



УДК 662.75

DOI: 10.31388/2220-8674-2020-2-6

## ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРМІЧНИХ МЕТОДІВ ПЕРЕРОБКИ ПТАШИНОГО ПОСЛІДУ

Скляр О. Г., к.т.н.

ORCID: 0000-0002-0456-2479

Скляр Р. В., к.т.н.,

ORCID: 0000-0002-1547-5100

*Таврійський державний агротехнологічний університет  
імені Дмитра Моторного*

e-mail: radmila.skliar@tsatu.edu.ua

*Постановка проблеми.* У зв'язку із загостренням екологічних проблем в Україні [1-4], пов'язаних із забрудненням довкілля відходами сільського господарства (пташиним послідом, стічними водами та іншими відходами птахофабрик, гноєм і відходами тваринницьких комплексів) та життєдіяльності людини, досить актуальними є питання щодо визначення перспективних напрямів їх утилізації, тобто використання як вторинних матеріальних чи енергетичних ресурсів.

В наш час застосовують біологічні, термічні, хімічні, механічні та змішані методи утилізації [5-9] органічних відходів. З огляду на необхідність забезпечення екологічної та енергетичної безпеки держави особливо актуальним є вивчення перспектив термічних методів переробки пташиного посліду [10,11], який накопичується в великій кількості поблизу птахофабрик і може бути фактором передачі понад 100 збудників інфекційних та інвазійних хвороб. Такий стан може призвести в найближчий час до екологічної катастрофи, забруднення територій господарств і прилеглих районів.

*Аналіз останніх досліджень.* Проблеми вторинного використання та утилізації відходів сільськогосподарського виробництва досліджують Г. Г. Гелетука [12], І. М. Демчак, А. А. Долінський, Т. А. Желєзна [13], М. М. Жовнір, Г. М. Калетнік, Ю. В. Кернасюк, М. І. Кобець, А. Є. Коненченков, В. М. Лісничий, В. П. Сіденко, О.М. Ларина та ін. Проте до цього часу проблема утилізації відходів остаточно не вирішена, тому необхідність вивчення перспектив застосування передових, екологічно безпечних технологій утилізації органічних відходів є очевидною [10-12]. Відзначаючи наукову значимість і практичну цінність цих робіт, необхідно зазначити, що технологічна обґрунтованість і економічна доцільність переробки пташиного посліду визначаються його кількістю і вологістю.



*Формулювання мети статті.* Зробити порівняльний аналіз існуючих термічних методів переробки пташиного посліду.

*Основна частина.* Існуючі технології та установки для переробки пташиного посліду передбачають механічне зневоднення (центрифугування), сушку, метанове зброджування в біореакторі з отриманням біопалива, гранулювання біомаси, виробництво добрив, компостування [8,10-12]. Процеси є багатоопераційними, вимагають великої кількості обладнання та енергії, не забезпечують належним чином охорону атмосфери від парогазових викидів з систем сушіння, мають невисоку продуктивність, не завжди відповідають санітарним вимогам, зокрема при компостуванні пташиного посліду не виключається можливість поширення різних захворювань, забруднення ґрунтових вод і навколишньої території.

Основний хімічний склад посліду наступний, %: сухі речовини 34,5–48,3; зола 14–40 (в тому числі кальцій до 8,5; фосфор – 2–3; сирий жир (ефірний екстракт) – 2,9–4,5; сира клітковина – 14,25; безазотисті екстрактивні речовини – 46–48 [10,11]. До складу пташиного посліду входить клітковина, яка під дію високої температури розкладається на велику кількість простих органічних речовин, які є горючими.

На урожай добриво з посліду діє майже так само, як комплексні мінеральні добрива. Він володіє яскраво вираженою післядією протягом 2-3 років після внесення. Це пояснюється тим, що корисні речовини [10,11] з посліду вивільняються поступово. Добриво з пташиного посліду збалансоване за поживними речовинами і мікроелементами, екологічно чисте комплексне добриво, що містить всі необхідні поживні речовини для росту і розвитку рослин [10,11].

На підставі вище сказаного нами пропонується зробити порівняльний аналіз існуючих термічних методів переробки пташиного посліду.

Класифікацію термічних способів переробки біомаси можна проілюструвати на прикладі схеми (рис. 1), наведеної в роботі [14]. Існують три основні види термохімічної переробки - піроліз, газифікація і спалювання.

*Піроліз* - процес термічної деструкції органічної маси, що протікає при температурах 300...700°C в безкисневому середовищі. В результаті піролізу утворюється піролізна рідина, твердий залишок (біовугілля) і НППГ (неконденсовані піролізні гази). Піроліз може бути класифіковано залежно від швидкості нагріву сировини на повільний і швидкий [14]. Повільний піроліз, що протікає при низьких швидкостях нагрівання і, відповідно, великого часу перебування сировини в реакторі (від 1 год. до кілька днів), використовується для отримання максимальної кількості біовугілля [15,16]. Швидкий піроліз, що протікає при високих швидкостях нагріву і короткому часі перебування

матеріалу при заданих умовах, застосовується для отримання максимального виходу піролізної рідини [16]. Швидкість нагріву матеріалу при швидкому піролізі зазвичай становить 10...200 °C/c [16]. Піролізна рідина застосовується як паливо для котлів, двигунів внутрішнього згоряння для отримання теплової та електричної енергії, а так само рідкого палива для транспорту [16].

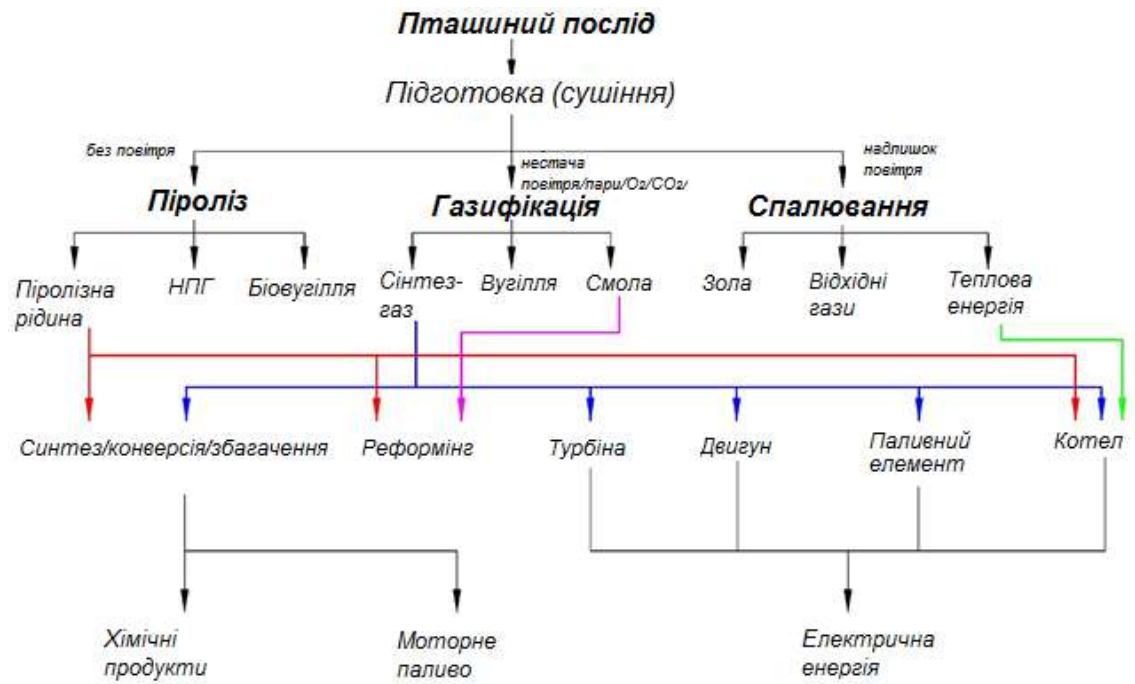


Рис. 1. Термічні способи переробки, що отримуються продукти і їх застосування

Піроліз біомаси в основному проводиться з метою отримання рідкої фракції, в наслідок чого процес відбувається при високих швидкостях нагрівання (швидкий піроліз). Процес перетворення органічної маси в леткі сполуки і твердий залишок починається при температурі понад 200 °C і супроводжується різними реакціями з розривом існуючих і утворенням нових хімічних зв'язків [17]. Цей процес разом з випаровуванням вологи (100–200°C), що міститься в сировині отримав назву первинний піроліз [14]. Він є важливим початковим кроком у всіх видах термохімічної конверсії сировини, зокрема спалювання, газифікацію та піроліз. Процес термічного розпаду відбувається в три стадії:

1. Розпад легко розкладаємих органічних сполук і знищення патогенних мікроорганізмів (температура стадії – 200–300 °C).

2. Розпад органічних полімерів, що входять до складу речовини (температура стадії – 300–450 °C). Дана стадія є основною.



3. Термічний розпад важко розкладаємих компонентів, таких як целюлоза (температура стадії - більше 450 °С) [14].

Піролізна рідина, яку отримано з осадів стічних вод (ОСВ), має рівень кислотності  $pH = 5,1-6,8$ , в той час як піролізна рідина з біомаси є кислотний розчин з  $pH = 2,8-3,0$  [17]. Присутність в її складі фенолів, амонійних і азотовмісних сполук призводить до того, що вона має нейтральну реакцію [16]. Азотовмісні сполуки при спалюванні легко конвертуються в  $NO_x$  і  $NO_2$ , тому їх присутність у великій кількості в складі піролізної рідини накладає обмеження на її використання.

Піролізна рідина з ОСВ має більшу нижчу теплоту згоряння (18,8 МДж/кг при вмісті води 23%) [16], ніж піролізна рідина з біомаси (13–18 МДж/кг при вмісті води 20–40%) [18], але при цьому істотно меншу, ніж нижча теплота згоряння мазуту (40,7 МДж/кг) [18], який використовується в якості рідкого палива. Зниження теплоти згоряння відбувається внаслідок її високої вологості та наявності кисневмісних сполук, які можуть становити до 1/3 від її маси. Наявність кисневмісних сполук також призводить до внутрішньої нестабільності піролізної рідини і викликає реакції полімеризації, що збільшує щільність і знижує її паливні якості [17]. Крім рідкої фракції в результаті піролізу утворюються неконденсовані піролізні гази і твердий залишок.

Основними недоліками твердого залишку є його висока зольність (68–74%), наявність важких металів і сірки. Важкі метали в твердому залишку від піролізу більш стійкі до процесів природного вилуговування, ніж зола від спалювання або вихідні ОСВ [19]. Твердий залишок може бути використано в якості добрива внаслідок високого вмісту азоту, навіть при наявності в ньому важких металів [17]. Вища теплота згоряння твердого залишку становить 5–21 МДж/кг [16]. Теплота згоряння залишку близько 5 МДж/кг робить його непридатним для спалювання та інших видів енергетичного використання. У цьому випадку залишок підлягає захороненню. Твердий залишок з великим тепловмістом може бути використано для отримання додаткової енергії шляхом спалювання, але в цьому випадку потрібні пристрої для очищення вихлопних газів від сполук, які містять важкі метали, що робить технологію більш вартісною.

Як самостійний процес піроліз пташиного посліду зазвичай проводиться для отримання рідкої фракції [20]. Початкова вологість сировини впливає на кількість води в отриманій піролізній рідині, в зв'язку з чим використовувати пташиний послід в його початковому вигляді недоцільно. Тому при піролізі перевага віддається підстилковому посліду (ПДП). У таблиці 1 представлені дані по виходу продуктів швидкого піролізу ПП і пташиного посліду [20].

Піролізна рідина, що утворюється в результаті піролізу, після відстоювання розшаровується на дві фракції. Перша фракція

складається із з'єднань, що містять в більшій кількості S, N, O і в меншій C і H.

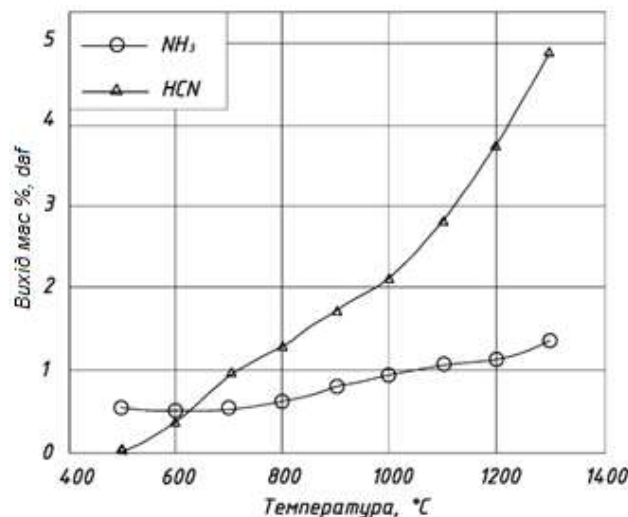
Таблиця 1

Вихід продуктів швидкого піролізу ПП і пташиного посліду

Вид палива	Вологість сировини, проц.	Температура, °C	Вихід продуктів, проц.		
			Газ	Рідина	Вугільний залишок
Пташиний послід	38...42	330	23	50	27
ПДП	33...35	500	43	23	34

Нижча теплота згоряння даної фракції становить 4,6МДж/кг. Друга фракція більш насичена важкими вуглеводнями, теплота згоряння даної фракції становить 27,9 МДж/кг, в зв'язку з чим вона представляє більший інтерес, як потенційне біопаливо. Співвідношення фракцій у складі піролізної рідини становить 1:2,3 [17]. Згідно [21], вища теплота згоряння піролізної рідини становить 28 МДж/кг, що пояснюється тим, що пташиний послід в початковому вигляді містить велику кількість білкових з'єднань.

У піролізних газах, отриманих в результаті піролізу пташиного посліду, контролюється вміст аміаку і HCN, як основних азотовмісних сполук, що утворюються при швидкому піролізі пташиного посліду (рис. 2).



\* *daf* – сухий беззольний стан

Рис. 2. Вихід азотовмісних компонентів в складі піролізних газів

Основним компонентом при температурі нижче 600 °C є NH<sub>3</sub> (менше 1 мас.%). При збільшенні температури зростає відношення HCN/NH<sub>3</sub> в складі газів і вже при температурі понад 800°C воно досягає



величини 2 [18]. Малий вихід HCN і NH<sub>3</sub> при температурах менше 600°C пояснюється тим, що більша частина азоту залишається в вугільному залишку [18].

*Газифікація* - процес термохімічного розкладання органічної маси з метою отримання газоподібного палива, зазвичай складається з H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> і домішок, таких як N<sub>2</sub>O, SO<sub>x</sub> [17]. Процес протікає при високих температурах (800...900°C і вище) в середовищі з нестачею кисню. В якості газифікуючого середовища використовується повітря, кисень, водяна пара або їх суміш [14]. Теплота згоряння отриманої газової суміші залежить від виду газифікуючого середовища, що використовується.

При повітряній газифікації теплота згоряння отриманої газової суміші становить 4...7 МДж/м<sup>3</sup>, при кисневій – 12...28 МДж/м<sup>3</sup> [20]. Отримана газова суміш використовується для отримання енергії шляхом спалювання в котлі, двигуні і турбіні, а також для виробництва електричної енергії в твердопаливних елементах [14].

Основною метою газифікації є отримання максимального виходу горючого газу. Газифікація біомаси проводиться в основному в повітряному середовищі. Процес газифікації ділиться на чотири основні стадії:

1. Сушка
2. Піроліз
3. Окислення
4. Газифікація [14].

Для здійснення процесу газифікації використовують газифікатори з нерухомим і псевдозрідженим шаром сировини [14]. Реактор з нерухомим шаром може бути з висхідним (гази, отримані в результаті реакцій, рухаються в протivotоці з сировиною) або низхідним (гази, отримані в результаті реакцій, рухаються в потоці з сировиною) потоком. У реакторі з низхідним потоком парогазова суміш летючих продуктів піролізу взаємодіє з твердим залишком піролізу при температурах порядку 1000...1100 °C, що призводить до зменшення частки рідкої фракції і збільшення вмісту H<sub>2</sub> і CO в кінцевих продуктах [16].

Основну частку газової суміші, одержуваної в результаті повітряної газифікації, складають азот, який потрапляє разом з газифікуючим агентом, CO, H<sub>2</sub> і CO<sub>2</sub>. При використанні повітряного дуття газова суміш має нижчу теплоту згоряння не вище 5,7 МДж/м<sup>3</sup>. У газі присутні смоли і тверді частинки у вигляді пилу. У порівнянні з газовими сумішами, які отримані в результаті піролізу, газові суміші, що одержувані шляхом газифікації мають більш низьку теплоту згоряння, але значно менший вміст смол.



Отриманий в результаті газифікації газ використовується в двигунах внутрішнього і зовнішнього згоряння або в твердооксидних паливних елементах для отримання електричної енергії. Вміст вуглеводнів, з одного боку, забезпечують відносно високу теплоту згоряння газової суміші, що робить її придатною для спалювання, з іншого боку, застосування отриманої газової суміші в паливних елементах або для отримання водню вимагає зниження вмісту вуглеводнів і збільшення виходу  $H_2$ . Для цих цілей температуру процесу знижують до  $900\text{ }^\circ\text{C}$  або використовують каталізатори [18]. Таким чином, в залежності від застосування газових сумішей використовують різні типи газифікаторів.

Смоли, що знаходяться в газі, при зниженні температури газу до температури їх конденсації викликають корозію і забруднення трубопроводів. Пряме спалювання газу в котлі не має обмежень за змістом смол. При використанні газу в твердопаливних елементах необхідно, щоб вміст смоли був не більше  $1\text{ мг/м}^3$  [18]. Для очищення газів від смол застосовуються скрубери і фільтри. Основний їх недолік в тому, що в результаті утворюється велика кількість стічних вод, а також введення системи очищення газів роблять технологію газифікації більш дорогою [22].

Умови протікання процесів газифікації є сприятливими для утворення таких сполук, як амоній ( $NH_3$ ), ціанід водню ( $HCN$ ) і сірководень ( $H_2S$ ). При подальшому спалюванні таких газів утворюються оксиди ( $NO_x$ ,  $N_2O$ ,  $SO_x$ ), що викликають забруднення атмосферного повітря, кислотні дощі, руйнування озонового шару. Сірководень також викликає корозію трубопроводів і лопаток турбін [23].

Газифікація пташиного посліду здійснюється в основному в паровому середовищі. Механізм її протікання є схожим з механізмом газифікації ОСВ. Склад продуктів газифікації пташиного посліду є наступним:  $80,8\%$  припадає на газоподібні продукти і смоли,  $19,2\%$  припадає на вугільний залишок [22]. При цьому смоли зазвичай складають не більше  $5\%$  від початкової маси вихідної сировини [22].

В результаті газифікації основними газовими компонентами є  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2O$ ,  $CO$  і  $CO_2$ . У незначних кількостях присутні  $NH_3$ ,  $H_2S$  і  $HCl$ . При температурах понад  $750\text{ }^\circ\text{C}$  відбувається процес зворотного розкладання  $CaCO_3$  на  $CaO$  і  $CO_2$  [23].

Установки по газифікації пташиного посліду зазвичай встановлюються на невеликих фермах для власних потреб [23].

*Спалювання* - процес горіння органічного матеріалу в повітрі. При спалюванні і газифікації протікають схожі між собою хімічні реакції. Істотна відмінність процесу спалювання від газифікації полягає в тому, що процес спалювання спрямовано на перетворення



хімічної енергії, закладеної в матеріалі, безпосередньо в теплову енергію, в той час як при газифікації утворюється газоподібне паливо, яке згодом може бути використано для отримання теплової енергії [14].

Спалювання пташиного посліду, як і спалювання інших відходів, - це процес, що протікає при високих температурах з надлишком кисню, метою якого є або отримання теплової енергії, або значне зменшення об'єму з можливістю отримання додатково теплової енергії [14]. Продукт, який потрібно отримати при спалюванні, визначає ступінь попередньої підготовки сировини. Якщо метою є тільки утилізація, тобто зменшення об'єму, то може використовуватися сировина з вологістю 65...80% [19]. Для отримання теплової енергії бажано підвищити теплоту згоряння сировини, що спалюється, тому її попередньо сушать до вологості 18...35% [19].

У процесі спалювання виділяється 6 основних стадій:

1. Сушка
2. Процес виходу летючих + автогазифікація.
3. Горіння летучих компонентів
4. Плавлення золи
5. Горіння вуглецю твердого залишку
6. Утворення агломератів золи.

Залежно від виду реактора, що використовується для спалювання, процес виходу летючих з палива може відбуватися послідовно або паралельно з процесом сушіння. Пари води і  $\text{CO}_2$ , що входять до складу летких, ще до введення окислювача починають реагувати з зовнішнім шаром вугільного залишку, що утворюється, - відбувається процес автогазифікації [24]. Через високий вміст летючих і низький вміст зв'язаного вуглецю процес виділення теплової енергії відбувається за рахунок спалювання летучих компонентів, що відрізняється від процесу спалювання вугілля, при якому виділення теплової енергії відбувається за рахунок повільного окислення твердого залишку. У присутності кисню летючі з великою швидкістю окислюються, утворюючи  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  і ін. Реакції утворення газової фракції є екзотермічні, внаслідок чого починається процес плавлення золи. Паралельно з цим йде горіння вуглецю, що залишився в твердому залишку, і утворення агломератів золи. Температура даної стадії складає 900–1300°C [14]. Для процесу спалювання використовують в основному два види пристроїв: багатоподові печі і реактори з псевдозрідженим шаром [14].

Після спалювання газ з реактора виходить при температурі 850...1300°C. Тепло, що міститься в газі, далі використовується в технологічному циклі (підігрів повітря, що використовується в якості окислювача, попередня сушка сировини) або направляється зовнішньому споживачеві [14].





Проблеми технології спалювання осаду є схожими з проблемами газифікації - необхідність використання термічно висушеного осаду, висока зольність отриманого твердого залишку, рухливість важких металів, забрудненість вихлопних газів.

Висока вологість вихідної сировини в значній мірі впливає на процес його згоряння. Спалювання пастоподібного осаду може привести до утворення великих часток в камері згоряння, що ускладнює процес перенесення твердого залишку і уповільнює перебіг хімічних реакцій. При спалюванні осаду після механічного зневоднення (вологість 80%) з теплою згоряння близько 4 МДж/кг не вистачає тепла екзотермічних реакцій окислення летючих речовин, що вимагає використання додаткового палива (наприклад, природного газу). Для здійснення стабільного процесу горіння необхідно, щоб вологість осаду не перевищувала 30–40% [23]. Наявність великої кількості вологи в паливі може привести до інтенсифікації реакції між  $\text{H}_2\text{S}$  і  $\text{H}_2\text{O}$  з утворенням  $\text{H}_2\text{SO}_3$  і ерозії трубопроводів в котлах [23].

Висока зольність отриманого твердого залишку призводить до утворення агломератів золи, які накопичуються всередині камери згоряння і ускладнюють процес спалювання в псевдозрідженому шарі. Згідно з дослідженнями, результати яких представлені в [23], практично всі важкі метали в процесі горіння осідають на поверхні частинок золи, які літають всередині камери згоряння.

Особливістю пташиного посліду є низька температура плавлення золи через присутність в її складі натрію, калію, фосфору [20]. У дослідженнях, проведених в [22], показано, що температура початку деформації золи становить  $970^\circ\text{C}$ . Якщо температура робочої зони всередині топки при спалюванні підніметься вище температури деформації золи, то поверхня палива, яке не встигло прогоріти, покривається плівкою з розплаву золи, колосники закоксуваються, а частки легкоплавкої золи, які виносяться газами, осідають на поверхнях димоходів і теплообмінників, що зі часом призводить до їх засмічення [24]. У зв'язку з цим процес спалювання пташиного посліду здійснюється так, що температура всередині робочої зони топки не піднімається вище  $850^\circ\text{C}$  [24]. Новоутворена зола являє собою цінне добриво, в складі якого присутній калій, натрій, фосфор, кальцій [23]. Присутність кальцію в складі золи призводить до того, що він пов'язує сірчані сполуки, які входять до складу пташиного посліду, а це сприяє зниженню виходу  $\text{SO}_x$  в складі газів [14]. У газових сумішах, що утворюються при спалюванні пташиного посліду, контролюється вміст парникових газів ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ),  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{SO}_x$ . [17].

Порівняння показників, що характеризують різні види термохімічної переробки ОСВ і доцільність їх використання, представлено в таблиці 2.



Таблиця 2

## Характеристики піролізу, газифікації та спалювання ОСВ

Показники	Піроліз	Газифікація	Спалювання
Основний продукт, (масова доля від вихідного, проц.)	Піролізна рідина (20...52%)	Газ (до 90%)	Газ (більше 60%)
Побічний продукт, (масова доля від вихідного, проц.)	Газ (3...28%), твердий залишок (35...62 %)	Твердий залишок (до 30%)	Зола (до 44%)
Засміченість газової фракції	Пари Hg, H <sub>2</sub> S, NO <sub>2</sub> , смоли	Пари Hg, смоли, пил, NH <sub>3</sub> , HCN, H <sub>2</sub> S, можлива наявність Zn, Pb і Cu	Пари Hg, H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub>
Засміченість твердого осаду	Важкі метали (менш рухома форма), сірка	Важкі метали (більш рухома форма), сірка	Важкі метали (більш рухома форма)

Всі три види термохімічної конверсії ОСВ дозволяють знизити його об'єм, при цьому отриманий твердий залишок забруднений важкими металами, рухливість яких мінімальна при використанні піролізу. Газова фракція у всіх випадках містить оксиди сірки, азоту, а також пари ртуті, що вимагає наявності потужних очисних систем. Основним продуктом газифікації і спалювання є газ, який використовується для отримання теплової та електричної енергії. Піролізна рідина, як основний продукт піролізу ОСВ, застосовується як паливо, але вимагає більш ретельної підготовки - зниження вологості, виділення потрібної фракції.

Властивості продуктів, одержуваних при використанні термічних методів переробки пташиного посліду, вельми схожі з властивостями продуктів, одержуваних з ОСВ. Як особливості можна відзначити низьку точку плавлення золи пташиного посліду.

В результаті піролізу вихід газу складає не більше 28% від маси вихідної сировини, при цьому теплота згоряння отриманої газової суміші доходить до 17 МДж/м<sup>3</sup>. Одним з переваг піролізу є те, що важкі метали в твердому залишку стають менш рухливими, ніж при використанні процесів газифікації і спалювання, а температура, характерна для піролізу (450...600°C), дозволяє виключити випаровування більшої їх частини.



Термічні способи переробки мають значні переваги перед іншими способами: в кілька разів знижується об'єм сировини, що переробляється, важкі метали в складі вихідних ОСВ після термічної переробки в основному локалізуються в твердому залишку, переробляється практично 100% всієї органіки, що міститься в сировині, повністю знищується патогенна мікрофлора.

*Висновки.* Серед термічних методів перевагу слід віддати газифікації і піролізу, тому що в результаті цих процесів відбувається конверсія вихідної речовини в газоподібне і рідке паливо, в той час як при спалюванні основним продуктом є теплова енергія. Переробка вихідної вуглеводневої сировини в газ, який має більш широку сферу застосування в порівнянні з рідкою фракцією, представляється найбільш доцільною, в зв'язку з чим газифікація має незаперечну перевагу, що полягає у високому ступені конверсії вихідної сировини в газ (до 90%). У той же час одержуваний газ має порівняно низьку теплоту згоряння (у середньому не більше 6 МДж/м<sup>3</sup>), а температура процесу така, що частина важких металів, що містяться в ОСВ, випаровується, потрапляючи в газ.

#### Список використаних джерел

1. Скляр О. Г. Методологія оптимізації ресурсовикористання у тваринництві. Праці ТДАТУ. Мелітополь, 2011. Вип. 11. Т.5. С. 245-251.

1. Скляр О. Г. Методологія оптимізації ресурсовикористання у тваринництві. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2011. Вип. 11, т. 5. С. 245-251.

2. Milko D. O., Pedchenko G. P., Zhuravel D. P., Bratishko V. V. Results of the nutritional preservation research of the alfalfa laying on storage with two-phase compaction. *INMATEH - Сельскохозяйственное машиностроение*. 2020. Vol. 60, № 1. P. 269-274. DOI: <https://doi.org/10.35633/inmateh-60-30>.

3. Мельник В. О. Екологічні проблеми сучасного птахівництва. *Птахівництво*. 2009. Вип. 63. С. 1-15.

4. Болтянська Н. І., Комар А. С. Визначення заходів з підвищення енергоефективності сільськогосподарського виробництва. *WayScience*. Дніпро, 2020. Т.1. С. 118-121.

5. Скляр Р. В. Теоретичні дослідження режимів і параметрів метантенку біогазової установки. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2020. Вип. 10, т. 1. DOI: 10.31388/2220-8674-2020-1-14.

6. Скляр О. Г. Аналіз роботи біогазових установок. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха, 2019. Вип. № 10 (109). С. 132-138.



7. Скляр Р. В. Аналіз способів подачі субстрату в метантенк біогазової установки. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2020. Вип. 10, т. 1. DOI: 10.31388/2220-8674-2020-1-4.
8. Энерго- та ресурсозбереження в тваринництві: підручник / Б. В. Болтянський та ін. Київ: Кондор, 2020. 410 с.
9. Скляр Р. В. Аналіз способів та засобів для перемішування субстрату в метантенках біогазових. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. Київ, 2019. Вип. 10. № 4. С. 19-26.
10. Скляр О. Г. Дослідження способів утилізації відходів птахівництва і тваринництва. *Сучасні проблеми та технології аграрного сектору України*. Ніжин, 2019. Вип. 12. С. 298-304.
11. Войтов В. А. Аналіз технологій утилізації відходів птахівництва за кордоном. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2019. Вип. 19, т. 4. С. 100-109. DOI: 10.31388/2078-0877-19-4-100-109.
12. Skliar A. Justification of conditions for research on a laboratory biogas plant. *MOTROL: Motoryzacja I Energetyka Rolnictwa*. Lublin, 2014. Vol. 16, № 2 (b). P. 183-188.
13. Гелетуша Г. Г., Железна Т. А. Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні: аналітична записка БАУ № 7. *Біоенергетична асоціація України*, 2014. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/04/position-paper-uabio-7-ua.pdf> (дата звернення: 10.10.2020).
14. Thermochemical processing of sewage sludge to energy and fuel: Fundamentals, challenges and considerations / Syed Shatir A Syed-Hassan et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 80. P. 888–913. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.262.
15. Скляр Р. В. Напрями використання органічних ресурсів у тваринництві. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2011. Вип. 11, т. 5. С. 210-217.
16. Kan T., Strezov V., Evans T. J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: a review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016. Vol. 57. P. 1126–1140.
17. Urban D. L., Antal M. J. Study of the kinetics of sewage sludge pyrolysis using DSC and TGA. *Fuel*. 1982. Vol. 61. P. 799–806.
18. Chiamonti D., Oasmaa A., Solantausta Y. Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2007. Vol. 11. P. 1056–1086.
19. Иванов Ю. Г., Шафеев А. Ф., Целиков В. В. Особенности сжигания подстилочного помета при термической утилизации. *Вестник ФГОУ ВО МГАУ*. 2015. № 1 (65). С. 25-31.



20. Boltianska N. I. Measures to improve energy efficiency of agricultural production. *Abstracts of XIII International Scientific and Practical Conference. Bordeaux «Social function of science, teaching and learning»*. Bordeaux, France 2020.

21. Agblevor F. A., Beis S., Kim S. S., Tarrant R. Biocrude oils from the fast pyrolysis of poultry litter and hardwood. *Waste Manag.* 2010. Vol. 30. P. 298–307.

22. Ng W. C., You S., Ling R., Yew-Hoong Gin K. Co-gasification of woody biomass and chicken manure: syngas production, biochar reutilization, and cost-benefit analysis. *Energy.* 2017. Vol. 139. P. 732-742.

23. Han X. X., Niu M. T., Jiang X. M., Liu J. G. Combustion characteristics of sewage sludge in a fluidized bed. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2012. Vol. 51. P. 10565–10570.

24. Larina O. M., Zaichenko V. M. Energy Production from Chicken Manure by Pyrolysis and Torrefaction. *25th European Biomass Conference and Exhibition. EUBCE-2017/–12-15 June 2017.* P. 1205–1209. DOI: 10.5071/25thEUBCE2017-3AV.3.63.

### **ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРМІЧНИХ МЕТОДІВ ПЕРЕРОБКИ ПТАШИНОГО ПОСЛІДУ Скляр О.Г., Скляр Р.В.**

#### ***Анотація***

В статті наведено порівняльну характеристику існуючих термічних методів переробки пташиного посліду та осадів стічних вод. Доведено, що термічні способи переробки мають значні переваги перед іншими способами. Наведено, що всі види термохімічної конверсії пташиного посліду дозволяють знизити його об'єм, при цьому отриманий твердий залишок забруднений важкими металами, рухливість яких мінімальна при використанні піролізу. Отримано, що серед термічних методів перевагу слід віддати газифікації і піролізу, так як в результаті цих процесів відбувається конверсія вихідної речовини в газоподібне і рідке паливо, в той час як при спалюванні основним продуктом є теплова енергія. Переробка вихідної вуглеводневої сировини в газ, який має більш широку сферу застосування в порівнянні з рідкою фракцією, представляється найбільш доцільною, в зв'язку з чим газифікація має незаперечну перевагу, що полягає у високому ступені конверсії вихідної сировини в газ.

**Ключові слова:** термічні методи, пташиний послід, осадки стічних вод, піроліз, газифікація, спалювання, піролізна рідина, газ.

### **СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПТИЧЬЕГО ПОМЕТА Скляр А.Г., Скляр Р.В.**

#### ***Аннотация***

В статье приведена сравнительная характеристика существующих термических методов переработки птичьего помета и осадков сточных вод. Доказано, что термические способы переработки имеют значительные



преимущества перед другими способами. Показано, что все виды термохимической конверсии птичьего помета позволяют снизить его объем, при этом полученный твердый остаток загрязнен тяжелыми металлами, подвижность которых минимальна при использовании пиролиза. Получено, что среди термических методов предпочтение следует отдать газификации и пиролизу, так как в результате этих процессов происходит конверсия исходного вещества в газообразное и жидкое топливо, в то время как при сжигании основным продуктом является тепловая энергия. Переработка исходного углеводородного сырья в газ, который имеет более широкую сферу применения по сравнению с жидкой фракцией, представляется наиболее целесообразной, в связи с чем газификация имеет неоспоримое преимущество, заключающееся в высокой степени конверсии исходного сырья в газ.

**Ключевые слова:** термические методы, птичий помет, осадки сточных вод, пиролиз, газификация, сжигание, пиролизная жидкость, газ.

## COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF THERMAL METHODS FOR PROCESSING BIRD LITTER

Skliar A, Skliar R.

### *Summary*

The article provides a comparative characteristic of existing thermal methods for processing poultry manure and sewage sludge. It has been proved that thermal processing methods have significant advantages over other methods: the volume of processed raw materials decreases several times, heavy metals in the composition of the starting material after thermal processing are mainly localized in the solid residue, almost 100% of all organic matter contained in the raw material is processed completely the pathogenic microflora is destroyed. It has been shown that all types of thermochemical conversion of poultry droppings can reduce its volume, while the resulting solid residue is contaminated with heavy metals, the mobility of which is minimal when pyrolysis is used. Also, the properties of products obtained using thermal methods of processing poultry manure are very similar to the properties of products obtained from sewage sludge. As a special feature, the low melting point of chicken manure ash can be noted. It was found that, among thermal methods, preference should be given to gasification and pyrolysis, since as a result of these processes, the initial substance is converted into gaseous and liquid fuel, while during combustion, the main product is thermal energy. The processing of the initial hydrocarbon feedstock into gas, which has a wider scope of application in comparison with the liquid fraction, seems to be the most expedient, and therefore gasification has an indisputable advantage, consisting in a high degree of conversion of the feedstock into gas. At the same time, the produced gas has a relatively low calorific value, and the process temperature is such that part of the heavy metals contained in the wastewater sludge evaporates into the resulting gas.

**Key words:** thermal methods, bird droppings, sewage sludge, pyrolysis, gasification, combustion, pyrolysis liquid, gas.