

УДК 620.9:621.311

ТЕХНОЛОГІЇ СПАЛЮВАННЯ ДЕРЕВНИХ ВІДХОДІВ У КОТЛАХ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

Асп. Р. Л. Джиоєв

TECHNOLOGIES OF WOOD WASTE INCINERATION IN LOW POWER BOILERS

Postgraduate student R. L. Dzhyoiev

Анотація. Наведено аналіз способів спалювання деревних відходів, відходів рослинного походження, біомаси та їх енергетичний потенціал. Вивчалися можливості реконструкції та модернізації газових котельних агрегатів України на спалювання біомаси та деревних відходів. Розроблено схему твердопаливної когенераційної енергетичної установки (міні-ТЕЦ) зі спалюванням деревних відходів.

Ключові слова: деревні відходи, біомаса, технології спалювання, когенерація.

Abstract. The analysis of ways of burning wood waste and waste of vegetable origin, biomass and their energy potential are given. Possibilities of reconstruction and modernization of gas boiler units of Ukraine about burning biomass and wood waste were studied. The scheme of solid fuel cogeneration power plant with wood waste incineration has been developed. The high energy intensity of Ukraine's GDP and the lack of its own fuel resources determine its dependence on energy supplies. Therefore, the current policy of involving local fuels and renewable energy sources (RES) in the fuel and energy balance of municipal and municipal energy. The use of wood and plant biomass waste in the housing system (boilers) will reduce the consumption of imported natural gas. Modern technologies provide efficient incineration of wood waste, but their use is determined by the characteristics of fuel and capacity of commercial boilers. The most effective methods and technologies of thermal processing of wood waste are being developed. High gas prices in 2021 are caused by rising prices for rare earth metals and other elements used in renewable energy: lithium by 400 %, silicon – 300 %, aluminum – 37 %, cobalt – 85 %, neodymium – 58 %, magnesium - 9, copper – 25 %, zinc and nickel – 25 %.

Renewable energy also needs the resources from which windmills and solar panels are made. 70 % of windmills and solar panels are made of metals and alloys and their cost will affect the cost of generating new RES capacity.

Analysis of the reasons for the increase in prices for components for RES shows that with rising prices for fossil fuels (gas, oil, coal) and increasing construction of RES, prices for lithium, cobalt and other elements increase. At the same time, rare earth reserves are limited and concentrated in several countries (China, Austria, Bolivia, Chile, Brazil, Congo) and therefore these countries have a stricter pricing policy.

Keywords: wood waste, biomass, combustion technologies, cogeneration.

Вступ. Висока енергоємність ВВП України та недостатність власних паливних ресурсів визначає залежність від постачання енергоносіїв. Тому сьогодні актуальна

політика залучення місцевих палив та відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у паливно-енергетичний баланс комунальної та муніципальної енергетики. Використання

деревних та рослинних відходів біомаси в системі ЖКГ (котельних установках) дозволить знизити споживання природного газу, що імпортується. Сучасні технології забезпечують ефективне спалювання деревних відходів, проте їх застосування визначається характеристиками палива і потужністю комерційних котельних агрегатів. Розробляються найефективніші методи та технології термічної переробки деревних відходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Визначення біомаси як сировини для енергетичного використання міститься у Законі України «Про альтернативні види палива» [1].

У 2030 р. частка ВДЕ у системах опалення та охолодження має становити понад 36 % у країнах ЄС.

У [2] розроблено дорожню карту стратегії розвитку біоенергетики. Довгостроковий сценарій розвитку біоенергетики України вказує на досягнення не менше 60 % ВДЕ в енергобалансі у 2050 р.

Енергетичні деревні відходи включають: паливні деревини, порубкові залишки, відходи деревообробки, а також сухостій, деревини із захисних лісосмуг, відходи від обрізки та викорчування багаторічних сільськогосподарських насаджень.

У [2] наведені дані та оцінка енергетичного потенціалу деревної біомаси в Україні (табл. 1).

Таблиця 1

Енергетичний потенціал деревної біомаси

Складові потенціалу деревної біомаси	Підходи до оцінки потенціалу
Паливна деревина	Щорічні статистичні дані (до 2018 р. статистика надавала дані з обсягу дров для опалення)
Порубкові залишки	14 % від об'єму заготівлі круглого лісу (до 2018 р. ~20 % порубкових решток мало залишитися в лісі)
Відходи деревообробки	Статистичні дані (щорічні)
Сухостій	Береться запас сухою в лісах зі середньоквадратичною похибкою 10–15 % згідно з даними НУБіП та експертним припущенням, що лише 25 % загального потенціалу сухою є технічно досяжним та економічно доцільним для утилізації протягом 10 років
Деревина із захисних лісосмуг	Відповідно до площі полезахисних лісосмуг (ПЗЛС) та лісосмуг вздовж автомобільних доріг та залізниць, з оцінкою загального запасу деревини (вихід 150 щ.м ³ /га) та необхідності їх реконструкції протягом 10–20 років
Відходи від обрізки та викорчування багаторічних с/г насаджень	Виходячи із площі насаджень, утворення відходів (т/га) згідно з літературними даними чи польовими вимірюваннями (є відповідна методика проведення вимірювань). Обрізка: 2,5–3 т/га; викорчування: 30 т/га (протягом 5 років)

Енергетичний потенціал біомаси становить 23 млн т н. е./р. (дані 2018 р.), у тому числі деревна біомаса становить 3,08 млн т н. е./р.

Основними складовими енергетичного потенціалу біомаси є сільськогосподарські залишки (40 %), а також енергетичні культури (32 %). В структурі енергетичного

потенціалу деревної біомаси половину займає паливна деревина.

За даними [2], енергетичний потенціал біомаси збільшиться до 45 млн т н. е./рік у 2050 р. (табл. 2).

Таблиця 2

Прогноз енергетичного потенціалу біомаси в Україні у 2050 р.

Вид біомаси	Теоретичний потенціал, млн т	Потенціал, доступний для енергетики (економічний)	
		Частка теоретичного потенціалу, %	млн т н. е.
Солома зернових колосових культур*	49,2	30	5,04
Солома ріпаку	4,9	40	0,68
ПП кукурудзи (стебла, стрижні)*	58,1	40	4,45
ПП виробництва соняшника (стебла, корзинки)	26,9	40	1,54
Вторинні с/г залишки (лушпиння соняшника)	2,4	100	1,00
Деревна біомаса (паливна деревина, порубкові залишки, відходи деревообробки)*	12,3	96	2,88
Деревна біомаса (сухостій, деревина із захисних лісосмуг, відходи ОВБСН)	8,8	45	1,02
Біодизель (з ріпаку)	-	-	0,39
Біоетанол (з кукурудзи і цукрового буряку)	-	-	0,82
Біогаз з відходів та ПП АПК*	8,4 млрд м ³ СН ₄	83	5,92
Біогаз з ТПВ*	0,7 млрд м ³ СН ₄	70	0,42
Біогаз зі стічних вод (промислових та комунальних)*	0,4 млрд м ³ СН ₄	31	0,11
Енергетичні культури*:			
- верба, тополя, міскантус**	34,5	100	14,65
- кукурудза (на біогаз)**	7,5 млрд м ³ СН ₄	100	6,43
Всього	-	-	45,35

* Складові потенціалу біомаси, ріст яких очікується до 2050 р. Інші складові, згідно з консервативним підходом, залишені на рівні значень потенціалу 2018 р.

** За умови вирощування на 2 млн га незадіяних с/г земель.

За даними ІГНАУ, у структурі споживання первинних енергоресурсів України частка природного газу становить 42 % (2010 р.), а в країнах ЄС – 24,5 %, частка ВДЕ становить близько 2 %.

Потенціал біомаси, доступний для виробництва в Україні, включає (млн т у. т./р.) солому зернових культур – 3,63, кукурудзу – 1,19, стебла та лушпиння соняшника – 2,31, відходи деревини – 1,59.

Енергетичний потенціал деревних відходів. Деревина складається з органічних речовин (до 99 % від загальної маси). Елементарний хімічний склад деревини різних порід майже однаковий. Суха деревина містить 49–50 % вуглецю, 44–45 % кисню, 5–6 % водню, 0,1–0,3 % азоту. При спалюванні деревини залишається її неорганічна частина – зола. До складу золи входить

кальцій, калій, натрій, магній та інші елементи.

У сухому вигляді основними складовими деревини є целюлоза, лігнін, геміцелюлоза, екстракти та різноманітні золютворювальні мінерали.

Основним компонентом є целюлоза, що становить близько 50 % загальної маси. Целюлоза є високомолекулярним важким полімером $(C_6H_{10}O_5)_{nn}$, де n – ступінь полімеризації, що дорівнює 6000–14000. Целюлоза стійка речовина, нерозчинна у воді та органічних розчинниках (спирт, ефір).

Лігнін є хімічним компонентом деревини, кількість змінюється від сорту деревини. М'які сорти містять близько 20–35 % лігніну, у твердих сортах вміст лігніну становить близько 15–25 %. Лігнін є макромолекулярною складовою, хімічно

нестійкий, легко окислюється, взаємодіє з хлором, розчиняється при нагріванні в лугах, водних розчинах сірчистої кислоти та її кислих солей.

Геміцелюлози це група полісахаридів, до якої входять пентозани $(C_5H_8O_4)_{nn}$ та гексозани $(C_6H_{10}O_3)_{nn}$. Ступінь полімеризації у геміцелюлози становить від 60 до 200.

Крім основних органічних речовин, у деревині міститься невелика кількість екстрактивних речовин (таніди, смоли, пектини, жири та ін.), розчинних у воді, спирті та ефірі.

Гранулометричний склад подрібнених деревних відходів змінюється від 315 мкм до 5000 мкм.

Хімічний склад різних порід деревини наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Хімічний склад деревини

Порода Склад	Дуб	Сосна	Береза	Бук
Вуглець, С, %	50,2	50,2	48,9	49,0
Кисень, О, %	43,4	43,3	44,6	44,3
Водень, Н, %	6,0	6,1	6,1	6,1
Азот, N, %	-	0,2	0,1	0,1
Сірка, S, %	0,01	0,01	0,01	0,01
Зола, %	0,4	0,2	0,3	0,5

Вологість деревини становить близько 57 %. Деревина є високореакційним паливом із виходом летючих близько 80 %. Деревина містить золютворюючі компоненти (лужні елементи) у кількості 0,2–0,5 %. Температура розм'якшення золи становить близько 1300 °С. Кора містить близько 6 % золи.

Теплота згоряння різних порід дерева становить від 187 до 197 МДж/кг.

Теплота згоряння деревини залежить від робочої вологості. Так, при вологості деревини 57 % теплота згоряння становить 6,18 МДж/кг, а за вологості 5–8 % теплота згоряння становить 16,2–16,8 МДж/кг.

Теплота згоряння деревних відходів становить:

- тирса $Q_{H}^p = 15,5$ МДж/кг;
- кора $Q_{H}^p = 8,8$ МДж/кг
- суки $Q_{H}^p = 8,4$ МДж/кг;
- пні $Q_{H}^p = 9,6$ МДж/кг.

Термічне розкладання деревних відходів відбувається за температури від 160 °С до 300 °С.

Склад газів (летючих) при термічному розкладанні деревини (при 700 °С):

- $CO_2 = 38,5\%$; $CO = 25,2\%$; $CH_4 = 24,9\%$;
- $C_2H_4 = 8,5\%$; $H_2 = 2,8\%$.

Щільність деревини змінюється від 460 кг/м³ (сосна) до 650 кг/м³ (дуб). Низька щільність деревини та парусність частинок (діаметром понад 400 мкм) визначають низьку швидкість витання частинок та їх віднесення з топкового обсягу, що визначає

теплові втрати при спалюванні деревини та деревних відходів.

Оцінка можливості спалювання деревних відходів залежно від вологості та зольності визначається заштрихованою зоною трикутника Таннера (рис. 1).

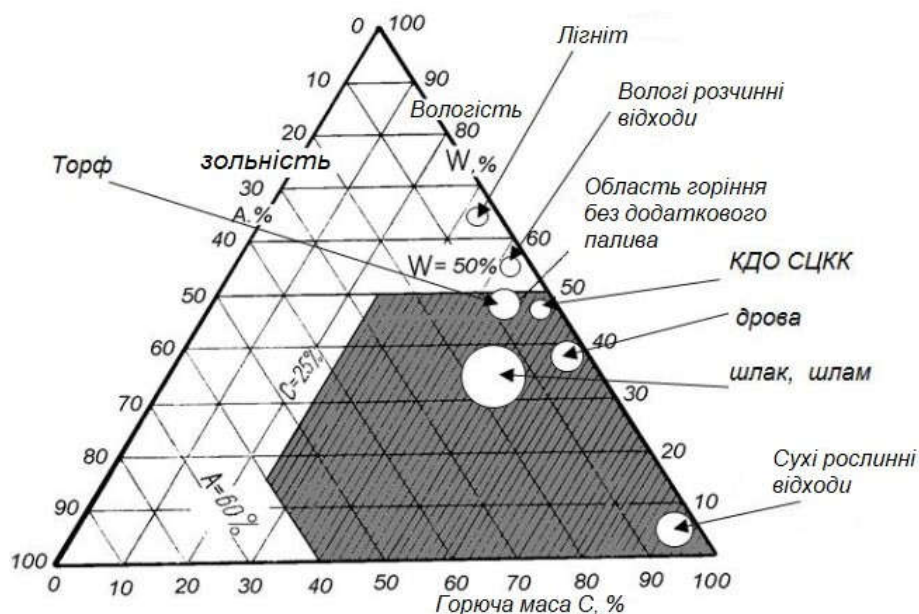


Рис. 1. Трикутник Таннера

Розвиток біоенергетичних технологій спрямовано на встановлення такого обладнання: деревоспалювальні станції систем централізованого тепlopостачання потужністю 1–10 МВт, промислові деревоспалювальні котли потужністю 0,1–5 МВт, мініТЕЦ потужністю 1–10 МВт.

Визначення мети і завдання дослідження. Метою цієї роботи є розробка теплової схеми когенераційної енергетичної установки для спалювання деревних відходів.

Для досягнення сформульованої мети необхідно виконати аналіз технологій спалювання різних паливних відходів та розробити схему когенераційної (комбінованої) енергетичної установки, яка відрізняється більшою тепловою ефективністю та незалежністю від відстані до споживачів.

Основна частина дослідження.

Огляд технологій спалювання деревних відходів [3–14] показує, що для спалювання деревних відходів застосовуються шарові механічні топки, топки з киплячим шаром і вихрові топки.

Серед механічних топок найефективнішими є топки фірми WELLONS.

Технологія WELLONS спалювання деревного палива з валами-колосниками, що обертаються, показана на рис. 2. Випускаються парові котли продуктивністю від 10 т/год до 110 т/год.

Випускаються котли з топками із киплячим шаром [10]. На рис. 3 показано камерну топку з киплячим шаром. Циркуляція топкових газів та вторинного повітря – у вертикальній площині топкового об'єму.

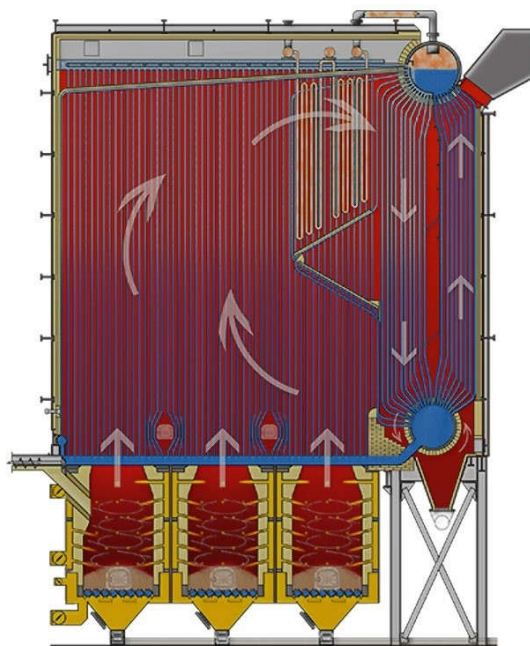


Рис. 2. Топка WELLONS з колосниками, що обертаються

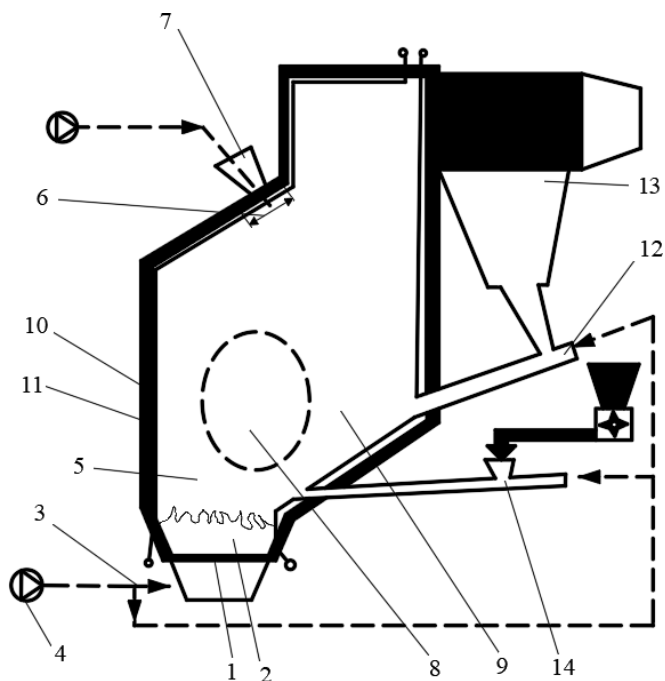


Рис. 3. Схема топки шарового спалювання твердого палива та вертикальною циркуляцією над шаром [10]:

- 1 – повітророзподільні решітки; 2 – киплячий шар; 3 – лінія подачі повітря;
- 4 – вентилятор; 5 – надшаровий об'єм топки; 6 – ділянка подачі повітря; 7 – сопло подачі вторинного повітря;
- 8 – умовна зона обертання; 9 – застійна зона; 10 – обмуровка; 11 – топкові екрани; 12 – ежектор повернення виносу;
- 13 – бункер; 14 – система подачі палива; 15 – лінія подачі вторинного повітря

На рис. 4 показана топка з киплячим шаром і горизонтальним рухом газів і частинок над киплячим шаром, що забезпечує зниження винесення частинок і повніше їх спалювання.

На рис. 5 показана топка жаротрубного котла з киплячим шаром.

Схема топки котла із внутрішньою та зовнішньою циркуляцією показана на рис. 6.

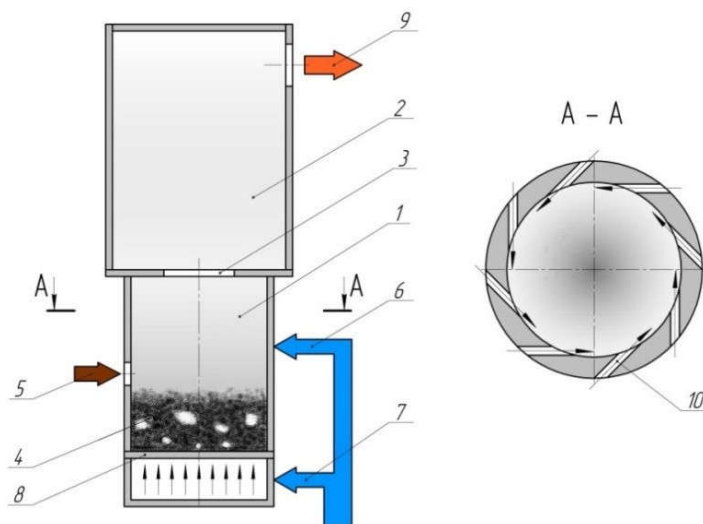


Рис. 4. Схема топки [11]:

1 – камера згоряння (вихрова камера); 2 – камера догоряння; 3 – пережим; 4 – киплячий (нерухомий) шар; 5 – введення палива; 6 – тангенціальне введення вторинного повітря; 7 – введення первинного повітря; 8 – газорозподільні ґрати; 9 – відведення продуктів горіння; 10 – сопла введення вторинного повітря

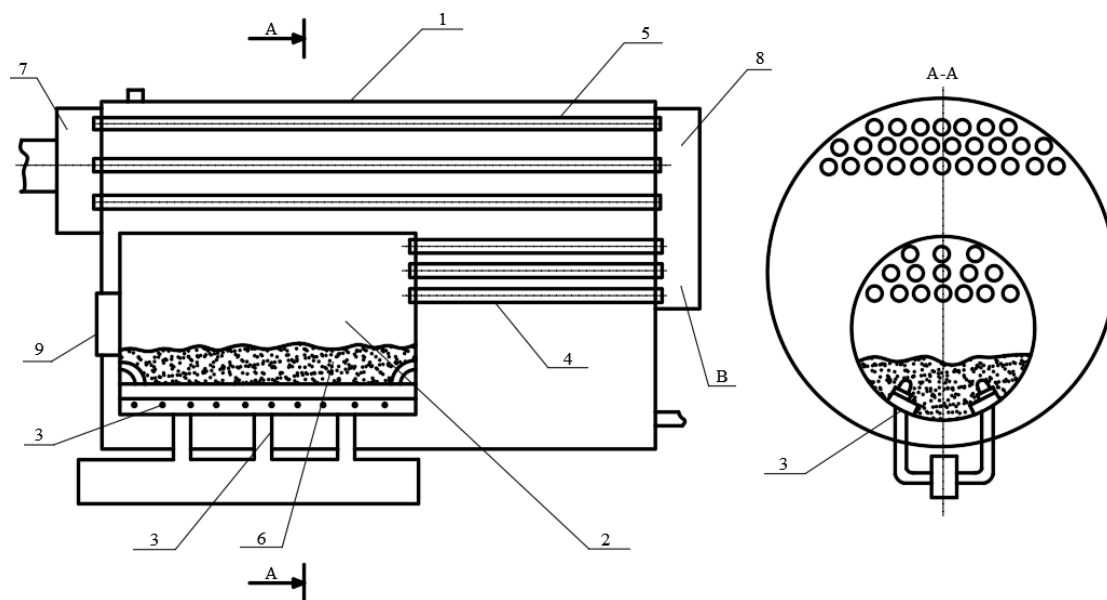


Рис. 5. Схема жаротрубного котла з киплячим шаром [9–13]:

1 – корпус котла; 2 – жарова труба; 3 – влаштування введення дутьового повітря під шар палива; 4 – короткі димарні труби; 5 – довгі димарні труби; 6 – псевдозріджений шар; 7 – передня димова коробка; 8 – задня димова коробка; 9 – дверцята топки котла; В – місце відбору проб димових газів

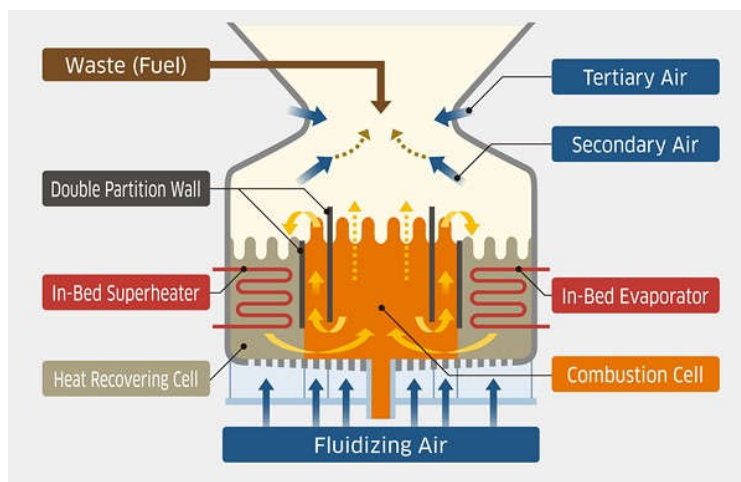


Рис. 6. Принцип внутрішньої циркуляції котла з псевдозрідженим шаром [https://global.kawasaki.com]

Топки характеризуються поділом камери згоряння та тепловідвідних поверхонь. Дисперсний матеріал циркулює між ними, що дає змогу регулювати температуру киплячого шару і запобігати корозії теплообмінних труб. Застосування внутрішньої та зовнішньої циркуляції забезпечує підвищення енергетичної

ефективності котлів та їх екологічні характеристики.

На рис. 7 показана вихрова топка для спалювання бурого вугілля [15–18]. Ця технологія використовується на енергетичних котлах.

На рис. 8 показана кільцева топка, що застосовується на енергетичних котлах для спалювання бурого вугілля [19].

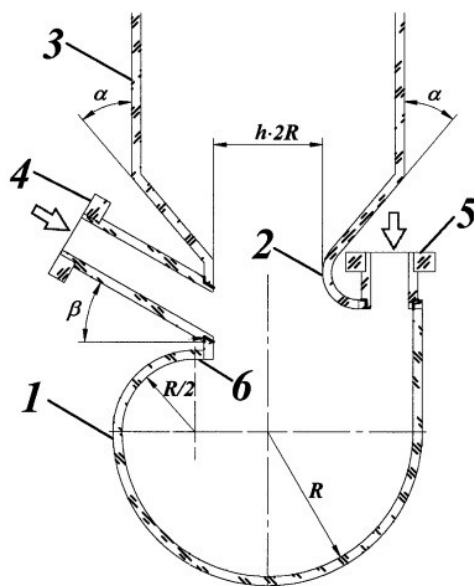


Рис. 7. Вихрова топка:

1 – вихрова камера горіння; 2 – дифузор; 3 – камера охолодження; 4 – основні сопла; 5 – додаткові сопла; 6 – «козирок»; α – кути розкриття дифузора; β – раціональний кут нахилу осі основних сопел до горизонту; h – відносна ширина горловини дифузора; R – радіус вихрової камери горіння

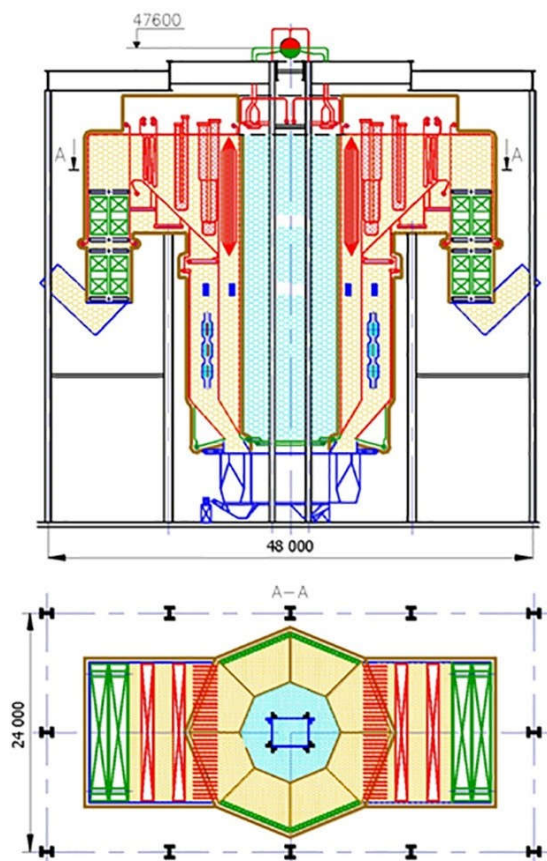


Рис. 8. Кільцева топка

Котельні установки для виробництва теплової енергії з біомаси мають високу енергетичну ефективність ($EUC_{NNNN} > 2 - 5$).

Порівнюючи технологію прямого спалювання біомаси та інші технології термодинамічної конверсії (газифікації) [25], можна бачити, що пряме спалювання, газифікація в потоці і газифікація в ЦКС мають високі значення показників енергетичної ефективності ($EUC_{NNNN} = 5,5 - 8$).

Проте коефіцієнт енергетичної ефективності залежить від відстані транспортування біопалива. Для забезпечення $EUC_{NNNN} > 5$ відстань транспортування обмежується до 100–200 км.

Для умов України тюкову солому, деревну тріску та гранули з біомаси можна перевозити на відстань до 30 км при $EUC_{NNNN} > 2$. Дерев'яні пеллети, гранули не мають обмеження за відстанню транспортування.

Найбільш ефективною технологією термічної переробки деревних та рослинних відходів є когенераційна технологія, що забезпечує виробництво електроенергії та теплоти [29]. У роботах [26, 27] наведено результати чисельного дослідження процесу спалювання деревного пилу в камері згоряння газотурбінної установки. У роботах [20–24] наведено теплові схеми твердопаливних котельних енергетичних установок. У цій роботі наведено схему когенераційної установки для спалювання деревного пилу з розміром частинок від 2.5 мкм до 25 мкм.

Результати чисельних розрахунків показали [28], що у вихровій топці (камері згоряння) із зустрічними потоками палива та повітря забезпечується повне згоряння палива. Температура продуктів згоряння на виході камери згоряння становить 1500–1600 °С, що забезпечує рідке видалення

шлаку. Очищені продукти згоряння подаються в теплообмінник і підігрівають стиснене в компресорі повітря, яке

подається в турбіну. Схема когенераційної установки показана на рис. 9.

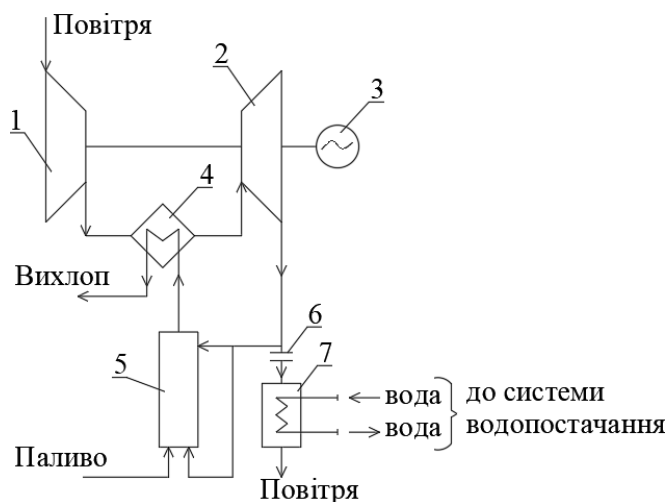


Рис. 9. Схема твердопаливної енергетичної установки:

- 1 – компресор; 2 – турбіна; 3 – електрогенератор; 4 – теплообмінник;
5 – камера згоряння; 6 – дросель; 7 – теплоутилізатор

Нагрів стисненого повітря в теплообміннику 4 запобігає потраплянню твердих продуктів згоряння в турбіну 2. У вихровій камері 5 згоряння відбувається згоряння деревного пилу розміром 5–25 мкм з рідким шлаковидаленням. Установка забезпечує вироблення електроенергії та теплоти.

Декарбонізація та перехід до ВДЕ. Високі ціни на газ у 2021 р. викликані подорожчанням рідкісноземельних металів та інших елементів, що використовуються у відновлюваній енергетиці: літій на 400 %, кремній – 300 %, алюміній – 37 %, кобальт – 85 %, неодим – 58 %, магній – 9 %, мідь – 25 %, цинк та нікель – 25 %.

Відновлювана енергетика також потребує ресурсів, з яких виготовляють вітряки та сонячні панелі. Вітряки та сонячні панелі на 70 % складаються з металів та сплавів, і їхня вартість позначиться на вартості генерації нових потужностей ВІЕ.

Аналіз причин зростання цін на комплектувальні частини для ВДЕ показує,

що при зростанні цін на органічне паливо (газ, нафту, вугілля) та зростанні будівництва ВДЕ збільшуються ціни на літій, кобальт та інші елементи. При цьому запаси рідкісноземельних обмежені і зосереджені в кількох країнах (Китай, Австрія, Болівія, Чилі, Бразилія, Конго) і тому ці країни ведуть жорсткішу цінову політику.

Тому майбутній розвиток ВДЕ пов'язаний з економікою енергетики, політикою та кліматом. Очевидно, в найближчому майбутньому вугільна та біопаливна генерації залишатимуться.

Висновки. Результати чисельного дослідження та аналізу технологій термічного перетворення твердих біопалив показують, що технології шарового спалювання, спалювання в киплячому шарі, вихрові топки забезпечують ефективне спалювання біопалива. Аналіз термодинамічної ефективності процесів перетворення твердих палив вказує на більш високу ефективність систем когенерації з виробленням електроенергії та теплоти.

Список використаних джерел

1. Енергетичний потенціал біомаси в Україні. Київ: Видав. Центр НУБіП України, 2011. 28 с.
2. Гелетуха Г. Г. Науково-технічні засади виробництва енергії з біологічних видів палива: дис. ... д-ра техн. наук. Київ: ІТТФНАНУ, 2021.
3. Баскаков А. П., Мацнев В. В., Распопов І. В. Котлы и топки с кипящим слоем. Москва: Энергоатомиздат, 1995. 349 с.
4. Махорін К. Е., Хінкіс П. А. Спалювання палива в псевдозрідженому шарі. Київ: Наукова думка, 1989. 204 с.
5. Кучин Г. П., Скрипко В. Л., Урда Н. Н. Спалювання низькотемпературних палив у псевдозрідженому шарі. Київ: Техніка, 1987. 144 с.
6. Бородуля В. А., Виноградов Л. М. Спалювання твердого палива в псевдозрідженому шарі. Мінськ: Наука та техніка, 1980. 190 с.
7. Досвід спалювання різних видів біомаси в Росії та Білорусії / Г. А. Рябов, Д. С. Літун, Є. А. Піцуха, Ю. С. Теплицький, В. А. Бородуля. *Електричні станції*. 2015. № 9. С. 9–17.
8. Карапетов А. Шарове спалювання біопалива. Огляд технологій. *Ленпромінформ*. 2016. № 1 (115).
9. Ісьємін Р. Л. Котел, що працює на низькотемпературному твердому паливі. *Житлове та комунальне господарство*. 2005. № 3.
10. Пузирьов Е. М. Дослідження топкових процесів і розробка котлів для низькотемпературного спалювання горючих відходів та місцевих палив: дис. ... д-ра техн. наук. Барнаул, 2003.
11. Піцуха Е. А. Наукові основи створення високоефективних циклонно-шарових топкових пристроїв для котлів, що працюють на твердому біопаливі: дис. ... д-ра техн. наук. Мінськ, 2019.
12. Особливості процесів спалювання біопалива в котлах із КШ / Г. А. Рябов та ін. *Теплоенергетика*. 2005. № 9. С. 54–60.
13. Водогрійні котли з киплячим шаром і шаром палива, що інтенсивно продувається, для спалювання низькотемпературного вугілля та біомаси / Р. Л. Ісьємін, С. Н. Кузьмін, В. В. Коняних, А. В. Михальов, А. Т. Зорін. *Новини теплопостачання*. 2008. № 5 (93). С. 57–63.
14. Бородуля В. А., Винаградов Л. М. Спалювання твердого палива у псевдозрідженому шарі. Мінськ: Наука та техніка, 1980. 190 с.
15. Саламатов В. В. Наукові основи створення та маловитратної реконструкції вугільних пароагрегатів під вихрову технологію спалювання. *Вісті Томського політехнічного університету*. 2014. № 4 (324). С. 25–38.
16. Голованов Н. В. Малогабаритні парогенератори з вихровою топкою ЦКТИ. Особливості конструкції та експлуатації. Перспективи застосування. *Праці ЦКТИ*. Ленинград: ЦКТИ, 1978. Вип. 154. С. 3–13.
17. Вихрова топка / Голованов Н. В., Накоряков В. Є., Бурдуков А. П. та ін.: пат. РФ № 2042084. 1995, Бюл. № 8.
18. Вихрова топка / Ануфрієв І. С., Красинський Д. В., Саламатов В. В. та ін.: пат. РФ № 2585347. 2016, Бюл. № 5.
19. Кільцеві топки пиловугільних котлів / Ф. А. Серант, Б. П. Устименко, В. Н. Змейков, В. О. Кроль. Алма-Ата: Наука, 1988. 168 с.
20. Твердопаливна газотурбінова установка / Алфімов В. В., Князев А. Н., Ломазов В. С., Назаренко Ю. Б.: пат. РФ № 2545113. 2015, Бюл. № 9.

21. Газотурбінне встановлення / Білошапка С. В., Мітін В. П., Лоцман Г. П., Шмаков Д. С., Субота А. В., Мироненко Р. А.: пат. РФ № 56969. 2006, Бюл. № 3.
22. Клименко В. Н., Мазур А. Н., Сабашук П. П. Когенераційні системи із тепловими двигунами: довідковий посібник: у 3 ч. Київ: Інститут прикладних досліджень в енергетиці, 2008. 560 с.
23. Спосіб та пристрій для подачі порошкоподібного палива до камери згоряння газотурбінного двигуна відкритого типу / Цун-Сянь Г. О.: пат. РФ № 2477378. 2013, Бюл. № 7.
24. Спосіб спалювання вугілля та пристроїв для його реалізації / Алексеєнко С. В., Бурдуков О. П., Попов Ю. С.: пат. РФ № 2327889. 2008, Бюл. № 18.
25. Pucker J., et al. Biomass and bioenergy. 2012. № 38. P. 95–101.
26. Пчёлкин Ю. М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Москва: Машиностроение, 1984. 280 с.
27. Сорунзан А. Дослідження процесів горіння пилоподібного біопалива в скрутних умовах камер згоряння. Москва: МЕІ. *III науково-технічна конференція студентів*. 2020.
28. Redko A., Burda Yu., Dzhyoiev R., Redko I., Norchak V., Pavlovskiy S., Redko O. Numerical Modeling of Peat Burning Processes in a Vortex Furnace with Countercurrent Swirl Flows, *Thermal science*, 2020. DOI REFERENCE: <https://doi.org/10.2298/TSCI190305158R>.
29. Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерації) та використання скидного енергопотенціалу: Закон України, 2005. № 4527.

Джиоєв Рафаель Леванович, аспірант кафедри теплогазопостачання, вентиляції і використання теплових вторинних енергоресурсів Харківського національного університету будівництва та архітектури.
ORCID iD: 0000-0003-4046-7038. E-mail: office@khgorgas.com.ua.

Dzhyoiev Rafael Levanovich, postgraduate student, department of Heat and Gas Supply, Ventilation and Use of Thermal Secondary Energy Resources, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture.
ORCID iD: 0000-0003-4046-7038. E-mail: office@khgorgas.com.ua.

Статтю прийнято 29.11.2021 р.