

Переробка сировини та ресурсозбереження

УДК 621.45.042

DOI: 10.33070/etars.3.2024.10

П'яних К.К.¹, ORCID: 0000-0003-1810-6543, **Серьогін О.О.²**,
докт. техн. наук, проф., ORCID: 0000-0003-0238-2922,
Осьмак О.О.², ORCID: 0000-0002-6066-6555, **Кіпко С.О.¹**

¹ **Інститут газу Національної академії наук України**

вул. Дегтярівська, 39, Київ 03113, Україна, e-mail: arkanist1989@gmail.com

² **Національний університет харчових технологій**

вул. Володимирська, 68, 01033 Київ, Україна, e-mail: seryoginooukr.net

Дослідження технології виробництва електроенергії з використанням газифікації підготовленої біомаси

Анотація. Стрімке зростання частини децентралізованої генерації електроенергії, пов'язаної з використанням для її виробництва відновлюваних джерел енергії, є одним з основних напрямків сучасного розвитку енергогенеруючих систем. У статті узагальнено описано стан та напрямок розвитку світової та української енергетики. Коротко описано розвиток електрогенеруючого обладнання на базі газогенерації. Наведено результати дослідження технології виробництва електроенергії з використанням газифікації підготовленої біомаси. Наведено технологічні схеми підготовки генераторного газу на вимоги виробників до якості газоподібного палива у разі використання його як моторного палива в сучасних двигунах. Наведено методи визначення вмісту забруднюючих компонентів у газі, дані про склад конденсату, відібраного з генераторного газу. Наведена схема очищення газу призначена для використання твердих залишків процесу газифікації для очищення газу з готового біопалива. Наведено результати аналізу сорбційних властивостей коксозольного залишку та результати очищення газу з використанням його як фільтра. Наведено результати роботи комплексу з виробництва електроенергії методом газифікації. Показано, що екологічні показники установки по викидах CO та NO_x в атмосферу відповідають вимогам Євро-5. *Бібл. 20, рис. 4, табл. 4.*

Ключові слова: електроенергія, відновлювані джерела енергії, біомаса, газифікація.

Активна розбудова розподіленої генерації в Україні є відповіддю на спроби знищення енергетичної інфраструктури країни агресором. Важ-

ливо, що ці зусилля цілком відповідають тенденціям світовому розвитку енергетики. Великі централізовані електростанції, що використовують ви-

копне паливо, поступово зменшують свою присутність на енергоринку, віддаючи свою частку генерації установкам малої та середньої потужності, які забезпечують виробництво електричної та теплової енергії за рахунок відновлюваних джерел енергії. Вугільні електростанції в Європейському Союзі за останні 10 років знизили виробництво електричної енергії більше ніж на 20 % [1], активно розвивається сонячна та вітрова генерація. У лексиконі енергетичного ринку з'явилися нові поняття, які описують нові відносини у системі «виробник – споживач». Термін «активний споживач», введений законодавчо [2], створив нові умови взаємодії енергопостачальних компаній та клієнтів, в якій клієнт може бути одночасно покупцем та продавцем електричної енергії [3].

Бажання забезпечення стабільного доступу до електроенергії та лібералізація законодавства в малій енергетиці призвели до активізації споживачів, які самі стають її виробниками, а також до зростання попиту на обладнання для виробництва та акумуляції електроенергії. Вітрова та сонячна генерація не забезпечує стабільного енергопостачання. Використання парових та газових турбін для установок потужністю до 500 кВт обмежується малою пропозицією такого обладнання, низькою його ефективністю та високими капітальними витратами. У результаті підприємства, застосування технологічних ланцюгів яких може бути забезпечено малими електрогенеруючими установками, активно встановлюють електрогенеруючі та когенераційні енергетичні агрегати на базі поршневих двигунів. Як паливо в них використовуються рідкі вуглеводні та природний газ. Економічні переваги використання для забезпечення роботи таких установок газоподібних палив з біомаси примушують підприємства шукати відповідне обладнання, але на сьогодні в Україні працює лише одна газогенераторна електростанція встановленою потужністю 500 кВт, яка належить ТОВ «Чернігівська генеруюча компанія», м. Чернігів. Масова поява аналогічного обладнання на інших підприємствах України стримується високою вартістю установок, які пропонуються європейськими компаніями, відносно новизною технологічних рішень та відсутністю пропозицій від українських виробників.

Вимоги до систем газифікації та підготовки газу.

Сучасні газогенераторні електростанції

Технологія газифікації деревини набула ши-

рокого поширення в роки, що передували Другій світовій війні та деякий час після неї [4]. Наприкінці війни тільки у Німеччині використовувалося понад 500 тис. автомобілів, що працювали на генераторному газі з деревини. Спроби використати цей досвід на новому технологічному рівні показали, що перевірена роками технологія погано піддається масштабуванню, тому зараз ряд підприємств пропонують готові рішення з встановленою електричною потужністю 45–50 кВт. При цьому використання підходів, перевірених у минулому та підтриманих сучасними дослідженнями, не гарантують позитивного результату. Компанії, які першими вийшли на ринок з пропозицією газогенераторних електростанцій, зазнали значних втрат та навіть збанкрутували. Однією з причин невдач була недостатня підготовка газу для використання в сучасних двигунах внутрішнього згоряння. Науковці констатують, що смоли в промисловому газі є суттєвою, якщо не головною, проблемою застосування систем газифікації [5]. Вимоги до надійності двигунів змінилися суттєво. Компанії MWM та Jenbacher вказують строк експлуатації до капітального ремонту 80 тис. год. Рівні робочих температур та ступені стиснення, технологічні рішення, які використовуються сьогодні, вимагають більш якісної підготовки газу, ніж це було в минулому. Для забезпечення стабільної експлуатації обладнання більшість виробників поршневих двигунів обмежують максимальний вміст смол та твердих залишків у паливі 50 мг/м^3 , обмежуючи також вміст лужних металів ($< 1 \text{ мг/м}^3$), хлоридів ($< 10 \text{ мг/м}^3$), аміаку ($< 50 \text{ мг/м}^3$) та сполук, що містять сірку ($< 100 \text{ мг/м}^3$) [6]. Зустрічаються і більш жорсткі вимоги до вмісту смол.

Враховуючи необхідність якісної підготовки газу, одержаного в процесі газифікації, розроблено різні системи очищення такого газу [7], в яких після виходу з газогенератора газ послідовно проходить через:

- сухий пиловловлювач, скруббер, труба Вентурі, крапле вловлювач, дросельна група, краплевловлювач;
- сухий пиловловлювач, скруббер, труба Вентурі, крапле вловлювач, вологий електрофільтр;
- циклон, скруббер, конденсатор вологи, крапле вловлювач, фільтр з шаром фільтрувального матеріалу;
- циклон, фільтр з шаром фільтрувального матеріалу (або рукавний фільтр).

Наведені елементи у тій чи іншій комплекта-

ції використовуються в більшості сучасних систем очищення, починаючи з простої промивки водою [8] та завершуючи складними комбінованими системами [9]. Однак вдалі рішення все ще залишаються не частими, незважаючи на підтримку розвитку виробництва електроенергії з відновлюваних джерел, обмежуючи поширення газогенераторних систем. Єдиним можливим шляхом покращання експлуатаційних характеристик газогенераторних електростанцій є збільшення кількості користувачів обладнання, які реалізують цю технологію, з кваліфікованим контролем роботи таких систем. Дослідження італійських вчених [10], виконані на стандартному когенераційному комплексі V4.50 компанії Burkhardt, кількість інсталяцій яких та більш потужних установок V3.90 цього ж виробника перевищує 100 [11], показали, що для підтримання заявлених виробником характеристик необхідно щонайменше коригування строків виконання регламентних робіт. Неможливість підтримання паспортної потужності електрогенерації 50 кВт обумовлена, за їх даними, проблемами із забрудненням фільтрів золою та смолами, які утворюються в процесі газифікації пелет з деревини.

Прикладом успішно реалізованого процесу підготовки газу для забезпечення його використання як палива для двигунів внутрішнього згоряння є біопаливна електростанція в місті Гессінг, Австрія. Комплекс, який передбачає піроліз вологої (45–50 %) деревної тріски в киплячому шарі з використанням розігрітого піску як проміжного теплоносія, забезпечує роботу двигунів GE Jenbacher J620 з генерацією до 2,3 МВт елект

-ричної енергії. Розроблений для реалізації цього проекту технологічний ланцюг підготовки продуктів піролізу передбачає на додаток до стандартного охолодження газу та очищення його від золи за допомогою фільтра ще й промивання газоподібного палива дизельним паливом, яке виготовляється з біологічної сировини. Застосований метод очищення підтвердив свою ефективність, довівши вміст смол та пилу до рівнів 10–40 мг/м³. Незважаючи на високі експлуатаційні витрати, пов'язані з необхідністю компенсації вартості біодизеля, цей елемент став важливою ланкою в технології підготовки генераторного газу. Зараз ця технологія широко використовується в промислових та дослідницьких установках, призначених для виробництва електроенергії шляхом газифікації біопалива.

Дослідна газогенераторна електростанція Інституту газу НАН України

Дослідження в галузі газифікації біомаси проводяться в багатьох наукових установах України [12], але комплекси, які дають можливість здійснити усі роботи, необхідні для оцінки ефективності когенераційних установок на базі газогенераторних технологій, в нашій країні практично відсутні. Один з таких комплексів створено в Інституті газу НАН України на базі відділів технологій альтернативних палив і газових технологій. Стенд, розроблений для досліджень з газифікації твердих палив, підготовки та використання генераторного газу для виробництва електричної енергії (рис. 1), складається з обладнання

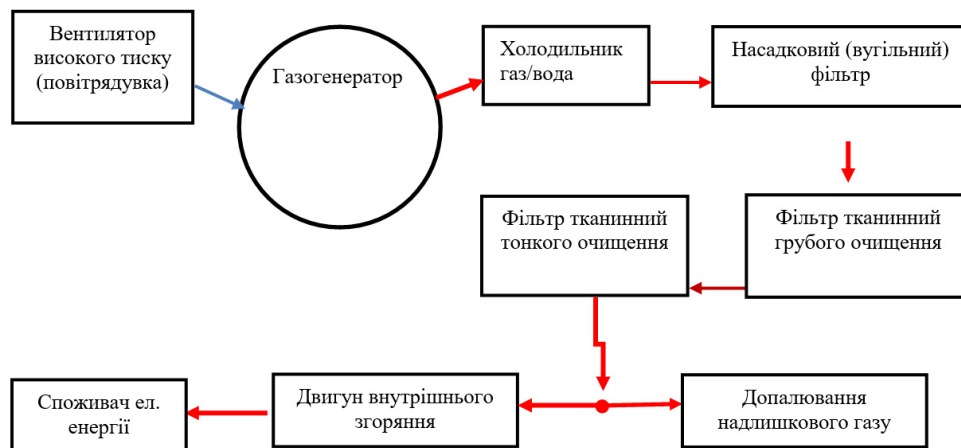


Рис. 1. Принципова схема виробництва, підготовки та використання генераторного газу.

Figure 1. Schematic diagram of production, preparation and use of generator gas.

для подачі повітря, спроможного створити тиск до 6 кПа, газогенератора, який дає можливість розвивати теплову потужність 90 кВт при роботі на трісці деревини, холодильника, розрахованого на охолодження генераторного газу до 40–50 °С, системи фільтрів, поршневого двигуна та електрогенератора з блоком регулювання навантаження.

Дослідження, що проводяться в Інституті газу, передбачають всебічне вивчення створюваної технології, включаючи відпрацювання режимів виробництва генераторного газу з різних видів первинних ресурсів, його підготовку та використання як моторного палива, а також вирішення проблем утилізації побічних продуктів газифікації.

Виробництво та підготовка генераторного газу

Газифікація підготовленого біопалива забезпечується газогенератором зворотної хвилі. У розробленого в Інституті газу газогенератора (рис. 2), який реалізує той же процес, що активно вивчається для інших цілей в Інституті відновлюваної енергетики [13], є один, суттєвий для теперішнього часу недолік — періодичний режим роботи, але багато позитивних характеристик: стабільність роботи, висока якість генераторного газу, висока ефективність.

Дослідження газифікації різних видів підго-

товленого біопалива з вологістю 8–12 % підтвердило відносно стабільний рівень теплоти згоряння генераторного газу на рівні 5,0–6,7 МДж/м³ з діапазоном зміни концентрації основних компонент на рівні H₂ — 14–21 %, CO — 13–19 %, CO₂ — 9–12 %, CH₄ та інші вуглеводні сумарно — до 5 %. Важливою перевагою газогенератора як джерела моторного палива для поршневої електростанції є генерація на режимах, близьких до номінального генераторного газу, із вмістом смол, близьким до 100 мг/м³ [14].

Відбір та дослідження складу речовин, що містяться в генераторному газі, виконували за методикою [15], з використанням установки, принципова схема якої наведена на рис. 3. Методика вимірювання DIN CEN/TS 15439 (tar protocol) використовується як основна перевірена методика, по якій звіряють інші методи визначення вмісту смол в газоподібних продуктах газифікації твердих палив [16].

Система підготовки газу, розроблена в Інституті газу, базується на стандартному підході, який включає охолодження та фільтрування генераторного газу з використанням власних рішень [17] (див. рис. 1). Після охолодження в теплообміннику газ/вода газоподібне паливо подається на насадковий фільтр, наповнений низькоякісним активованим вугіллям, що забезпечує поглинання крапельної вологи та конденсованих вуглеводнів.

Послідовно встановлені тканинні фільтри гру-

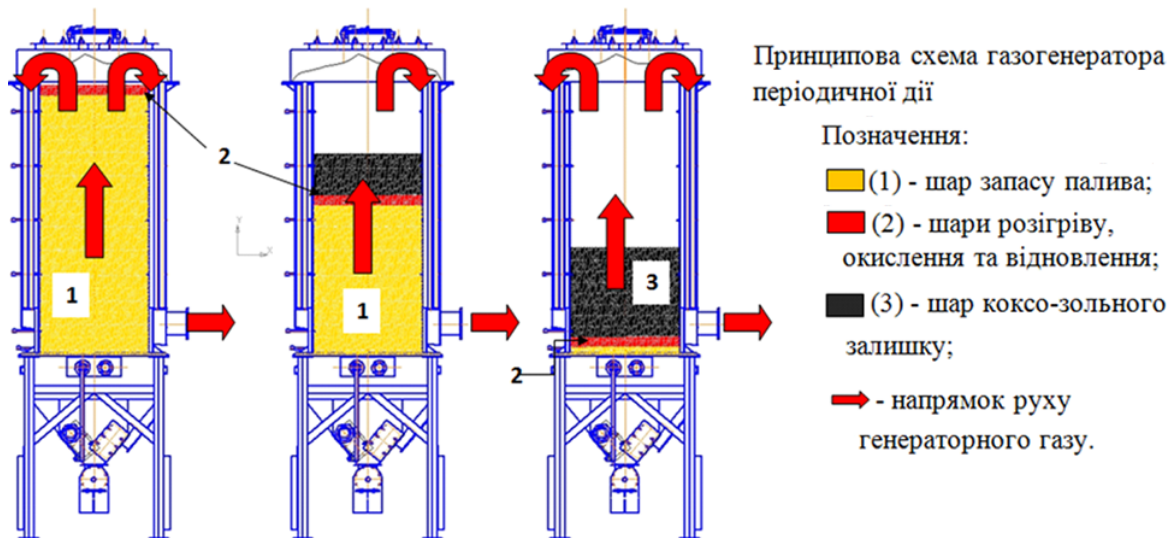


Рис.2. Принципова схема газогенератора серії ППД.

Figure 2. Schematic diagram of the gas generator of the GPA series

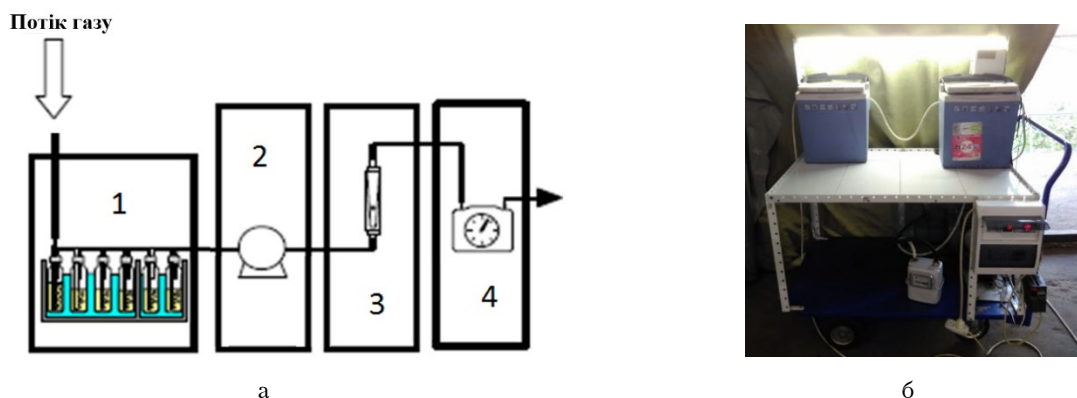


Рис.3 Принципова схема (а) та зовнішній вигляд (б) установки вимірювання вмісту конденсату в газоподібному паливі: 1 – модуль осадження конденсату; 2 – вакуумний насос; 3 – ротаметр; 4 – об'ємний витратомір.

Figure 3 Schematic diagram (a) and appearance (b) of the installation for measuring the content of condensate in gaseous fuel: 1 – condensate deposition module; 2 – vacuum pump; 3 – rotameter; 4 – volumetric flow meter.

Таблиця 1. Показники роботи енергогенерувального комплексу

Table 1. Performance indicators of the power generation complex

Параметр	Час від початку випробування, год				
	1	5	10	15	20
Витрати повітря, м ³ /год	180	200	188	202	190
Витрата палива, кг/год	70	72	70	74	68
Електрична потужність комплексу, кВт	54	56	55	57	53
Температура газу на вході в двигун, °С	32,3	32,6	33,5	34,8	35,3
Концентрація смолистих залишків у газоподібному паливі, мг/м ³	46	44	48	47	50
Зміна ваги вугільної насадки, кг					30,6

бого та тонкого очищення дають можливість видалити з газового потоку частинки золи з вихідного палива та вугілля з вугільного фільтра. Запропонована технологія підготовки газу підтвердила високу ефективність досліджень, здійснених у ході випробувань газогенераторної електростанції на базі газогенератора оберненого процесу. У насадковому фільтрі з висотою заповнення 3,0 м та перетином 0,6 м швидкість газу становила 0,4 м/с, що зумовило тривалий період контакту генераторного газу й поверхні частинок вугілля та слабкий винос вуглецю. Результати роботи системи очищення підтвердили можливість її використання для забезпечення підготовки газу як моторного палива (табл. 1).

Кількісні та якісні характеристики коксового залишку

Особливістю реалізованої технології очищен-

ня газу є використання в насадковому фільтрі коксозольного залишку, який утворюється в процесі газифікації підготовленого біопалива. Технологія зворотної хвилі передбачає генерації над зоною, де в умовах наявності повітряного дуття відбувається процес горіння палива, шарів коксового залишку. Через ці шари, розігріті до високих температур, рухаються високотемпературні продукти згорання. У результаті взаємодії з парами води та вуглекислим газом відбуваються реакції водяного газу та Будуара відповідно. При цьому температура реагуючих речовин та щільність коксового залишку знижуються. Під впливом хімічної обробки коксозольний залишок набуває характеристик активованого вугілля (табл. 2), характеристики якого залежать від властивостей вхідної сировини та режиму експлуатації установки. В умовах реальної експлуатації осереднений показник розвитку поверхні коксового залишку становить близько 300 м²/г, що значно підвищує

Таблиця 2. Результати аналізу сорбційних властивостей коксозольного залишку після газифікації деревини

Table 2. Results of analysis of sorption properties of coke-ash residue after wood gasification

Параметр	Одиниця вимірювання	Значення
Вологість	%	0,92
pH 1 %		7,6
Насипна щільність	г/см ³	0,12
Питомий об'єм пор по бензолу	см ³ /г	2,712
Питомий об'єм пор по воді	см ³ /г	0,21
Освітлювальна здатність метиленового синього	%	55
Питома адсорбція на нафті	г/г	10,2
Ємність моторного масла	г/г	9,75
Ємність для дизельного палива	г/г	11,34

ефективність очищення генераторного газу. Використання активованого вугілля для очищення продуктів газифікації не є унікальним технічним рішенням [18]. Перевагою розробки Інституту газу є використання вугілля власного виробництва, яке утворюється як супутній продукт основного технологічного процесу. Роботи по підготовці біовугілля ведуться багатьма дослідниками, але тільки процес, реалізований на установці Інституту газу, дає можливість виконати газифікацію біопалива з частковою активацією біовугілля за один прохід. Цей процес без додаткових ускладнень суттєво підвищує якість біовугілля як основи для внесення добрив та розширює напрямки застосування такої речовини.

Кількісні показники утворення коксового залишку є функцією вмісту вологи в біопаливі та режиму експлуатації газогенератора. На номінальному режимі роботи установки з біопаливом вологістю 9–12 % кількість вуглецю становить 10 % від маси первинного палива. Зменшення навантаження до 50 % підвищує масову частку коксового залишку до 20 % від первинного палива, при цьому вміст смол в газоподібних продуктах газифікації суттєво зростає, що ускладнює подальше використання генераторного газу як палива.

Кількісні та якісні характеристики конденсату

У процесі газифікації, окрім газоподібних та твердих продуктів, утворюється і рідини, які в основі своїй складаються з води. Кількість конденсату, який виділяється з газу в процесі його охолодження, та вміст у ньому вуглеводневих сполук залежать від вологості вихідного палива та режиму роботи газогенератора. Осереднений показник утворення вологи під час газифікації тріски деревини з вологістю 10–12 % становить близько 100 кг вологи на 1 т вхідного палива. Результати аналізу конденсату, отримані на хроматомаспектрофотометрі Shimadzu-2010QP, показали, що його основу становить вода, частка якої перевищує 97 %. Конденсат забруднений кислотами, фенолами, ароматичними та граничними вуглеводнями (табл. 3) потребує очищення та утилізації.

Таблиця 3. Склад конденсату, що утворюється при газифікації деревини

Table 3. Composition of condensate formed during wood gasification

Компонент	Одиниці вимірювання	Значення
Вода	% (мас.)	97,5
Кислоти:		
мурашина	% (мас.)	0,1
оцтова	% (мас.)	0,05
фумарола	% (мас.)	0,05
Феноли:		
фенол	% (мас.)	0,4
крезол	% (мас.)	0,2
Гідроксибензойна кислота	% (мас.)	0,1
Гетероцикли:		
фурфурол	% (мас.)	0,05
метилфурфурол	% (мас.)	0,05
оксиметилфурфурол	% (мас.)	0,05
Ароматичні вуглеводні:		
азулен	% (мас.)	0,05
нафталін	% (мас.)	0,05
бензол	% (мас.)	0,01
Граничні вуглеводні (C ₁₇ –C ₂₈)	% (мас.)	1,34

Енергетичні характеристики комплексу

Потужність та ККД є ключовими характеристиками енергогенеруючих систем. Дослідна газогенераторна електростанція Інституту газу, оснащена двигуном FF10/8.8, доопрацьованим для роботи на газоподібному паливі, розрахована на потужність 25 кВт. Виконані на цій установці дослідження дали можливість визначити ККД виробництва електричної енергії в технологічному процесі «газифікація твердого палива – виробництво електроенергії з використанням поршневого двигуна» на рівні, близькому до 20 %. Порівняння отриманих на установці Інституту газу результатів з даними дослідження роботи газогенераторної електростанції на базі газогенератора оберненого процесу, оснащеною двигуном GE08TI GEN-PACK, показало більш високу ефективність останньої (рис.4). На навантаженні 75 % від номінального ККД цієї електростанції становить близько 24 %. Зважаючи на близькі енергетичні показники газогенераторних установок, більш висока ефективність роботи установок з двигуном GE08TI GEN-PACK забезпечена саме використанням більш сучасної поршневої машини. Спираючись на аналіз ефективності процесів газифікації, можна стверджувати, що технологія, запропонована Інститутом газу, не поступається рішенням, побудованим на базі газогенераторних установок оберненого процесу, та, зважаючи на підтверджену в промислових умовах можливість

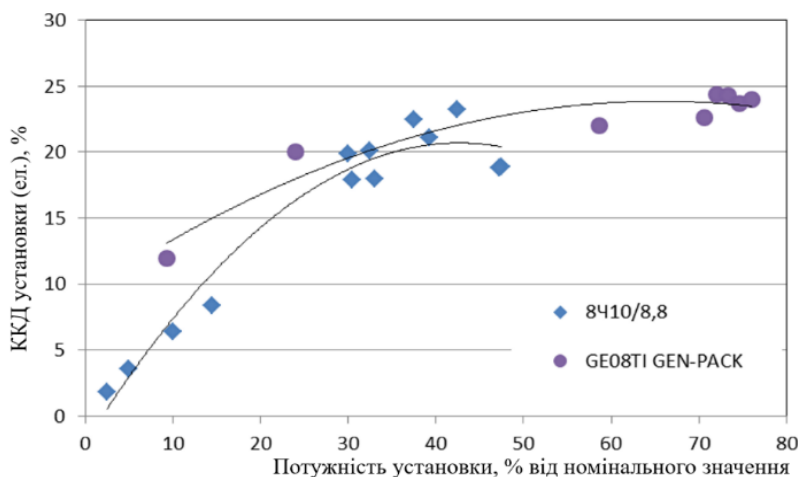


Рис. 4. Залежність ККД комплексу «газогенератор – ДВЗ – електрогенератор» від потужності.

Figure 4. Dependence of the efficiency of the "gas generator – combustion engine – electric generator" complex on power.

створення установок великої потужності [19], переважає їх.

Безвідходна технологія виробництва електричної енергії

Дослідження, виконані на дослідній газогенераторній електростанції Інституту газу, дали можливість не тільки визначити її енергетичний ККД, а й скласти осереднені матеріальний та енергетичний баланси роботи газогенератора:

- матеріальний: з 1 кг підготовленого біопалива та 1,6 кг повітря, що йде на газифікацію, утворюється близько 2,4 кг генераторного газу, 0,1 кг конденсату та 0,1 кг деревинного вугілля.
- енергетичний: 15 МДж/кг потенціалу первинного палива витрачається на виробництво газоподібного палива (10,5 МДж – 70 %), утворення коксового залишку (2,5 МДж – 17 %), нагрів води в системі охолодження (1,5 МДж – 10 %), теплові втрати (0,5 МДж – 3 %).

Важливим в експлуатаційних показниках комплексу є те, що усі матеріальні потоки при його роботі замикаються та створюють можливість роботи за безвідходною технологією. Установка розрахована на споживання підготовленого біопалива, генерацію електричної енергії та високоякісного вуглецевого палива. Для генерації 1 кВт-год електричної енергії використовується близько 1 кг підготовленого біопалива, при цьому генерується 0,1 кг біовугілля, якого достатньо для підготовки генераторного газу та нейтралізації конденсату. Після використання із зволоженого вугілля з додаванням в'яжучих матеріалів формується паливний брикет, сушка якого здійснюється за рахунок надлишкової теплової енергії, яка утворюється в процесі газифікації біопалива та роботи двигуна внутрішнього згоряння. Весь технологічний ланцюг було протестовано, для чого створено технологічну лінію на базі валкового пресу, визначено оптимальні склади в'яжучих добавок та підготовлено технічні умови «Брикетів з вуглецевого залишку термічної переробки твердих вуглецевмісних матеріалів». Теплота згоряння брикетів, вміст золи в яких не перевищує

20 %, становить не менш 6500 ккал/кг (27,2 МДж/кг). У рамках опрацювання можливостей технологічного ланцюга досліджено та підтверджено можливість утилізації гуми відпрацьованих автомобільних шин шляхом газифікації з виробництвом генераторного газу та технічного вуглецю. З технічного вуглецю сформовано паливні брикети та підтверджено можливість їх використання замість вугілля у твердопаливних котлах. Зольність та теплота згорання палива на основі твердих залишків газифікації гуми відповідають вимогам розроблених технічних умов.

Таким чином, єдиними відходами газогенераторної електростанції є продукти згорання, які утворюються під час роботи газопоршневої установки. Основною проблемою роботи такого обладнання є утворення димових газів з високим вмістом оксиду вуглецю та оксидів азоту. Під час налагоджування роботи електростанції підбираються режими, оптимальні за коефіцієнтом корисної дії та викидами забруднюючих речовин. Виконані дослідження дали можливість забезпечити при роботі електростанції відповідність нормам Євро-5: CO — 4,0 г/кВт·год; NO_x — 2,0 г/кВт·год (табл. 4).

Цей результат, досягнутий на застарілому двигуні, пояснюється тим, що наявність водню забезпечує швидке займання паливної суміші, яка в основному складається з простих молекул, що забезпечує високий ступінь вигорання компоненті палива та низький вміст CO, а низька температура горіння генераторного газу зумовлює відносно низькі концентрації NO_x. Досягнуті результа-

ти частково відповідають навіть вимогам Євро-6 для стаціонарних двигунів з іскровим запалюванням. Вимоги Євро-6 для CO — 4,0 г/кВт·год, відносно NO_x — 0,4 г/кВт·год [20].

Висновки

Перехід до децентралізованої енергетики та широке використання відновлюваних джерел енергії є одним із викликів сьогодення. Розроблена технологія підготовки та використання генераторного газу підтвердила свою працездатність та високі експлуатаційні показники. Створено технологічний ланцюг, який забезпечує безвідходне виробництво електричної енергії з біомаси з високою для установок малою потужності ефективністю — близько 20 %. Генерація цільового продукту — електричної енергії — супроводжується виготовленням вторинного продукту — паливних брикетів з вуглецю. У технології передбачається поглинання конденсованих вуглеводнів з генераторного газу та конденсату, що утворюється під час газифікації біомаси, коксозольним залишком, який у достатній кількості утворюється під час термічного розкладання біомаси. Із зволоженого вуглецю з додаванням в'язучих формується вугільний брикет зольністю не більш 20 % та нижчою теплотою згорання не менш 6500 ккал/кг. Екологічні показники викидів CO та NO_x в атмосферу відповідають вимогам Євро-5.

Список літератури

1. Інтерактивна статистична інформація. — <https://www.statista.com/statistics/1312316/coal-power-capacity-europe/>
2. Закон України «Про ринок електричної енергії». *Відомості Верховної Ради*. 2017. № 27–28. С. 312.
3. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України». *Відомості Верховної Ради*. 2023. № 82. С. 301.
4. Колеров Л.К. Газомоторные установки. Москва : Машгиз, 1951. 237 с.
5. Gredinger A., Sporn R., Scheffknecht G. Comparison measurements of tar content in gasification systems between an online method and the tar protocol. *Biomass and Bioenergy*. 2018. Vol. 111. P. 301–307. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.01.026.
6. Khan B.H. Non-Conventional Energy Resources. Second edition. New York: Tata McGraw Hill Education Private Limited, May 26, 2009. 472 p.
7. Milne T.A., Evans R.J. Biomass Gasifier “Tars”: Their Nature, Formation, and Conversion. *National*

Таблиця 4. Залежність утворення забруднюючих речовин в продуктах згорання генераторного газу від потужності

Table 4. Dependence of the formation of pollutants in generator gas combustion products on power

Потужність комплексу, % від номіналу	Викиди, млн. ⁻¹		Викиди, г/кВт·год	
	CO	NO _x	CO	NO _x
2,5	2822	618	2,95	1,06
10,0	2952	589	3,08	1,01
32,5	2015	575	2,10	0,98
37,5	2458	490	2,57	0,84
42,5	2472	445	2,58	0,76
58,7	2270	336	2,37	0,57
76,0	2140	269	2,23	0,50

Renewable Energy Laboratory. November 1998. NREL/TP-570-25357. 121 p. — <https://task33.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/33/2022/06/TomandNicolasreport-1.pdf>

8. Дубинин А.М., Черепанова Е.В., Тупоногов В.Г., Обожин О.А. Мини-ТЭЦ на базе обращенного газогенератора. *Теплоэнергетика*. 2010. № 6. С. 29–32.

9. Пат. RU2091135, МПК 6 В 01 D 47/05. Способ и установка для очистки горячего газа, содержащего сверхмелкодисперсные частицы. Кириенко И.Е., Кириенко Ю.Е., Кириенко Е.Е. Оpubл. 09.27.1997.

10. Ettore Stamponi, Francesco Giorgini, Franco Cotana and Elisa Moretti. Preliminary assessment of a microgrid integrated with a biomass gasification CHP system for a production facility in Central Italy. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 238. Article 01012. DOI: 10.1051/e3sconf/202123801012.

11. Burkhardt GmbH Bulletin. — https://www.bioenergetika.si/images/Burkhardt_ENG.pdf

12. Осьмак О.О., Серьогин О.О. Системний підхід до вирішення проблеми газифікації рослинної біомаси. *Харчова промисловість*. 2011. № 11. С. 95–100.

13. Ключ В.П., Ключ С.В., Маслова Н.О. Застосування окиснювального піролізу для переробки органічних відходів. *Відновлювана енергетика*. 2021. № 2. С. 93–99. DOI: 10.36296/1819-8058.2021.2(65).93-99.

14. Славянский А.К., Шарков В.И. Химическая технология древесины. Москва : Гослесбуиздат, 1962.

15. Neeft J.P.A., Knoef H.A.M., Zielke U. Guideline for sampling and analysis of tar and particles in biomass producer gases. *Energy project ERK6-CT1999-20002 (Tar protocol)*. — <http://www.tarweb.net/results/>

<pdf/guideline-3.3-v2.pdf>

16. Michael Neubert, Stefanie Reil, Martin Wolff, Daniel Pücher, etc. Experimental comparison of solid phase adsorption (SPA), activated carbon test tubes and tar protocol (DIN CEN/TS 15439) for tar analysis of biomass derived syngas. *Biomass and Bioenergy*. 2017. Vol. 105. P. 443–452.

17. Патент на винахід 120513 Укр., МПК С 10 J 3/84, В 01 D 46/30. Спосіб очистки генераторного газу та пристрій для його здійснення. Карп І.М., П'яних К.Є., П'яних К.К. Заяв. № а201611850 від 23.11.2016. Чинний від 26.12.2019. — <https://sis.nipo.gov.ua/search/detail/139938511/>

18. Карп І.М., П'яних К.Є., П'яних К.К. Утилізація осадів стічних вод. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2019. № 2. С. 34–48. DOI: 10.33070/etars.2.2019.05.

19. Карп И.Н., Марцевой Е.П., Пьяных К.Е., Антошук Т.А., Пьяных К.К. Исследование и внедрение процессов газификации углей и биомассы с целью замещения природного газа. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2014. № 4. С. 3–13. — <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/127382>

20. Регламент (ЄС) № 595/2009 Європейського Парламенту та Ради від 18 червня 2009 року про схвалення типу транспортних засобів і двигунів щодо викидів від важких транспортних засобів (Євро VI) та про доступ до ремонту та технічного обслуговування транспортних засобів інформація та внесення змін до Регламенту (ЄС) № 715/2007 та Директиви 2007/46/ЄС та скасування Директив 80/1269/ЄЕС, 2005/55/ЄС та 2005/78/ЄС. — https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_031-09#Text

Надійшла до редакції 30.08.2024

Pianykh K.K.¹, ORCID: 0000-0003-1810-6543, **Seryogin O.O.²**,
Doctor of Technical Sciencis, Professor, ORCID: 0000-0003-0238-2922,
Osmak O.O.², ORCID: 0000-0002-6066-6555, **Kipko S.O.¹**

¹ **The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine**
 39, Degt'yarivska Str., 03113 Kyiv, Ukraine, e-mail: arkanist1989@gmail.com

² **National University of Food Technologies**
 68, Volodymyrska Str., 01033 Kyiv, Ukraine, e-mail: seryoginooukr.net

Research of electricity generation technology using gasification of prepared biomass

Abstract. The rapid growth of the part of decentralized power generation, associated with the use of renewable energy sources for its production, is one of the main directions of the modern development of power generation systems. The article summarizes the state and direction of development of the world and Ukrainian energy industry. The development of electricity generating equipment based on gas generation is briefly described. The results of the study of electricity production technology using gasification of prepared biomass

are given. The technological schemes for the preparation of generator gas as motor fuel and the requirements of manufacturers for the quality of gaseous fuel in the case of its use as motor fuel in modern engines are presented. Methods of determining the content of polluting components in gas, data on the composition of condensate taken from generator gas are given. The presented scheme of gas purification is intended for the use of solid residues of the gasification process for gas purification from finished biofuel. The results of the analysis of the sorption properties of coke-sol residue and the results of gas purification using it as a filter are given. The results of the operation of the complex for the production of electricity by the gasification method are given. It is shown that the environmental indicators of the installation in terms of CO and NO_x emissions into the atmosphere meet Euro-5 requirements. *Bibl. 20, Fig. 4, Tab. 4.*

Keywords: electricity, renewable energy sources, biomass, gasification.

References

1. <https://www.statista.com/statistics/1312316/coal-power-capacity-europe/>
2. [The Law of Ukraine “On the Electric Energy Market”]. *Official Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine (BVR)*. 2017. No. 27–28. Article 312. (Ukr.)
3. [The Law of Ukraine “On Amendments to Certain Laws of Ukraine Regarding the Restoration and “Green” Transformation of the Energy System of Ukraine”]. *Official Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine (BVR)*. 2023. No. 82. Article 301. (Ukr.)
4. Kolerov L.K. Gas engines. Moscow; Leningrad: Mashgiz, 1951. 237 p. (Rus.)
5. Gredinger A., Sporn R., Scheffknecht G. Comparison measurements of tar content in gasification systems between an online method and the tar protocol. *Biomass and Bioenergy*. 2018. Vol. 111. pp. 301–307. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.01.026
6. Khan B.H. Non-Conventional Energy Resources. Second edition. New York: Tata McGraw Hill Education Private Limited, May 26, 2009. 472 p.
7. Milne T.A., Evans R.J. Biomass Gasifier “Tars”: Their Nature, Formation, and Conversion. *National Renewable Energy Laboratory*. November 1998. NREL/TP-570-25357. 121 p. — <https://task33.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/33/2022/06/TomandNicolasreport-1.pdf>
8. Dubinin A.M., Cherepanova E.V., Tuponogov V.G., Obozhskii O.O. [Mini-CHPP on the basis of reverse gas generator]. *Teploenergetika*. 2010. No. 6. pp. 29–32. (Rus.)
9. Pat. RU 2091135, IPC 6 B 01 D 47/05. [Method and installation for cleaning hot gas containing superfine particles]. Kiriienko I.E., Kiriienko Yu.E., Kiriienko E.E. Publ. 09.27.1997. (Rus.)
10. Ettore Stamponi, Francesco Giorgini, Franco Cotana and Elisa Moretti. Preliminary assessment of a microgrid integrated with a biomass gasification CHP system for a production facility in Central Italy. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 238. Article 01012. DOI: 10.1051/e3sconf/202123801012. DOI: 10.1051/e3sconf/202123801012
11. Burkhardt GMBH Bulletin. — https://www.bioenergetika.si/images/Burkhardt_ENG.pdf
12. Osmak O.O., Seryogin O.O. [A systematic approach to solving the problem of gasification of plant biomass]. *[Food Industry]*. 2011. No. 11. pp. 95–100. (Ukr.)
13. Klyus V.P., Klyus S.V., Maslova N.O. [Application of oxidative pyrolysis for organic waste processing]. *[Renewable energy]*. 2021. No. 2. pp. 93–99. DOI: 10.36296/1819-8058.2021.2(65).93-99. (Ukr.)
14. Slavyansky A.K., Sharkov V.I. [Chemical Wood Technology]. Moscow : Goslesbumizda, 1962. (Rus.)
15. Neef J.P.A., Knoef H.A.M., Zielke U. Guideline for sampling and analysis of tar and particles in biomass producer gases. *Energy project ERK6-CT1999-20002 (Tar protocol)*. — <http://www.tarweb.net/results/pdf/guideline-3.3-v2.pdf>
16. Michael Neubert, Stefanie Reil, Martin Wolff, Daniel Pücher, etc. Experimental comparison of solid phase adsorption (SPA), activated carbon test tubes and tar protocol (DIN CEN/TS 15439) for tar analysis of biomass derived syngas. *Biomass and Bioenergy*. 2017. Vol. 105. pp. 443–452.
17. Patent for the invention 120513 UA, ICP C 10 J 3/84, B 01 D 46/30. [Method of purification of generator gas and device for its implementation]. Karp I.M., Pyanykh K.E., Pyanykh K.K. Appl. a201611850 dated 23.11.16. Publ. 26.12.2019. — <https://sis.nipo.gov.ua/search/detail/139938511/> (Ukr.)
18. Karp I.M., Pyanykh K.E., Pyanykh K.K. [Utilization of sewage sludge]. *[Energy Technologies and Resource Saving]*. 2019. No. 2. pp. 34–48. DOI: 10.33070/etars.2.2019.05. (Ukr.)
19. Karp I.N., Martsevoi E.P., Pyanykh K.E., Antoshchuk T.A., Pianykh K.K. [Research and implementation of coal and biomass gasification processes with the goal of replacing natural gas]. *[Energy Technologies and Resource Saving]*. 2014. No. 4. pp. 3–13. — <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/handle/123456789/127382> (Rus.)
20. [Regulation (EC) No. 595/2009 of the European Parliament and of the Council of June 18, 2009 on type approval of vehicles and engines with regard to emissions from heavy vehicles (Euro VI) and on access to vehicle repair and maintenance information and amendments to Regulation (EC) No. 715/2007 and Directive 2007/46/EU and repealing Directives 80/1269/EEC, 2005/55/EU and 2005/78/EU. — https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_031-09#Text (Ukr.)

Received August 30, 2024