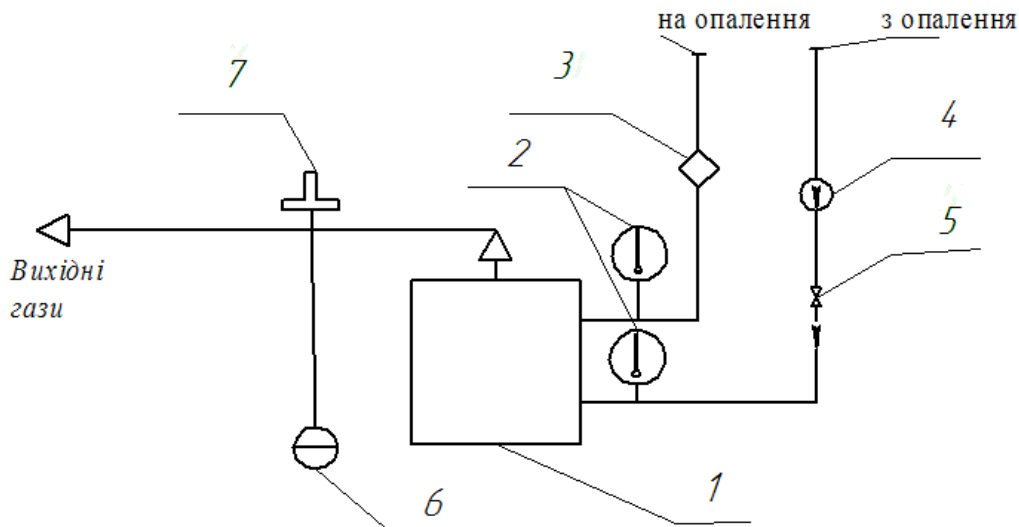


Рис. 1. Схема експериментальної установки: 1 – котел; 2 – термометри; 3 – тепловий лічильник; 4 – насос системи опалення; 5 – кран; 6 – газоаналізатор; 7 – пробовідбірник продуктів згорання

### Результати досліджень

Проби продуктів згорання відбирали в димовій трубі на виході з котла за допомогою газоаналізатора ОКСИ5М-5. У процесі експерименту вимірювали: температуру відхідних газів; уміст кисню у відхідних газах; уміст CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> в димових газах; температурний режим води; масу завантаженого палива.

У котлі спалювали деревину з вмістом вологи не менше 30 % .

Температурний режим води 70/50 °С. ККД котла – у межах 82,5 – 84 %. Витрата палива – у межах 18,8 – 19,5 кг/год.

Таблиця 1

### Результати експериментальних досліджень

|  |   |         |         |         |        |        |        |
|--|---|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| Температура відхідних газів, °С                          |   | 197,7   | 190,3   | 193     | 187    | 196,7  | 192,9  |
| Вміст кисню у відхідних газах, %                         |   | 8,1     | 8,2     | 9,3     | 9,6    | 10,5   | 9,1    |
| Температурний режим води $t_{пр}/t_{зв}$ , °С            |   | 70/50   | 70/50   | 70/50   | 70/50  | 70/50  | 70/50  |
| Вміст CO в димових газах, мг/м <sup>3</sup>              | 1 | 3751,66 | 4368,75 | 3128,34 | 1947,5 | 3710   | 3381,2 |
|  | 2 | 6115,21 | 7164,75 | 5599,73 | 3583,4 | 7420   | 5951   |
|  | 3 | 4389,44 | 5111,44 | 5111,44 | 2570,7 | 5268,2 | 4490,2 |
|  | 4 | 3199    | 3754,5  | 2940,6  | 1879   | 3886,6 | 3124   |
| Вміст NO в димових газах, мг/м <sup>3</sup>              | 1 | 247,9   | 262,64  | 235,84  | 244,78 | 252,82 | 248,8  |
|  | 2 | 404,08  | 430,73  | 422,15  | 450,4  | 505,64 | 437,89 |
|  | 3 | 290,04  | 307,29  | 307,29  | 323,11 | 359    | 317,35 |
| Вміст NO <sub>2</sub> в димових газах, мг/м <sup>3</sup> | 1 | 8,88    | 17,08   | 15,03   | 11,62  | 16,4   | 13,8   |

Продовження таблиці 1

|  |   |        |        |        |        |        |        |
|--|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Вміст NO <sub>2</sub> в димових газах, мг/м <sup>3</sup> | 2 | 14,47  | 28,01  | 26,9   | 21,38  | 32,8   | 24,29  |
|  | 3 | 10,39  | 19,98  | 19,98  | 15,34  | 23,29  | 17,8   |
| Вміст NO <sub>x</sub> в димових газах, мг/м <sup>3</sup> | 1 | 388,13 | 418,88 | 375,83 | 386,08 | 403,17 | 394,42 |
|  | 2 | 632,65 | 686,96 | 672,74 | 710,39 | 806,34 | 694,18 |
|  | 3 | 454,11 | 490,09 | 490,09 | 509,63 | 572,5  | 503,28 |

Примітка. 1 – результати, отримані в результаті експерименту; 2 – експериментальні дані, приведені до  $\alpha=1$ ; 3 – експериментальні дані, приведені до вмісту кисню в продуктах згорання 6%; 4 – експериментальні дані, приведені авторами статті до вмісту кисню в продуктах згорання 10%.

### Аналіз отриманих результатів

Як зазначається в роботі [2], спалюванню палива властива складність процесів і їх залежність від багатьох чинників, які важко піддаються технологічному контролю. Унаслідок цього показники емісії можуть відрізнятися залежно від типу біомаси, її стану перед спалюванням, способу спалювання, теплової потужності енергоустановки, аеродинаміки і сумішоутворення в топці, характеру теплообміну в топці, реалізації первинних і вторинних заходів зі зниження емісії. В установках малої потужності реалізуються прості технології з мінімальним рівнем автоматизації процесу горіння.

У газогенераторних котлах реалізується принцип двостадійного спалювання, що сприяє зменшенню емісії шкідливих речовин.

Для котлів на твердому паливі вітчизняним стандартом нормуються лише викиди CO [4]. Так, під час спалювання антрациту допустимий вміст CO складає 10000 мг/м<sup>3</sup>, під час спалювання кам'яного і бурого вугілля з виходом летких сполук від 17 % до 50 % відповідно 46000 мг/м<sup>3</sup>. Для котлів, що працюють на деревині, вітчизняні стандарти, наскільки нам відомо, відсутні.

У стандартах європейських країн нормування шкідливих речовин проводиться залежно від класу котла, типу завантаження палива (ручне, автоматичне), потужності котла [2, 5]. Крім того, у різних стандартах нормуються не всі шкідливі речовини. Так, в EN 303-5 [5] для котлів на деревині нормуються лише викиди CO, органічно зв'язаного вуглецю, пилу. Для промислових котлів в Австрії [2] нормуються викиди CO, NO<sub>x</sub>, летких органічних сполук, твердих частинок. Для котлів малої потужності на біомасі в Данії [2] нормуються лише викиди CO, для котлів від 1 МВт – CO, NO<sub>x</sub>, твердих частинок.

Відповідно до нормативів [6, 7] для коректного зіставлення дослідних даних, отриманих під час вимірювань концентрацій шкідливих речовин у димових газах котлів, їх перераховують для таких умов: вміст кисню в продуктах згорання 6%,  $\alpha=1,4$ , температура 0 °С, тиск 101,3 кПа.

У стандартах європейських країн концентрації шкідливих речовин наводять за різних вмістів кисню в продуктах згорання. Зокрема в EN 303-5 дані наведені за вмісту кисню 10 %, тому нами проведено перерахунок дослідних даних для CO з метою порівняння з даними EN 303-5. Як бачимо з табл. 1, діапазон викидів CO протягом експерименту – у межах 1879 – 3886,6 мг/м<sup>3</sup>, а в EN 303-5 для котлів менше 50 кВт з ручним завантаженням палива норма викидів CO коливається від 5000 до 25000 мг/м<sup>3</sup> (залежно від класу котла). Тобто викиди CO для газогенераторного котла на деревині значно менші, ніж європейські норми.

За даними [4], для котлів потужністю до 300 кВт в Австрії норма викидів CO складає 4300 мг/м<sup>3</sup> (за умови  $\alpha=1$ ) а NO<sub>x</sub>=585 мг/м<sup>3</sup>. Як бачимо з таблиці 1, вміст CO для умов експерименту перевищує цю норму на 23 – 42 %, а NO<sub>x</sub> – на 7,5 – 27 %.

Граничні показники емісії забруднювальних речовин для котлів ФРН [2] потужністю від

15 до 50 кВт і вмісту кисню в димових газах 13 % для СО складають 4000 мг/м<sup>3</sup>. У результаті експерименту в перерахунку на вміст кисню в димових газах 13% нами отриманий такий діапазон даних – 1366,7 – 2730 мг/м<sup>3</sup>.

Отже, порівняння екологічних показників роботи газогенераторного водогрійного котла потужністю 40 кВт з іноземними стандартами показало відповідність емісій шкідливих речовин чинним європейським стандартам.

Газогенераторні котли сприяють зменшенню емісії забруднювальних речовин, тому є перспективними для використання як в промисловості, так і в комунальному секторі.

На нашу думку, у стандартах варто враховувати тип спалюваної деревини, її вологість, також необхідно нормувати вміст смол у димових газах, що спонукатиме виробників котлів упроваджувати сучасні технології для ефективного спалювання низькосортних видів палива.

Для ефективнішого спалювання палива і для подальшого зменшення шкідливих викидів у продуктах згорання необхідне вдосконалення конструкції котла. Для зменшення викидів СО варто оптимізувати систему подачі повітря в котел. Для цього потрібно підкорегувати кількість отворів для подачі повітря в камеру завантаження для його рівномірної подачі.

Іноземні виробники газогенераторних котлів установлюють також у камері допалювання вторинні випромінювачі, що сприяють зменшенню викидів СО. Такий досвід варто використати для вдосконалення конструкції експериментального зразка котла, що розглядають у цій статті.

Встановлення інтенсифікаторів теплообміну в газотрубній частині котла сприятиме зменшенню температури відхідних газів і підвищенню ККД котла.

### Висновки

1. Авторами досліджено екологічні показники роботи експериментального зразка газогенераторного водогрійного котла потужністю 40 кВт під час роботи його на вологій деревині.
2. Показано, що екологічні показники газогенераторного котла під час роботи на деревині – у межах європейських норм.
3. Для ефективнішої роботи котла можна вдосконалити систему подачі повітря в камеру завантаження та сопло для газифікації.
4. Отримані результати є кроком до подальших досліджень котлів на біомасі з метою систематизації даних і створення обґрунтованих методів розрахунку газогенераторних водогрійних котлів малої потужності на твердому паливі і ширшому впровадженні таких котлів для теплозабезпечення будівель і споруд.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Халатов А. А. Сжигание и газификация альтернативных топлив / А. А. Халатов, И. И. Борисов, С. Г. Кобзарь и др. // Промышленная теплотехника. – 2006. – № 4. – С. 53 – 63.
2. Жовмир Н. М. Анализ нормативных требований к эмиссии загрязняющих веществ при сжигании биомассы / Жовмир Н. М. // Промышленная теплотехника. – 2012. – № 1. – С. 77 – 86.
3. Проблеми спалювання низькосортних палив в котлах малої потужності [Електронний ресурс] / Л. А. Боднар, С. Й. Ткаченко, О. В. Дахновська // Наукові праці ВНТУ. – 2012. – № 4. – Режим доступу до журн.: <http://praci.vntu.edu.ua/article/view/2656/2862>.
4. Котли опалювальні водогрійні теплопродуктивністю до 100 кВт. Загальні технічні умови: ДСТУ 2326–93. – [Чинний від 1995-01-01]. – К. : Держстандарт України, 1994. – 17 с. – (Державний стандарт України).
5. Справочник потребителя биотоплива / [под. ред. Виллу Вареса]. – Таллин : Таллинский технический университет, 2005. – 183 с.
6. ГОСТ 30735-2001. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью от 0,1 до 4 МВт. Общие технические условия. – [Дата введения 2003-01-01]. – Минск, 2003. – 16 с.
7. Установки котельные. Установки, работающие на газообразном, жидком и твердом топливе. Нормы выбросов загрязняющих веществ: СТБ 1626.1-2006. – [Дата введения 2006-07-01]. – Минск, 2006. – 8 с.

*Боднар Лілія Анатоліївна* – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики, тел. 598339, [Vodnar06@ukr.net](mailto:Vodnar06@ukr.net).

*Степанов Дмитро Вікторович* – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики, тел. 598339, [StepanovDV@mail.ru](mailto:StepanovDV@mail.ru).

*Довгаль Анатолій Миколайович* – інженер.  
Вінницький національний технічний університет.