

УДК 662.6:697.3

к.т.н., доц. **Вадим Наливайко**,

[vadim.moris@gmail.com](mailto:vadim.moris@gmail.com), ORCID: 0000-0003-4452-6111,

*Криворізький національний університет*

к.т.н., доц. **Вікторія Коновалюк**,

[konovaliuk.va@knuba.edu.ua](mailto:konovaliuk.va@knuba.edu.ua), ORCID: 0000-0001-5115-7188,

*Київський національний університет будівництва і архітектури*

к.т.н., доц. **Павло Кіріченко**,

[pasha129@knu.edu.ua](mailto:pasha129@knu.edu.ua), ORCID: 0009-0007-4031-7693,

PhD, ст. викладач **Валерій Савін**,

[savinvv@knu.edu.ua](mailto:savinvv@knu.edu.ua), ORCID: 0009-0008-6013-7371,

*Криворізький національний університет*

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.214-233>

## РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ УНІВЕРСАЛЬНОЇ ТВЕРДОПАЛИВНОЇ ТЕПЛОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ З ГРАВІТАЦІЙНИМ ПОДАВАННЯМ ШМАТКОВОГО БІОПАЛИВА

***Анотація.** У статті розглянуто конструкцію універсальної твердопаливної теплогенерацийної установки «Химера» з кільцевою камерою згоряння, «сухою» циліндричною гравітаційною шахтною (куповою) топкою з шаровим спалюванням палива на чавунних решітках і з чавунними циліндричними тепловими накопичувачами, саморегульованим підведенням первинного та вторинного повітря до зони горіння та спалювання з жаротрубним триходовим вертикальним теплообмінником для ефективного відбирання теплоти з димових газів, яка призначена для високоефективного спалювання шматкового біопалива різного походження та надійного опалення приміщень, які обігріваються. Проаналізовано конструктивні особливості теплогенерацийної установки, принцип її роботи, паливну гнучкість та екологічні переваги. Показано, що застосування технології багатозонного горіння та допалювання піролізних газів дозволяє досягти високого коефіцієнта корисної дії та знизити рівень шкідливих викидів. Установка «Химера» може бути ефективним рішенням для теплопостачання промислових, комунальних та аграрних об'єктів.*

***Ключові слова:** біопаливо, твердопаливна теплогенерацийна установка, гравітаційна шахтна топка, піроліз, енергоефективність, відновлювана енергетика.*

**Вступ.** Сучасний розвиток енергетики характеризується зростанням інтересу до відновлюваних джерел енергії та зменшенням залежності від

викопного палива. В умовах подорожчання природного газу та необхідності скорочення викидів парникових газів особливої актуальності набуває використання біопалива різного походження: деревної тріски, пелет, брикетів, агровідходів, лушпиння, соломи тощо.

Однією з ключових проблем при використанні біопалива є його неоднорідність за фракційним складом, вологістю та теплотворною здатністю. Традиційні твердопаливні котли часто не забезпечують стабільного та повного згоряння такого палива. Тому актуальним є створення універсальних теплогенераційних установок, здатних ефективно працювати з різними видами палива з біомаси.

**Актуальність дослідження.** У сучасних умовах перетворення енергетичного сектору особливого значення набуває розвиток децентралізованих систем теплопостачання, заснованих на використанні місцевих видів палива. Висока залежність від імпортованих енергоносіїв, коливання цін на природний газ та необхідність зниження викидів парникових газів сприяють активному впровадженню твердопаливних котлів, зокрема установок, що працюють на біомасі [1, 2].

Згідно з міжнародними дослідженнями, біомаса займає значну частку у структурі відновлюваної енергетики Європи, особливо в секторі теплогенерації [2]. У країнах з розвинутою лісовою та аграрною галуззю котли малої потужності на деревині та агровідходах є важливою складовою систем локального опалення. Особливу нішу в цьому сегменті займають твердопаливні котли з гравітаційними шахтними топками, які поєднують конструктивну простоту з відносно високими показниками енергоефективності.

Шахтні котли характеризуються вертикальним розміщенням паливного шару та пошаровим переміщенням фронту горіння [3, 4]. На відміну від традиційних колосникових конструкцій, у шахтних топках зона активного горіння формується в нижній частині шару палива, а продукти піролізу проходять крізь гарячий шар, що сприяє їхньому допалюванню. Процес спалювання твердого палива у шахтних котлах є складним багатостадійним явищем, що передбачає:

- нагрівання та сушіння палива;
- термічний розклад (піроліз);
- горіння летких компонентів;
- окиснення твердого вуглецевого залишку.

Згідно з теорією горіння твердих палив [5, 6], швидкість поширення фронту реакції залежить від температури, пористості шару та інтенсивності підведення повітря. Моделювання фіксованого шару біомаси показує, що в шахтних топках формується кілька характерних зон: зона сушіння (100–200 °C),

зона піролізу (200–600 °С), зона активного горіння (800–1100 °С), зона охолодження золи [4, 5].

Сучасні дослідження активно застосовують чисельне моделювання для аналізу процесів горіння [7]. CFD-аналіз дозволяє:

- визначити температурні поля;
- оцінити розподіл концентрації кисню;
- оптимізувати геометрію камери;
- зменшити зони неповного згоряння.

Результати моделювання показують, що правильне розташування каналів вторинного повітря суттєво впливає на екологічні показники.

Попри переваги, існує ряд проблем:

- залежність від якості палива;
- нерівномірність процесу горіння при неправильному завантаженні;
- утворення конденсату при низькотемпературному режимі;
- обмежені можливості автоматизації у базових моделях.

Згідно з оглядовими роботами [1, 2], основним напрямом розвитку є використання автоматичного керування повітрям і використання теплоаккумуляторів. Сучасні тенденції розвитку передбачають:

- впровадження систем електронного контролю подавання повітря;
- використання керамічних камер допалювання;
- рециркуляція димових газів;
- застосування агробіомаси як альтернативного палива [2, 8].

Очікується, що подальші дослідження будуть спрямовані на:

- зниження викидів;
- підвищення стабільності процесу горіння;
- розробку адаптивних алгоритмів керування.

**Останні дослідження та публікації.** Питання ефективного спалювання біопалива в твердопаливних теплогенераційних установках активно досліджується протягом останніх десятиліть у зв'язку з розвитком відновлюваної енергетики та посиленням екологічних вимог. Аналіз наукових джерел свідчить, що ключовими проблемами залишаються:

- низька стабільність горіння;
- залежність ефективності від вологості палива;
- підвищені викиди продуктів неповного згоряння.

Проблематика ефективного використання біопалива у твердопаливних теплогенераційних установках широко висвітлена у вітчизняних та закордонних наукових дослідженнях [9-21]. Аналіз літературних джерел свідчить, що основна увага науковців зосереджена на підвищенні енергоефективності процесу горіння, розширенні паливної універсальності установок та зменшенні

негативного впливу на довкілля.

У працях вітчизняних авторів [9, 18] зазначається, що традиційні твердопаливні котли характеризуються обмеженою здатністю до ефективного спалювання біопалива з підвищеною вологістю та змінним гранулометричним складом. Це призводить до неповного згоряння, зниження коефіцієнта корисної дії та збільшення викидів чадного газу й твердих частинок. Автори наголошують на необхідності застосування вдосконалених схем подавання повітря та інтенсифікації тепло- та масообміну в зоні горіння.

Залежно від виду біомаси, її складу, вологості, теплоти згоряння, розміру частинок, насипної густини та зольності, властивості золи плавиться чи спікатись, використовують різні технології спалювання [10]. У роботах [11-15] розроблено методики розрахунку котлів на твердій біомасі з різними технологіями спалювання, а в роботах [16-17] авторами запропоновано методику розрахунку різних типів і конструкцій твердопаливних водогрійних котлів на основі експериментальних даних.

У роботі [18] показано, що перспективним напрямом розвитку твердопаливних теплогенераторів є використання багатостадійного горіння з розділенням процесів сушіння, піролізу та допалювання летких компонентів. Такий підхід дозволяє стабілізувати процес горіння та підвищити ККД установок до 85–92 %.

Закордонні дослідження, зокрема [19] і [21], підтверджують високу ефективність піролізно-дифузійних схем спалювання біомаси. Автори зазначають, що окрема камера допалювання піролізних газів із подаванням вторинного та третинного повітря забезпечує майже повне окиснення горючих компонентів і суттєве зниження концентрації СО та органічних сполук у димових газах. При цьому важливу роль відіграє точне регулювання коефіцієнта надлишку повітря.

У монографії [20] акцентується увага на паливній гнучкості сучасних біоенергетичних установок. Показано, що універсальні теплогенератори, здатні працювати на сумішах різних видів біомаси, мають значні переваги з точки зору економічної доцільності та енергетичної безпеки. Однак реалізація такої універсальності потребує складніших конструктивних рішень і розвинених систем автоматичного керування.

Нормативні документи, зокрема стандарт ДСТУ EN 303-5:2016 [22], встановлюють жорсткі вимоги до ефективності та екологічних показників твердопаливних котлів. Відповідно до цих вимог, сучасні установки повинні забезпечувати низькі викиди забруднювальних речовин при високому ККД, що стимулює впровадження технологій допалювання та оптимізації теплообміну.

У роботах, присвячених екологічним аспектам спалювання біопалива [23],

підкреслюється, що застосування високотемпературних камер допалювання дозволяє не лише зменшити шкідливі викиди, але й підвищити загальну енергетичну ефективність установки. Це особливо актуально для аграрних і промислових об'єктів, де використовується біопаливо з нестабільними характеристиками.

Таким чином, аналіз літературних джерел показує, що найбільш перспективним напрямом розвитку твердопаливних теплогенераційних установок є створення універсальних систем із багатозонним горінням, піролізом та допалюванням газів. Саме ці підходи лежать в основі конструктивних і технологічних рішень [24, 25], реалізованих у теплогенераційній установці «Химера», що підтверджує наукову обґрунтованість і актуальність даної розробки.

**Формулювання цілей статті.** Метою роботи є дослідження та обґрунтування конструктивно-технологічних рішень універсальної твердопаливної теплогенераційної установки з гравітаційною шахтною топкою, спрямованих на підвищення ефективності спалювання кускового біопалива різного походження.

**Основна частина.** У роботі використано методи теоретичного аналізу теплотехнічних процесів горіння твердого палива, узагальнення експлуатаційних даних котельних установок на біопаливі та порівняльний аналіз конструктивних рішень топкових пристроїв. Оцінювання ефективності роботи топки проводилося з урахуванням теплотворної здатності палива, його вологості та умов подачі повітря в зону горіння.

Типова гравітаційна топка складається з паливного бункера, камери згоряння, колосникових ґрат, системи підведення первинного та вторинного повітря і зольника. Подавання палива здійснюється самопливом, що забезпечує безперервне надходження біопалива до зони активного горіння. Такий підхід дає змогу мінімізувати кількість рухомих елементів і підвищити надійність роботи установки.

Робота гравітаційної топки характеризується послідовним проходженням кількох стадій:

- сушіння палива;
- термічного розкладання (піролізу);
- згоряння летких компонентів і окиснення твердого вуглецевого залишку.

У верхній частині топки відбувається попереднє прогрівання та сушіння шматкового біопалива, тоді як у нижній зоні забезпечується інтенсивне горіння з підведенням первинного повітря через колосникові ґрати. Вторинне повітря сприяє допалюванню летких речовин і зменшенню викидів оксиду вуглецю.

Експериментальні дослідження проводилися на пілотній установці з

гравітаційною топкою, призначеною для спалювання шматкового біопалива, з автоматизованим подаванням палива похилим транспортером з накопичувального бункера, розташованого поруч з модульною котельнею, до паливного бункера топки.

Основними елементами універсальної твердопаливної теплогенерувальної установки «Химера» є:

- паливна камера багатозонного горіння, розрахована на спалювання як дрібнофракційного, так і великофракційного біопалива.
- зона піролізу, у якій при обмеженій подачі первинного повітря відбувається термічний розклад біомаси з утворенням піролізних газів.
- камера допалювання, де за рахунок вторинного та третинного повітря здійснюється повне згоряння газів.
- теплообмінний блок, що забезпечує ефективну передачу тепла теплоносію (вода або повітря).
- система подачі та дозування палива, яка може бути адаптована під різні типи біопалива.
- система автоматики та контролю, що регулює температуру, подачу повітря і паливний режим.

Завдяки модульному підходу конструкція установки може масштабуватися залежно від необхідної теплової потужності.

Однією з ключових переваг установки «Химера» є її здатність працювати на широкому спектрі біопалива, зокрема: деревна тріска та відходи лісоперероблення; пелети та брикети; аграрні відходи (солота, лушпиння соняшнику, качани кукурудзи); суміші різних видів біомаси. Завдяки високотемпературному допалюванню газів суттєво зменшується вміст чадного газу та незгорілих частинок у димових газах. Це робить установку екологічно безпечною та такою, що відповідає сучасним екологічним вимогам.

Теплогенераційна установка «Химера» належить до класу універсальних твердопаливних агрегатів, призначених для виробництва теплової енергії шляхом спалювання біопалива різного походження. Конструкція установки орієнтована на забезпечення:

- високого ККД (понад 85–90 %);
- стабільної роботи при змінних характеристиках палива;
- мінімальних викидів CO, NO<sub>x</sub> та твердих частинок;
- можливості автоматизації процесів подачі палива і керування горінням.

Установка може використовуватися як автономне джерело тепла або інтегруватися в наявні системи теплопостачання.

Установка складається з:

- паливного бункера;

- системи дозування палива;
- гравітаційної камери горіння;
- жаротрубного вертикального теплообмінника з багатоходовою системою проходження димових газів;
- тризонної системи підведення повітря;
- системи відведення продуктів згоряння та блоку автоматичного керування.

Накопичувальний бункер обладнаний механізмом примусового подавання шматкового біопалива, що забезпечує стабільне надходження палива до паливного бункера та камери горіння, що запобігає його зависанню. Камера горіння виконана з жаростійкого матеріалу – сірого чавуну – та має вертикальну конфігурацію, що сприяє рівномірному опусканню палива під дією сили тяжіння. У нижній частині камери розташований зольник для збирання продуктів згоряння.

Підведення повітря реалізовано за комбінованою схемою з подаванням первинного повітря до нижньої зони шару палива та вторинного повітря до зони допалювання летких компонентів. Третинне повітря слугує для компенсування надлишкового тиску в паливному бункері задля запобігання витікання димових газів крізь бункер топки. Інтенсивність подавання повітря регулюється за допомогою вентиляторів із частотним керуванням.

Схема установки «Химера» наведена на рис.1. Конструктивно установка є збірно-зварною конструкцією, що складається з двох циліндричних частин: теплообмінника 1 та камери накопичування теплової енергії 2, які можуть зміщуватись одна відносно одної навколо вертикальної осі котла.

Корпус теплообмінника 1 виконаний у вигляді циліндра із теплоносієм. Камера накопичування теплової енергії 2 містить наглядове віконце 3 для контролю процесу горіння та дверцята 4 для спостереження за горінням та дверцята 5 для чищення золи з зольника, який розташований у нижній частині самої камери накопичування теплової енергії. У верхній частині котла розміщено дверцята для завантаження шматкового палива 6 та збірник газів 7, що виконаний у формі урізаного циліндра, який сприяє кращому аеродинамічному розподіленню газових викидів на виході з жарових труб, а також завантажувальний патрубок 8 для подавання сипкого палива в камеру згоряння та патрубок відведення продуктів горіння 9 до димової труби.

Для зберігання та подавання шматкового палива маємо циліндричну бункер-камеру 10, яка слугує внутрішньою стінкою жаротрубного теплообмінника 11 з турбулізаторами димових газів 12 та спирається на спеціальний пристрій 13.

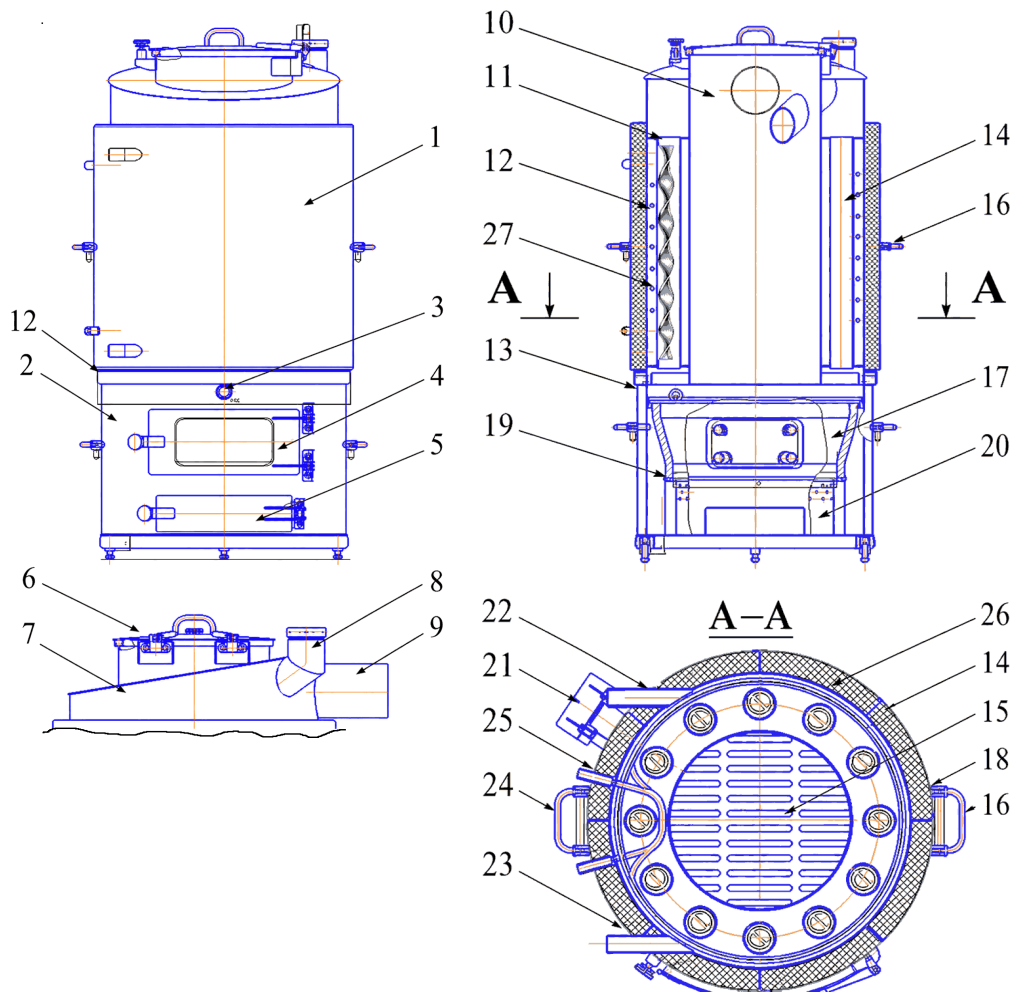


Рис.1 Схема універсального твердопаливного установки «Химера»

Він слугує ущільнювачем та дозволяє регулювати установку теплообмінника відносно камери накопичування теплової енергії до 90° відповідно в обидва боки довкола вертикальної осі котла відносно первинного його встановлення.

Система теплообміну між гарячими продуктами горіння і рідким теплоносієм сформована таким чином, що димові жарові труби теплообмінника 14, якими відводяться продукти горіння – димові газы, – розташовані вертикально за колом між зовнішньою стінкою циліндричного корпусу теплообмінника і циліндричною стінкою бункера для завантаження твердого палива.

Уздовж жарових труб у зоні руху продуктів горіння теплота передається шляхом конвекції та променистого випромінювання крізь стінки труб теплообмінника 14 теплоносієм, який циркулює в кільцевому міжтрубному просторі 15 (переріз А-А).

Теплообмінник може бути виготовлений як одноходовим, так і двоходовим (рис. 2) та триходовим залежно від потужності котла та застосованого палива.

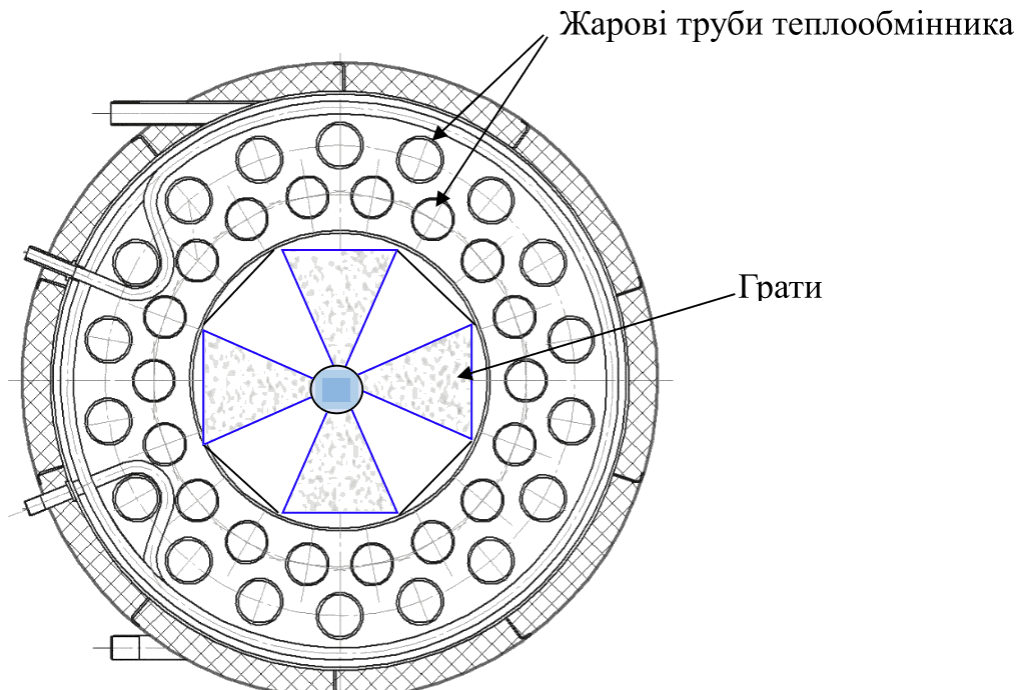


Рис.2. Перетин двоходового теплообмінника установки «Химера»

На корпусах теплообмінника та камери накопичування теплової енергії розташовані транспортувальні ручки 16. У камері накопичування теплової енергії розміщені камера згоряння 17, чавунний колосник 18, на якому встановлено накопичувач теплоти 19, що виконаний у формі урізаного кругового конуса. При цьому камера згоряння може виконувати функцію пальника гранул.

Під колосником розташована камера циліндричної форми для золи – зольник 20, – який має отвори в її верхній частині для підведення повітря під чавунний колосник. Підведення повітря для спалювання палива здійснюється патрубком подавання повітря з засувкою 21, який може мати механічний регулятор відкривання засувки або вентилятор примусового подавання повітря з автоматикою для регулювання.

Корпус теплообмінника має патрубок підведення 22 (оборотної води) та патрубок подавання гарячого теплоносія 23 для опалення, а також патрубок подавання холодної води 24 та патрубок для забирання гарячої води 25 для системи ГВП.

Корпус теплообмінника утеплений утеплювачем 26, який розташований уздовж периметра навколо циліндричного теплообмінника 11. Циліндричний бункер 10 у своїй нижній частині сполучається з камерою згоряння 17 та постачає шматкове паливо під дією сили тяжіння на чавунний колосник 18. Чавунний колосник 18 виконаний з можливістю його замінювання на інший вид залежно від використовуваного типу палива (вугілля, дрова, брикети, гранули, тощо).

Принцип роботи установки «Химера» базується на поєднанні класичного спалювання палива в гравітаційній топці та піролізної технології спалювання газів. На першому етапі біопаливо завантажується в паливний бункер, де відбувається його підсушування та частковий термічний розклад.

У зоні піролізу утворюються горючі гази, які спрямовуються в камеру допалювання. Подання точно дозованої кількості вторинного повітря забезпечує повне окиснення газів при високій температурі. Це дозволяє максимально використати енергетичний потенціал палива.

Отримана теплота передається теплоносію через систему жарових труб у теплообміннику, після чого воно може використовуватися для опалення, гарячого водопостачання або технологічних потреб.

Котел працює наступним чином. Для розпалювання основного палива на чавунний колосник 18 складають легкозаймисте паливо, наприклад дерев'яні щепи, стружку та ін. Після розпалювання і прогрівання вертикальний циліндричний бункер 10 заповнюють твердим паливом. Тверде паливо, яке завантажено зверху крізь дверцята 6, або сипке паливо, яке завантажується патрубком завантаження 8, розміщується на чавунному колосникові 18 і під дією сили тяжіння під кутом природного укусу надходить на периферійну ділянку чавунного колосника. Подання первинного повітря здійснюється патрубком подавання повітря 21 потім отворами в корпусі зольника 20 та крізь усю площу чавунного колосника 18 до камери згорання 17. Частина підігрітого вторинного повітря спрямовується догори між камерою накопичування теплової енергії 19 і корпусом котла до камери згорання 17. Продукти згорання твердого палива надходять крізь димові циліндричні жарові труби 14 теплообмінника 11, віддають теплоту крізь стінку шляхом конвекції теплоносію 15, при цьому нагрівають його до необхідної температури, яка контролюється термометром. Після цього димові гази надходять до кришки газовідведення 7 і виходять до димової труби патрубком 9.

Процес горіння в периферійній зоні камери згорання 17 протікає більш інтенсивно, ніж у центральній зоні камери згорання. Під час горіння зола, яка утворилася на чавунному колоснику в процесі горіння твердого палива, надходить під дією сили тяжіння до камери зольника 20. Гази горіння частку своєї теплоти передають шару палива, яке знаходиться в нижній частині циліндричного бункера для завантаження шматкового палива, яке вже підсушеним і підігрітим надходить до зони горіння.

Опалювальний котел має ККД 85-90 % залежно від типу палива та його вологості, температура теплоносія може становити до 85 °С, а температура одержуваної гарячої води може становити від 30 °С до 50 °С, періодичність обслуговування котла – один раз протягом 4...12 годин залежно від якості



Основним завданням системи є підтримання заданої теплової потужності котельні за мінімальних теплових і екологічних втрат.

У системі керування використовуються такі основні датчики:

- давачі температури теплоносія на подачі та звороті котла;
- давачі температури димових газів;
- давачі температури димових газів у топці котла, або давачі концентрації кисню, або оксиду вуглецю в димових газах;
- давачі рівня палива в бункері;
- давачі положення виконавчих механізмів подавання палива.

Отримана з давачів інформація передається до PLC для подальшого оброблення та формування керівних сигналів.

Регулювання теплової потужності котельні здійснюється за допомогою Т-регулятора, реалізованого програмно в PLC. Як керований параметр зазвичай використовується температура газів у топці котла або температура теплоносія, може використовуватись і тепла потужність, а керівними впливами є витрата повітря та швидкість подавання палива.

PLC виконує такі основні функції:

- збирання й оброблення сигналів від давачів;
- реалізацію алгоритмів ПД-регулювання;
- керування виконавчими механізмами подачі палива та повітря;
- захист обладнання в аварійних режимах;
- реєстрацію та архівування робочих параметрів.

Застосування PLC у поєднанні з Т-регулятором забезпечує підвищення стабільності горіння, зменшення викидів продуктів неповного згорання та збільшення середнього експлуатаційного ККД котельні.

Алгоритм керування реалізується в PLC (модуль програмованого логічного контролера) та передбачає такі основні етапи:

1. Задання режиму роботи – оператор або система верхнього рівня задає необхідну теплову потужність або температуру теплоносія;
2. Збирання інформації – PLC отримує сигнали від давачів температури, складу димових газів і рівня палива;
3. Обчислення відхилення – визначається похибка між заданим і фактичним значенням регульованого параметра;
4. Т-регулювання – на основі Т-алгоритму формується керівний вплив на подавання палива та повітря;
5. Керування виконавчими механізмами – змінюється швидкість конвеєра або положення шибера та частота обертання вентиляторів;
6. Контролювання безпеки – у разі виходу параметрів за допустимі межі система переходить у захисний або аварійний режим;

7. Коригування режиму – алгоритм працює в замкненому контурі до досягнення стабільного режиму горіння;

Запропонований алгоритм забезпечує узгоджене подавання палива й повітря, що дозволяє підтримувати оптимальний коефіцієнт надлишку повітря та мінімізувати втрати від хімічного недопалу.

Спалювання біопалива в гравітаційних топках характеризується умовною вуглецевою нейтральністю, оскільки викинутий  $\text{CO}_2$  компенсується його поглинанням рослинами в процесі зростання. Основну увагу слід приділяти зменшенню викидів продуктів неповного згоряння, що досягається стабілізуванням температурного режиму та достатнім підведенням вторинного повітря.

Подальший розвиток технології пов'язаний з удосконаленням систем автоматизації, підвищенням надійності роботи та залученням системи накопичення теплової енергії.

Для оцінювання режимів роботи гравітаційної топки установка оснащена комплексом вимірювальних приладів. Температурний режим контролювався за допомогою термопар, установлених у зоні горіння (зоні допалювання) та на виході продуктів згоряння. Температура теплоносія вимірювалася на вході та виході з теплообмінника.

Витрата первинного, вторинного й третинного повітря визначалася за даними, які надходили до блока автоматичного керування та висвітлювалися на його табло. Для контролю якості згоряння використовувався газоаналізатор Testo 330LL, що забезпечував вимірювання концентрацій  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$  та  $\text{CO}_2$  в димових газах.

Подавання палива реєструвалося шляхом вимірювання часу роботи живильного механізму та маси палива, що надходила до камери горіння за визначений проміжок часу. Усі вимірювальні сигнали передавалися до системи збирання даних, що дозволяло здійснювати безперервний моніторинг і збереження експериментальних даних.

Як паливо в експериментах використовувалося шматкове біопаливо деревного походження з середнім розміром часток у діапазоні, характерному для гравітаційних топкок. Вологість палива визначалась приладом для визначення вологи в шматковому паливі АВД 6100, а теплота згоряння — відповідно до вимог стандарту ISO 1928.

Перед початком досліджень біопаливо проходило попереднє підготовлення, що передбачало відбирання фракцій із близькими геометричними параметрами та видалення сторонніх домішок. Це дозволило зменшити вплив випадкових факторів на результати експериментів і підвищити

їхню відтворюваність.

Дослідження проводились у стаціонарних режимах роботи установки за різних значень теплового навантаження. Для кожного режиму здійснювалося налаштування інтенсивності подавання палива та повітря з подальшим виведенням установки на квазістаціонарний стан.

Після стабілізування температурного режиму проводилося записування основних параметрів: температур у характерних точках, витрат палива й повітря, а також складу димових газів. Тривалість одного вимірювального циклу становила не менше 20...30 хв, що забезпечувало усереднення короткочасних флуктуацій процесу горіння.

Особливу увагу приділяли оцінюванню впливу автоматизованого подавання палива на стабільність температури в камері горіння та концентрацію оксиду вуглецю в димових газах. Для цього порівнювалися режими з різною інтенсивністю та алгоритмами керування подаванням палива.

Оброблення результатів експериментів здійснювалося шляхом статистичного аналізування отриманих даних. Для кожного режиму визначалися середні значення вимірюваних параметрів та їхні відхилення. На основі експериментальних даних розраховувалися теплові та енергетичні показники роботи гравітаційної топки, зокрема питомі витрати палива та ефективність процесу згоряння.

Одержані результати використовувалися для оцінювання ефективності автоматизованого подавання шматкового біопалива та формування рекомендацій щодо оптимізування режимів роботи гравітаційної топки.

Результати експериментальних досліджень показали, що застосування автоматизованого подавання шматкового біопалива забезпечує стабільний температурний режим у камері горіння гравітаційної топки в широкому діапазоні теплових навантажень. Після виходу установки на квазістаціонарний режим коливання температури в зоні горіння були в межах 720...850 °C та не перевищували допустимих значень, характерних для процесів спалювання твердого біопалива.

За збільшення інтенсивності подачі палива спостерігалось пропорційне зростання середньої температури в камері горіння, що свідчить про адекватну реакцію системи керування на зміну теплового навантаження. При цьому автоматичне регулювання подавання повітря дозволяло уникати різких температурних піків, які характерні для топок із ручним подаванням палива.

Отримані результати підтверджують, що гравітаційний принцип переміщення шматкового біопалива в поєднанні з автоматизованим подаванням сприяє формуванню стійкої зональної структури шару палива, що є

передумовою стабільного горіння.

Аналіз складу димових газів показав, що в режимах із автоматизованим подаванням палива концентрація оксиду вуглецю істотно знижувалася порівняно з перехідними та нестабільними режимами. Це свідчить про ефективне допалювання летких продуктів піролізу в зоні вторинного повітря.

Найменші значення концентрації CO спостерігалися за узгодженої роботи систем подавання палива та повітря, коли підтримувався оптимальний коефіцієнт надлишку повітря. У таких умовах процес горіння характеризувався рівномірним тепловиділенням та відсутністю локальних зон недопалу.

У режимах з недостатньою інтенсивністю подавання вторинного повітря фіксувалося зростання концентрації CO, що підтверджує важливість правильного налаштування повітророзподільної системи для гравітаційних топок.

Експериментальні дані показали, що автоматизоване подавання шматкового біопалива забезпечує плавну зміну теплової потужності установки без різких коливань температури теплоносія. Це є особливо важливим для систем теплозабезпечення, що працюють у змінних режимах навантаження.

Порівняльний аналіз режимів роботи показав, що при автоматичному дозуванні палива досягається більш рівномірна витрата біопалива в часі. Це сприяє підвищенню загальної енергоефективності установки та зменшенню питомих витрат палива.

Отримані результати підтверджують доцільність використання автоматизованих систем подавання в гравітаційних топках, особливо при роботі зі шматковим біопаливом змінної якості.

Під час експериментів встановлено, що фізичні властивості шматкового біопалива, зокрема вологість та геометричні розміри часток, істотно впливають на стабільність процесу горіння. Зі збільшенням вологості палива спостерігалася зниження температури в зоні горіння та збільшення часу виходу установки на стаціонарний режим.

Водночас автоматизована подача дозволяла частково компенсувати негативний вплив змінних властивостей палива шляхом коригування його витрати та режимів подавання повітря. Це підтверджує адаптивність досліджуваної системи до умов експлуатації, характерних для реальних об'єктів теплозабезпечення.

Отримані експериментальні результати свідчать, що робота гравітаційної топки з автоматизованим подаванням шматкового біопалива відповідає основним вимогам, встановленим нормативними документами щодо стабільності горіння та екологічних показників. У досліджуваних режимах досягалася зниження концентрацій продуктів неповного згорання, що є

важливим з огляду екологічної безпеки.

Порівняння результатів із даними, наведеними в літературних джерелах, показує, що застосування автоматизованого подавання дозволяє підвищити повторюваність режимів роботи та зменшити залежність процесу горіння від людського фактора.

На основі проведених експериментальних досліджень встановлено, що гравітаційна топка з автоматизованим подаванням шматкового біопалива забезпечує стабільний температурний режим, ефективне допалювання летких компонентів і можливість плавного регулювання теплової потужності. Отримані результати підтверджують ефективність поєднання гравітаційного принципу спалювання з сучасними системами автоматичного керування та обґрунтовують доцільність подальшого впровадження таких установок у практику теплозабезпечення.

**Висновки.** Проведений аналіз наукових джерел показав, що пряме спалювання шматкового біопалива залишається одним із найбільш доступних і технологічно доцільних способів його енергетичного використання в установках малої та середньої потужності, а гравітаційні топки є перспективним технічним рішенням для таких систем. Експериментальні дослідження підтвердили, що поєднання гравітаційного принципу переміщення палива з автоматизованим подаванням забезпечує стабільний температурний режим у камері горіння та формування стійкої зональної структури шару шматкового біопалива. Це сприяє більш повному згорянню палива та зменшенню коливань теплової потужності установки. Встановлено, що застосування автоматизованої системи подачі та керування істотно підвищує стабільність процесу горіння, знижує концентрацію продуктів неповного згоряння в димових газах і забезпечує узгоджену роботу систем подавання палива та повітря. Особливо важливим є зменшення впливу змінних властивостей шматкового біопалива, як-от вологість і нерівномірність геометричних розмірів, на роботу топки. Показано, що автоматизоване подавання палива дозволяє реалізувати плавне регулювання теплового навантаження без різких температурних коливань, що є важливим для практичного використання гравітаційних топок у системах теплозабезпечення з несталими режимами роботи. Отримані результати узгоджуються з чинними нормативними вимогами щодо енергоефективності та екологічних показників твердопаливних установок. Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що гравітаційна топка з автоматизованим подаванням шматкового біопалива є ефективним і технологічно обґрунтованим рішенням для використання відновлюваних паливних ресурсів.

**Перспективи подальших досліджень.** Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізування алгоритмів автоматичного керування, розширення діапазону досліджуваних видів біопалива та оцінювання довготривалої надійності роботи установки в реальних умовах експлуатації.

### References

1. Yin, Chungun. “Biomass Combustion Modeling for Small-Scale Boilers: A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, 2016, pp. 1366–1379.
2. Nussbaumer, Thomas. “Combustion and Co-Combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction.” *Energy & Fuels*, vol. 31, no. 3, 2017, pp. 2197–2215. <https://doi.org/10.1021/ef030031q>
3. Mandø, Matthias, and Lars A. Rosendahl. “On Modeling and Optimization of Fixed-Bed Biomass Combustion.” *Renewable Energy*, vol. 101, 2017, pp. 239–249.
4. Senchuk, M., and M. Astafieva. “Modeliuvannia Protsesu Horinnia Tverdoho Palyva v Shakhtno-Sharovykh Topkakh.” *Ventyliatsiia, Osvitlennia ta Teplohazopostachannia*, no. 18, 2015, pp. 22–29.
5. Trehubov, D. H., et al. *Teoriia Protsesiv Horinnia, Vybukhu ta Pozhezhohasinnia: Praktykum*. NUTsZ Ukrainy, 2024.
6. Turns, Stephen R. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*. 3rd ed., McGraw-Hill, 2012.
7. Li, H., and X. Wang. “CFD Simulation of Biomass Combustion in a Fixed-Bed Furnace.” *Fuel*, vol. 268, 2020, article 117337.
8. Arena, Umberto. “Process and Technological Aspects of Biomass Gasification.” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 69, 2019, pp. 31–69.
9. *Bioenerhetyka: Tekhnolohii, Obladnannia, Perspektyvy*. Edited by O. M. Karpuk, NUBiP Ukrainy, 2019.
10. Nussbaumer, Thomas. *Low Emission Biomass Combustion in Automated Boilers for Heat and Power*. IEA Bioenergy, 2024.
11. Stepanov, D. V., and L. A. Bodnar. *Enerhetychna ta Ekolohichna Efektyvnist Vodohriinykh Kotliv Maloi Potuzhnosti*. VNTU, 2011.
12. Zadravec, T., B. Rajh, and F. Kokalj. “CFD Modelling of Air Stages Combustion in a Wood Pellet Boiler Using the Coupled Modelling Approach.” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 20, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100715>
13. Falendysh, A. P., O. V. Kletska, and Ye. A. Bitiura. “Model Rozrakhunku Tverdopalyvnoho Kotla Nevelykoi Potuzhnosti.” *Zbirnyk Naukovykh Prats*

- Ukrainskoho Derzhavnoho Universytetu Zaliznychnoho Transportu*, no. 166, 2016, pp. 185–190.
14. Bodnar, L. A., and D. V. Stepanov. “Osoblyvosti Rozrakhunku Vodohriinykh Kotliv Serednoi Potuzhnosti na Tristsi Derevyny.” *Visnyk Vinnytskoho Politekhnichnoho Instytutu*, no. 3, 2025, pp. 56–62. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-180-3-56-62>
  15. Heletukha, H. H. *Naukovo-Tekhnichni Zasady Vyrobnystva Enerhii z Biologichnykh Vydiv Palyva*. Doctoral dissertation, Instytut Tekhnichnoi Teplofizyky NAN Ukrainy, 2021.
  16. Ronewicz, K., T. Turzynski, and D. Kardas. “Design and Distribution of Air Nozzles in the Biomass Boiler Assembly.” *Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery*, no. 125, 2013, pp. 13–28.
  17. Bodnar, L. A., D. V. Stepanov, and A. N. Dovgal. “Experimental Investigations of the Energy and Environmental Indices of Operation of a Low Capacity Combined Gas Producer and Hot-Water Boiler.” *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 88, Aug. 2015, pp. 962–967.
  18. Dolinskyi, A. A. *Teploenerhetyka ta Teplotekhnichni Ustanovky*. Naukova Dumka, 2018.
  19. Basu, Prabir. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*. Academic Press, 2018.
  20. Van Loo, Sven, and Jaap Koppejan. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Earthscan, 2017.
  21. Obernberger, Ingwald, and Gerold Thek. *Combustion and Gasification of Solid Biomass*. Springer, 2019.
  22. DSTU EN 303-5:2016. *Kotly Opaliuvalni. Kotly dlia Tverdoho Palyva*. DP “UkrNDNTs”, 2016.
  23. Kravchenko, V. P. *Ekologichni Aspekty Spaliuvannia Biopalyva*. KhNUMH, 2020.
  24. Nalyvaiko, V. H., and M. M. Herhel. *Universalnyi Opaliuvalnyi Kotel*. Utility Model Patent UA 113982, 27 Feb. 2017.
  25. Nalyvaiko, V. H. *Universalnyi Vodohriinyi Tverdopalyvnyi Kotel*. Utility Model Patent UA 140557, 10 Mar. 2020.

УДК 662.6:697.3

PhD, Assoc. Prof. **Vadym Nalyvaiko**,  
[vadim.moris@gmail.com](mailto:vadim.moris@gmail.com), ORCID: 0000-0003-4452-6111,  
*Kyryvi Rih National University*

PhD, Assoc. Prof. **Viktoriia Konovaliuk**,  
[konovaliuk.va@knuba.edu.ua](mailto:konovaliuk.va@knuba.edu.ua), ORCID: 0000-0001-5115-7188,  
*Kyiv National University of Construction and Architecture*

PhD, Assoc. Prof. **Pavlo Kirichenko**,  
[pasha129@knu.edu.ua](mailto:pasha129@knu.edu.ua), ORCID: 0009-0007-4031-7693,

PhD **Valerii Savin**,  
[savinvv@knu.edu.ua](mailto:savinvv@knu.edu.ua), ORCID: 0009-0008-6013-7371,  
*Kyryvi Rih National University*

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.214-233>

## DEVELOPMENT OF DESIGN SOLUTIONS FOR A UNIVERSAL SOLID-FUEL HEAT-GENERATING UNIT WITH A GRAVITY-FED SHAFT FURNACE FOR LUMP BIOMASS COMBUSTION

**Abstract.** *The article considers the design of the universal solid-fuel heat-generating installation "Khymera" featuring an annular combustion chamber, a "dry" cylindrical gravity shaft furnace with layered fuel combustion on cast-iron grates, and cast-iron cylindrical thermal accumulators. It utilizes a self-regulating sectional supply of primary and secondary air to the combustion zone and a fire-tube three-pass vertical heat exchanger for efficient heat extraction from flue gases. This installation is designed for highly efficient combustion of lumpy biofuel of various origins and reliable heating of premises. The design features of the heat-generating installation, its operating principle, fuel flexibility, and environmental advantages are analyzed. It is shown that the application of multi-zone combustion technology and the afterburning of pyrolysis gases allows achieving high thermal efficiency and reducing the level of harmful emissions. The developed "Khymera" installation combines classic combustion in a gravity furnace with multi-zone combustion technology and pyrolysis gas afterburning. The air supply system is implemented using a three-zone scheme (primary, secondary, and tertiary air), which ensures complete oxidation of volatile components at high temperatures. It has been experimentally proven that the automated supply of lumpy biofuel ensures a stable temperature regime in the combustion chamber within 720–850 °C and smooth regulation of the thermal load without sharp fluctuations. It has been established that high-temperature afterburning significantly reduces the concentration of carbon monoxide (CO) and unburned particles, while the overall efficiency of the installation reaches 85–90%. Automation also made it possible to partially compensate for the*

*negative impact of increased fuel moisture on combustion stability through timely adjustment of air consumption. A gravity furnace with an automated supply of lumpy biofuel is an effective, technologically sound, and environmentally safe solution for heat supply systems. The integration of PLC control in combination with pyrolysis-diffusion combustion schemes significantly increases combustion stability, reduces dependence on the human factor, and minimizes losses from chemical underburning, ensuring the installation complies with modern strict environmental and energy requirements.*

**Key words:** *biofuel, solid fuel heat generating plant, gravity mine furnace, pyrolysis, energy efficiency, renewable energy.*

Received/Надійшла до редакції 03.05.2026

Accepted/Прийнято 15.05.2026

Issued/Опубліковано 29.05.2026

 Distributed under the license / Розповсюджується за ліцензією:

*Creative Commons Attribution 4.0 International License*