

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ І УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ В КОТЕЛЬНЯХ НА БІОМАСІ

¹ Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі розглянуто актуальні проблеми підвищення ефективності роботи теплогенераторів на біомасі шляхом вдосконалення технологій очищення та утилізації теплоти відхідних газів. Проаналізовано сучасні методи зменшення вмісту шкідливих домішок і пилу, а також шляхи інтеграції систем рекуперації теплоти для підвищення загального енергетичного ККД. Запропоновано технологічні рішення, адаптовані до умов України з урахуванням сучасних викликів, зокрема впливу воєнного стану та необхідності дотримання посилених вимог щодо моніторингу викидів парникових газів.

Ключові слова: біомаса, теплогенератор, відхідні гази, очищення, утилізація теплоти, рекуперація, комбіноване виробництво теплоти і електроенергії (ТЕЦ), енергетична безпека.

Abstract

The paper considers topical issues of improving the efficiency of biomass heat generators by improving technologies for cleaning and utilizing waste gas heat. Modern methods of reducing the content of harmful impurities and dust are analyzed, as well as ways to integrate heat recovery systems to increase overall energy efficiency. Technological solutions adapted to the conditions of Ukraine are proposed, taking into account current challenges, in particular the impact of martial law and the need to comply with stricter requirements for monitoring greenhouse gas emissions.

Keywords: biomass, heat generator, waste gases, purification, heat utilization, recovery, combined heat and power (CHP) production, energy security.

Вступ

Світова тенденція до декарбонізації економіки та зростання цін на традиційні палива роблять використання біомаси все більш привабливим для генерації теплоти. Однак, процес спалювання біомаси, особливо з високим вмістом вологи, супроводжується утворенням великих обсягів відхідних газів зі значною температурою, що призводить до втрат енергії та забруднення навколишнього середовища. Для України ця проблема є особливо актуальною [1-3] у контексті пошкодження російськими атаками ключових об'єктів відновлюваної енергетики. Відновлення та модернізація таких об'єктів вимагає впровадження передових технологій.

Основними проблемами при експлуатації теплогенераторів на біомасі є наявність у димових газах твердих часток (золи), оксидів сірки, азоту та вуглецю, а також конденсованих смолистих сполук. Ці домішки не тільки знижують ефективність роботи обладнання, викликаючи корозію та засмічення каналів, але й ускладнюють процес утилізації теплоти. Сучасний ринок біоенергетики демонструє стале зростання. Це зростання стимулює розвиток передових технологій, таких як комбіноване виробництво теплоти і електроенергії (ТЕЦ), газифікація та вдосконалені системи очищення.

Метою роботи є аналіз існуючих та розробка пропозицій щодо вдосконалення технологій очищення і рекуперації теплоти відхідних газів від теплогенераторів на біомасі з урахуванням сучасних глобальних тенденцій та специфічних умов України.

Результати дослідження

Відхідні гази від теплогенераторів на біомасі характеризуються складною хімічною структурою, що вимагає застосування комплексу методів очищення.

Циклони є найпростішим та найпоширенішим рішенням для видалення грубодисперсних часток золи. Принцип дії заснований на використанні відцентрової сили для відділення твердих частинок від

газового потоку. Незважаючи на простоту та низьку вартість, ефективність циклонів для уловлення дрібнодисперсних часток (менше 10 мкм) та аерозолів смол є недостатньою, тому вони зазвичай використовуються як перший ступінь очищення.

Електрофільтри є високоефективним способом видалення дрібнодисперсного пилу. Вони працюють за принципом іонізації частинок у електричному полі високої напруги з подальшим їх осадженням на електродах. Ефективність електрофільтрів може сягати 99,9% для часток розміром понад 1 мкм. Недоліком є висока вартість обладнання, його громіздкість та чутливість до електричних властивостей пилу та хімічного складу газів.

Скрубери є одним з найуніверсальніших рішень для одночасного видалення пилу, діоксиду сірки (SO_2) та розчинних летких органічних сполук. Принцип дії полягає в промиванні газової суміші рідиною (зазвичай водою або розчинами лугу), в результаті чого забруднення переходять у рідку фазу. Ефективність скрубера значно залежить від вибору робочої рідини та конструкції апарату (насадочні, тарельчаті, форсуночні). Для підвищення ефективності видалення смолистих сполук перспективним є використання в якості абсорбенту органічних рідин, наприклад, вуглеводневих олій, що дозволяє ефективно поглинати ароматичні вуглеводні.

Рукавні фільтри є високоефективними для тонкого очищення газів від пилу. Вони працюють за принципом фільтрації газу через тканину, яка затримує частинки. Ефективність може перевищувати 99,99%. Недоліки: чутливість до високих температур і вологи, необхідність регулярної заміни фільтрувального матеріалу, ризик утворення смолистих відкладень, що знижують проникність.

Після ефективного очищення відхідних газів відкриваються можливості для утилізації теплоти, що міститься в цих газах. Найбільш розповсюджена температура газів на виході з котла може сягати 150–250°C і вище. Без рекуперації ця енергія безповоротно втрачається.

Із заходів утилізації теплоти відомі: рекуперативні теплообмінники, конденсаційні теплообмінники, інтеграція в системи комбінованого виробництва (ТЕЦ), комплексний підхід та перспективні напрями розвитку.

Найпростішим рішенням є встановлення газо-повітряного або газо-водяного теплообмінника для підігріву повітря горіння або технологічної води. Це дозволяє повернути до 20-30% теплоти назад у технологічний процес, знижуючи витрати палива. Однак, при значному вмісті вологи в газах, їхня температура не може бути знижена нижче точки роси, що обмежує ефективність.

Більш досконалим рішенням є використання конденсаційних теплообмінників, які дозволяють охолоджувати гази нижче температури точки роси (зазвичай до 40-60°C). При цьому відбувається конденсація водяної пари, що супроводжується виділенням додаткової кількості теплоти – теплоти пароутворення. Це дозволяє значно підвищити загальний ККД теплогенераторної установки на 10-15%. Отриману теплоту можна використовувати для потреб опалення, гарячого водопостачання або технологічних процесів. Для підвищення ефективності роботи конденсаційних теплообмінників необхідно інтегрувати їх у систему попереднього очищення газів, що дозволяє уникнути інтенсивного забруднення поверхонь теплообміну смолистими відкладеннями.

Особливий потенціал для України становлять системи комбінованого виробництва теплоти і електроенергії (ТЕЦ) на біомасі. Дослідження, проведене в умовах, аналогічних українським, показує, що незважаючи на відносно високу собівартість електроенергії, такі системи можуть стати економічно життєздатними за рахунок високої утилізації теплоти та підвищених "зелених" тарифів. Утилізація теплоти відхідних газів є ключовою ланкою для підвищення ефективності таких ТЕЦ [4].

Найбільш ефективним для вирішення проблеми відхідних газів теплогенераторів на біомасі є комплексний підхід, що поєднує послідовні стадії очищення та утилізації теплоти. Технологічна схема повинна включати: попереднє очищення (циклони), глибоке очищення (електрофільтри, рукавні фільтри та скрубери), утилізація теплоти (використання рекуперативних та конденсаційних теплообмінників для максимального відбору теплоти).

Серед перспективних напрямів для подальшого вдосконалення можна виділити:

- створення гібридних енергетичних систем, де біомасний теплогенератор працює в парі з сонячними колекторами або тепловими насосами, дозволяє забезпечити стабільне енергопостачання;
- впровадження систем моніторингу в реальному часі та використання алгоритмів штучного інтелекту для оптимізації режимів горіння, очищення та рекуперації дозволяє максимізувати ефективність і мінімізувати витрати;
- розробка технологій утилізації золи та стоків від скруберів, наприклад, використання золи як

мінерального добрива або в будівництві.

Висновки

Жодна окрема технологія не може забезпечити повне очищення та утилізацію теплоти. Найкращих результатів досягають при послідовному поєднанні методів механічного, електричного та мокрого очищення з подальшим використанням рекуперативних і конденсаційних теплообмінників.

Впровадження конденсаційних технологій дозволяє утилізувати не тільки явну, але й приховану теплоту пароутворення, що суттєво підвищує загальний ККД установки.

Розвиток технологій очищення та утилізації теплоти відхідних газів є стратегічно важливим для України, яка має значний потенціал біомаси аграрного походження. Це сприяє енергетичній незалежності, децентралізації та виконанню міжнародних зобов'язань з декарбонізації.

Подальший розвиток пов'язаний з інтеграцією біоенергетики в гібридні системи, впровадженням цифрових інструментів оптимізації та розробкою маловідходних технологій переробки відходів самого процесу очищення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Перспективи розвитку ринку біомаси в ЄС і Україні. Вплив використання біомаси на зміну клімату. URL: <https://uabio.org/materials/328/>. (дата звернення 17.11.2025 р.)

2. Степанова Н.Д., Глеба Я.О., Чорнобай О.С. Екологічні та економічні питання переведення промислової парової котельні на спалювання біомаси. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Енергоефективність в галузях економіки України – 2023*, 21 – 23 листопада 2023 р., Вінниця: ВНТУ, URL : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egcu/egcu2023/paper/view/19481> (дата звернення 17.11.2025)

3. Степанова Н.Д., Храмцов М. В. Ефективність переведення водогрійної опалювальної котельні на спалювання біомаси. *Матеріали LIV Всеукраїнської науково-технічної конференції факультету будівництва, цивільної та екологічної інженерії (2025)*, 24.03.2025 – 27.03.2025, Вінниця: ВНТУ, URL : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2025/paper/view/24270/20018> (дата звернення 17.11.2025)

4. Долінський А. А., Кліменко В. Н. Когенерація – нові потужності для енергетики. *Енергозбереження Поділля*. 2004. № 2. С. 53–59.

Степанова Наталія Дмитрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: Stepanovand@i.ua.

Храмцов Максим Володимирович, студент групи ТЕ-24м, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Паламарчук Микола Олександрович, аспірант кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: padamarcukn@gmail.com

Stepanova Nataliya D., Cand. Sc. (Eng), Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsya, e-mail: Stepanovand@i.ua

Khramtsov Maksym V., student of TE-24m group, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Palamarchuk Mykola O., postgraduate student of the Department of Thermal Power Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email : padamarcukn@gmail.com