

А. П. Ранський¹О. А. Гордієнко¹

АЛЬТЕРНАТИВНА ЕНЕРГЕТИКА. ПОВІДОМЛЕННЯ V*. КОМПЛЕКСНЕ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ РОЗРОБЛЕННЯ ПАЛИВНИХ БРИКЕТІВ

¹Вінницький національний технічний університет

Наявний на сьогодні дефіцит викопних джерел енергії (нафти, природного газу) Україна може частково компенсувати ефективним використанням великих об'ємів біомаси (23 млн т умовного палива на рік) як альтернативного джерела під час виробництва твердих, рідких та газоподібних енергетичних ресурсів. Розглянуті основні фізичні, хімічні, термічні, термо-, та біохімічні методи перероблення біомаси та перспективне використання отриманих альтернативних енергоносіїв. Зазначено, що сьогодні розвиненні країни світу все більше забезпечують власний паливно-енергетичний сектор впровадженням «зелених» технологій, акумулюючи відновлювальну енергію сонця (PV-модулі), вітру (вітроенергетика) та водню (воднева енергетика, паливні елементи). Акцентовано увагу на перспективності виробництва паливних брикетів з наявної біомаси та можливого їх використання для опалення приватного житла та інших приміщень в селах, селищах та містах. Проаналізовано склад та основні технічні характеристики паливних брикетів, що використовуються сьогодні в Україні, теплота згоряння яких змінюється у досить широких межах. Так, брикети на основі бурого і деревного вугілля, пірокарбону мають теплоту згоряння 5500...7000 ккал/кг, відходів деревообробної та целюлозно-паперової галузей промисловості — 3820...4500 ккал/кг, відходів сільського господарства — 3860...4800 ккал/кг. Розглянуто перспективи, переваги використання паливних брикетів на основі технологій їх виготовлення включно з підготовкою вихідної сировини та її пресування/брикетування.

Встановлено, що отримання паливних брикетів відповідає основним принципам циркулярної економіки: відходи низки виробництв (деревообробної та целюлозно-паперової промисловості) і технологій (перероблення пластмасових відходів піролізом), відходів сільського господарства стають вихідною сировиною для отримання затребуваної кінцевої продукції — паливних брикетів з подальшим їх ефективним використанням. Розглянута технологія отримання паливних брикетів пресуванням шихти, що складалась із пірокарбону, деревної тирси та гофрокартону, без її нагрівання та додаткового введення клейких додатків.

Ключові слова: переробка відходів, альтернативні джерела енергії, паливні брикети, пірокарбон, агробіомаса, технології захисту довкілля.

Вступ

Великий об'єм імпортованих джерел енергії (нафти, газу, кам'яного вугілля) складає на сьогодні критичну загрозу для енергетики і економіки України, навіть не зважаючи на те, що наша держава є транзитною для їх поставки в країни ЄС. В 2021 році за рахунок власних енергоресурсів (нафти, природного газу, вугілля, ядерної та відновлювальної енергетики) Україна покривала внутрішній попит в енергії на 65 %, а більше ніж третина її дефіциту припадала на імпортовані закупівлі. При цьому первинне споживання енергії за ресурсами склало: природний газ — 31 %; вугілля — 30 %; атомна енергетика — 21 %; нафта і відновлювальні джерела енергії (ВДЕ) — 18 % [1]. У 2021 році Україна виробила 156 млрд кВт-год електроенергії, з них на атомну енергетику (АЕС) припадало 55,1 %, на теплову (ТЕЦ) — 29,3 %, на гідроенергетику (ГЕС) — 6,7 % і на відновлювальну енергетику (ВДЕ) — 8 % [2]. З початком війни України з рф генерування та споживання енергії суттєво впало, частково цей дефіцит може бути компенсований ефективним використанням відходів

* Повідомлення IV див. [51]

© А. П. Ранський, О. А. Гордієнко, 2025

деревообробної, целюлозно-паперової промисловості та сільського господарства [3]–[6]. Так, енергетичний потенціал біомаси в Україні становить понад 23 млн т умовного палива на рік, зокрема: енергетичні культури та відходи деревини — 6,7; солома зернових культур — 4,6; інші відходи сільськогосподарських культур — 5,2; рідкі палива (біоетанол, етанол) — 2,2; торф — 0,6; інші види — 4,0 млн т умовного палива. Певно, що використання означених альтернативних джерел енергії (деревини, торфу, недревних рослинних відходів), передусім місцевим самоврядуванням, в паливно-енергетичному балансі регіонів могли б сьогодні суттєво покращити рівень їх енергозабезпечення.

На рис. 1 показані найпоширеніші технології конверсії біомаси в енергетичні ресурси. При цьому показано, що технології перероблення/конверсії біомаси в енергію насамперед залежать від її сировинно-енергетичних характеристик та можуть включати фізичні, хімічні, термічні, термо-, та біохімічні методи перетворення. Необхідно відмітити, що в результаті перероблення біомаси, як альтернативного джерела енергії, отримують тверді (деревне вугілля, паливні брикети), рідкі (біоетанол, біодизель, смоли) та газоподібні (біогаз) енергетичні ресурси.



Рис. 1. Шляхи конверсії рослинної і тваринної біомаси в енергетичні ресурси.

Умовні позначення: 1 — пряме спалювання в котлах опалення/когенераційних установках [12];

2 — сучасні методи піролізу деревини [19], [20]; 3 — пресування/брикетування рослинної та нерослинної сировини [7]–[11];

4 — ферментативне перероблення целюлозовмісної сировини [21]–[24]; 5 — переестерифікація тригліцеридів/рослинних олій спиртами [15]–[18]; 6 — анаеробне зброджування відходів рослинної сировини [26]–[32];

7 — анаеробне зброджування відходів тваринної сировини [4], [33]–[35]

Механічні/фізичні методи використовують для отримання твердого палива (п. 3, рис. 1). Основними стадіями є подрібнення твердої біомаси, зазвичай деревини та відходів деревообробної промисловості, з використанням гладковалкових дробарок та барабанних млинів, що забезпечує розмір кінцевої фракції 1,5...6,0 мм [7]. Брикетування твердої біомаси зазвичай проводять на гідравлічних або механічних пресах (60...220 МПа), що забезпечує необхідну міцність паливних брикетів [8]–[10]. Отримані паливні брикети є конкурентоспроможними на енергетичному ринку твердого палива України та мають необхідні енергетичні, механічні та екологічні властивості [11].

Термічне перероблення біомаси пов'язане з її прямим спалюванням та отриманням теплової і електричної енергії (п. 1, п. 7; рис. 1). Пряме спалювання біомаси є найстарішою і найрозвиненішою технологією отримання теплової енергії, а виробництво електроенергії з твердої біомаси включає ті ж технології, що застосовуються і для викопного палива [12]. В системах теплоелектрогенерування потенційна хімічна енергія органічних речовин (палива) перетворюється в теплову енергію водяної пари, яка, зі свого боку, перетворюється в електричну [13]. На сьогодні в світі широко застосовують

комбіноване виробництво теплової та електричної енергії з біомаси (когенерацію) [12]. Така технологія забезпечує найвищу ефективність використання палива і задовільні екологічні параметри [14]. Когенерація найефективніша, коли теплоелектроцентралі на твердій біомасі, когенераційні установи на біогазі розміщені близько до споживачів теплової енергії.

Хімічні методи перероблення біомаси (олії ріпаку, соняху, сої) включають переестерифікацію тригліцеридів спиртами ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_x\text{OH}$, $x = 0 \dots 2$) в присутності лугів (KOH , NaOH), як каталізаторів процесу (п. 5, рис. 1). Кінцевий біодизель отримують розділенням/сепарацією гліцеролової та біодизельної фракцій [15]—[18]. Біодизель, як пальне для дизельних автомобілів («Фольксваген», Німеччина), на сьогодні набуло широкого використання у багатьох країнах ЄС.

Термохімічні/піролізні методи переробки деревини (берези з вологістю 10...15 %) полягали в її терморозкладанні у разі нагрівання без доступу повітря (400...600 °C) з утворенням деревного вугілля (ДВ; 24...25 %), рідких (деревної смолки: оцтової кислоти, метанолу, інших органічних сполук; 50...55 %) та газоподібних (CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , інших вуглеводнів; 22...23 %) компонентів (п. 2, рис. 1) [19], [20]. ДВ використовують в металургії (Бразилія), у виробництві кристалічного силіцію (Китай), як активний каталізатор і сорбент в медицині та для виготовлення фільтрувальних протигазів.

Біохімічні методи перероблення різноманітної рослинної сировини (РС) включають її гідроліз, зброджування та дистиляцію (п. 4, рис. 1). Гідроліз полісахаридів РС до моносахаридів проводять 70...80 %-ю сульфатною кислотою, за температури 15...60 °C та атмосферного тиску [21], [22]. Подальше анаеробне зброджування сахаридів (сусла) здійснюють за допомогою дріжджів роду *Saccharomycetes* і бактерій *Zimomonas* [23], [24], отримуючи біоетанол. Остаточне виділення біоетанолу проводять його ректифікацією/дистиляцією відповідно до умов ДСТУ 4221 [25].

Ферментативним анаеробним зброджуванням переробляють також чисельні відходи цукрової, спиртової, пивоварної та олійножирової промисловості України, технології використання яких є екологічно виваженими та економічно доцільними (п. 6, рис. 1), [26]—[29]. Отриманий біогаз має у своєму складі до 65 % метану, що дає можливість ефективного його використання як альтернативного джерела енергії [30]—[32].

Ферментативне анаеробне зброджування широко використовують для перероблення відходів тваринництва (пташиного посліду, гною великої рогатої худоби, свиней, овець, відходів боєнь), (п. 7, рис. 1), [4], [33]—[35]. Переробку відходів тваринництва умовно можна подати чотирма етапами [34]:

- ферментативне перетворення відходів (білків, полісахаридів, целюлози, ліпідів) у водорозчинні амінокислоти, цукри, аліфатичні карбонові кислоти. Умови: наявність екзоферментних бактерій (амілази, протеази, ліпази), $\text{pH} = 4,5 \dots 6,0$, довготривале перебування у ферментаторі;

- розщеплення водорозчинної органічної маси кислотоутворювальними бактеріями до нестійких карбонових кислот: мурашиної, оцтової, молочної, бурштинової; низькомолекулярних спиртів (етанолу) та газоподібних речовин: CO_2 , H_2 , H_2S , NH_3 . Умови: герметична ємність метантенку;

- перетворення карбонових кислот: мурашиної, пропіонової, бутанової, молочної під дією бактерій *Clostridium acetium*, *Clostridium thermoaceticum* до попередників метану: оцтової кислоти за реакцією $4\text{H}_2 + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O}$. Необхідно зауважити, що утворення оцтової кислоти є визначальною стадією процесу метаноутворення. Умови: $\text{pH} = 6,6 \dots 8,0$;

- перетворення продуктів життєдіяльності метанових бактерій *Methanobacterium formicicum*, *Methanospirillum hungati*, а саме ацетату, вуглекислого газу та водню в метан (90 %): $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$. Умови: $\text{pH} \approx 7,0$.

В результаті ферментативного анаеробного зброджування/метаногенезу тваринних відходів утворюється газова суміш: метану (50...60 %), оксиду (IV) карбону (30 %), сірководню (1,5...2,0 %) та незначної кількості таких газів як N_2 , O_2 , H_2 , NH_3 та CO .

Таким чином, дані на рис. 1 щодо основних технологій конверсії біомаси в альтернативні джерела енергії свідчать про значну перспективність цього напрямку та можливість отримання альтернативних твердих, рідких та газоподібних джерел енергії. Вибір оптимальної технології перероблення/конверсії біомаси в енергію залежить від цілої низки чинників, проте визначальними при цьому є економічна та екологічна складова.

Постановка проблеми. На сьогодні розвиненні країни світу все більше забезпечують власний паливно-енергетичний сектор впровадженням «зелених» технологій, акумулюючи відновлювальну енергію сонця (PV-модулі), вітру (вітроенергетика) та водню (воднева енергетика, паливні елементи). Такий науково обґрунтований вектор розвитку відновлювальної енергетики притаманний навіть для країн, які мають найбільші у світі природні енергетичні ресурси — Саудівської Аравії,

Канади, США, Австралії [1]. Тобто, сьогодні новітні розробки в галузі енергетики фокусуються насамперед на переведенні всієї світової енергетичної системи на «зелену» енергетику. Беззаперечним є те, що кожна з країн вибирає свій сегмент в розвитку «зеленої» енергетики, ґрунтуючись на своїх економічних, наукових можливостях та національних інтересах. Україна в умовах повномасштабної війни з РФ має масштабні систематичні руйнування енергетичної інфраструктури, відновлення і модернізація якої після війни може бути представлене симбіозом новітніх світових технічних рішень в галузі теплової, атомної, гідроенергетики та ефективного використання альтернативних джерел енергії. Таким чином, розвиток сучасних технологій отримання енергії із альтернативних джерел енергії, пов'язаних з конверсією великої кількості відходів деревообробної, целюлозно-паперової промисловості та сільського господарства може стати суттєвим підґрунтям для виробництва твердого палива, енергетичної незалежності та екологічної безпеки України.

Мета роботи — аналіз виробництва паливних брикетів із біомаси як альтернативного джерела енергії, а також визначення перспектив його використання для місцевих громад.

Викладення основного матеріалу досліджень

Аналіз вихідної сировини для виробництва паливних брикетів. В табл. 1 подані склад та основні технічні характеристики сировини та паливних брикетів, які на сьогодні найбільше використовуються.

Таблиця 1

Склад та основні технічні характеристики сировини паливних брикетів

Компоненти паливних брикетів		Вологість, %мас.	Нижча теплота згоряння		Зольність, %мас.	Література
			МДж/кг	Ккал/кг		
1. Буре, деревне вугілля, пірокарбон із перероблення пластику						
Буре вугілля	стандарт*	25...30	17,99	4300	25	[8]
	брикет	3...4	23,01	5500	10...25	[8]
Деревне вугілля	стандарт*	2,5...10	31,5...34,3	7530	3,1...3,4	[36], [37]
	брикет	< 8	29,3...33,5	7000	2,5...3,5	[8]
Пірокарбон	стандарт*	2,4	27,7	6500	19,5	[38]
	брикет	10...14,5	25,6...26,0	6120	12,3	[39], [40]
2. Відходи деревообробної та целюлозно-паперової галузей промисловості						
Дережина	стандарт*	30...40	10,2...12,3	4100	0,2...1,7	[41], [42]
	брикет	5...7	18,83	4500	1,0	[42], [36]
Тирса деревна	стандарт*	30...40	8,1...12,4	2860	0,2...1,7	[42]
	брикет	< 10	17,0	4060	1,5	[42], [36]
Картон	стандарт*	6,1...6,5	18,56	4436	6,5	[36]
	брикет	7,6	16,0...18,0	3820	3,0...3,5	[36]
3. Недеревні відходи сільського господарства						
Солома гречана	стандарт*	7,47	17,04	4070	1,5	[43]
	брикет	5,10	20,08	4800	1,5...6,0	[43]
Стебла соняху	стандарт*	10...20	14,65	3500	3...7	[42]
	брикет	< 10	18,00	4300	4,3	[42]
Лушпиння соняху	стандарт*	15	15,43	3690	3...7	[42], [41]
	брикет	8,3	17,2...18,3	4110	4,0	[36], [39]
Солома пшениці	стандарт*	10...20	14,00	3340	4...5	[42], [41]
	брикет	7,0	16,15...17,15	3860	8,0	[36]

Примітки: стандарт* — індивідуальна речовина

Необхідно зазначити такі особливості сировини паливних брикетів:

– буре, деревне вугілля та пірокарбон, отриманий під час піролізу пластикових відходів (п. 1, табл. 1) є найенергоємнішими складовими з нижчою теплотою згоряння 4300...7530 Ккал/кг і виступають як головний компонент композиційних паливних брикетів;

– відходи деревообробної та целюлозно-паперової промисловості (п. 2, табл. 1) мають суттєво меншу нижчу теплоту згоряння 2800...4500 Ккал/кг, проте наявність у їх складі природних (лігнін, смола) або штучно введених (полівінілацетат, крохмаль) речовин дозволяє отримати паливні брикети із задовільними механічними властивостями;

– недеревні відходи сільського господарства (п. 3, табл. 1) мають подібну до деревних відходів нижчу теплоту згоряння 3340...4800 Ккал/кг, проте їх близько у 1,5 рази більше, ніж деревних, через

що вони є головним альтернативним джерелом відновлювальної енергетики, ґрунтуючись на загальному об'ємі біомаси в Україні;

– досліджені деревні та недеревні відходи (п. 2, п. 3, табл. 1), окрім наявної значної сировинної бази, об'єднує також те, що вони мають відносно низьку ціну у порівнянні з ціною виготовлених із них паливних брикетів. До того ж, розглянуті відходи деревної, целюлозно-паперової галузей промисловості та сільського господарства мають однаковий хімічний склад (табл. 2), що свідчить про їх волокнисту будову (целюлоза) та можливості утворення ущільненої структурованої граничної поверхні під час їх пресування та виготовлення паливних брикетів.

Таблиця 2

Хімічний склад недеревної рослинної сировини (мас. %)

Рослинна сировина		Целюлоза	Геміцелюлоза	Лігнін	Зольність	Література
пшениця	стебла	44,3	26,7	16,5	6,6	[44]
соняшник	стебла	40,6	21,3	20,1	3,0	[44]
	лушпиння	41,0	24,0	27,8	0,4	[45]
гречка	стебла	39,9	28,2	20,0	2,8	[46]
	лушпиння	36,0	32,0	19,5	0,3	[45]
деревина*	тирса	40...45	20...30	19...30	0,3...0,8	[44]

Примітки: * — дані подані для порівняння з відповідними характеристиками деревної сировини.

Перспективи та переваги використання паливних брикетів. Країни ЄС активно використовують паливні брикети із біомаси. Так, в Німеччині виробництво брикетів із деревини та агробіомаси складає 1,75 млн т/рік із загальною потужністю брикетування біомаси 3,25 млн т/рік [47]. Основна частина вироблених паливних брикетів — близько 1,2 млн т/рік використовується на внутрішньому ринку, головним чином, в малих котлах опалення приватних осель з ручним завантаженням, але певний об'єм використовується і в напіваавтоматичних і автоматичних котлах потужністю до 5 МВт. В Україні використання паливних брикетів та пелетів із біомаси не є новим. Так, наприклад, ріст сектору біоенергетики протягом 2010—2016 рр., оцінювався, в середньому, у 45 % на рік з виробництва біопалива та у 35 % річних із загального постачання первинної енергії з них. Сьогодні у виробництві паливних брикетів найбільша частка використаної вихідної сировини припадає на деревину, лушпиння, соломку та очерет. Обсяг ринку України паливних брикетів для індивідуального використання населенням оцінюється приблизно у 1 млн т/рік, з його зростанням до 3 млн т/рік до 2035 року [48].

Паливні брикети сьогодні називають «евродровами» за їх високу прогнозовану якість. При цьому основними перевагами паливних брикетів є:

- наявність значної сировинної бази, особливо для брикетів із біомаси сільськогосподарських виробництв (п. 3, табл. 1, п. 3, табл. 3);
- більша теплота згоряння паливних брикетів в 1,6—2,5 рази у порівнянні із теплотою згоряння індивідуальних речовин (табл. 1) з набагато кращими їхніми паливними характеристиками;
- менша питома вартість енергії паливних брикетів (грн/ГДж) у порівнянні з питомою вартістю енергії природної сировини та майже її ідентичність з вартістю енергоносієм, за винятком електроенергії (табл. 3);
- можливість їх ефективного використання у індивідуальних побутових печах (15...30 кВт) та невеликих твердопаливних котлах (100...150 кВт) з ручним завантаженням;
- паливні брикети не потребують спеціального обладнання, а їх спалювання має кращі екологічні показники;
- паливні брикети є зручнішими та економічнішими, ніж природна сировина під час їх транспортування та зберігання (п. 2, табл. 3);
- паливні брикети можна використовувати як дешевший заміник вугілля, особливо у тих регіонах, де воно є дорогим (> 7000 грн/т, табл. 3).

Таким чином, можна стверджувати, що у разі конверсії/переробленні біомаси в альтернативні джерела енергії паливні брикети на сьогодні займають вагоме місце в загальному енергетичному секторі України.

Виготовлення паливних брикетів. З технологій конверсії відновлювальних енергоресурсів, що показані на рис. 1, отримання брикетів має найменшу глибину перероблення біомаси, що включає подрібнення та наступне її пресування/брикетування до кінцевої продукції. Типовими вимогами до вихідної сировини (п. 1; п. 3, табл. 2) є її вологість 6...12 % та фракційний склад після подрібнення

та просіювання 2...10 мм. На сьогодні Україна має достатню кількість необхідних сушарок для підготовки вихідної сировини: барабанні сушарки АВМ для висушування сировини вологістю 50...75 % до необхідних 10...15 %; сушарки трубчасті HGJ (000, «Ньютерм», Україна) для висушування сировини вологістю ~45 % до 8...12 % вологості на виході; сушарний комплекс барабанного типу АВМО-65 для висушування соломи, тирси деревної, торфу продуктивністю 1 т/год до вологості 5 % [43]. Пресування/брикетування підготовленої біомаси є на сьогодні універсальним методом використання пресового обладнання шнекового типу [49]. Так, в роботі [50] досліджено отримання паливних брикетів без центрального отвору із рослинної сировини (соняшника, льону, сої, ріпаку, коріандру) на трисекторному прес-екструдері за температури: 114, 97, 84 °С. Отримані паливні брикети мали задовільні показники за щільністю, об'ємній масі та тривалості горіння. Іншим методом брикетування є використання механічних, гідравлічних або гідромеханічних пресів [10].

Таблиця 3

Порівняння питомої вартості енергії викопного палива, біопалива та паливних брикетів із біомаси

Вид енергоносія або палива	Ціна (01.01.2025)	Нижня теплота згоряння, МДж/кг	Вартість одиниці енергії в паливі/ енергоносії, грн/ГДж
	А	Б	А / Б
1. Викопні енергоносії, електроенергія			
Природний газ для населення	7960 грн/тис. м ³	34,0	234
Природний газ для промисловості	27000 грн/тис. м ³	34,0	794
Мазут, М100	12420 грн/т *	42,0	296
Вугілля	7000...16000 грн/т *	25,0	280...640
Електроенергія	4,32 грн/кВт·год	—	1201
2. Паливо з природної сировини			
Дрова (вологість 40%)	1500 грн/т *	10,0	150
Солома в тюках	2000 грн/т *	14,0	143
3. Паливні брикети із біомаси			
Паливні брикети RUF	5900 грн/т *	18,0	327
Паливні брикети із соломи злакових	5000 грн/т *	17,0	294
Паливні брикети із лушпиння соняшнику	5000 грн/т *	18,0	277
Паливні брикети NESTRO	3250 грн/т *	19,0	171

Примітка: * — орієнтовна ціна; на реальну ціну впливають такі чинники як регіон, виробник, показники якості певної партії продукту.

В роботі [39] досліджено «мокре» пресування паливних брикетів типу «RUF», які склались із комбінованих альтернативних джерел відновлювальної енергії: пірокарбону, отриманому при піролізі пластмасових відходів, тирси деревної та гофрокартону. Принципова технологічна схема процесу показана на рис. 2.

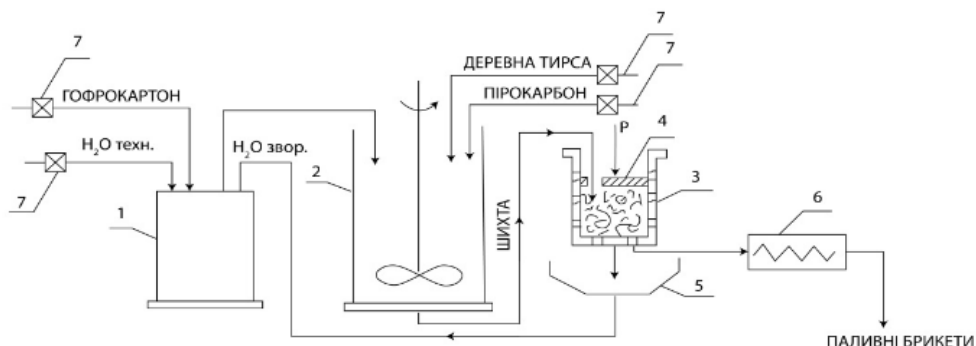


Рис. 2. Принципова технологічна схема виготовлення паливних брикетів пресуванням шихти [39]:

- 1 — ємність для набухання подрібненого гофрокартону; 2 — апарат для отримання шихти з перемішувальним електроприводом; 3 — прес-форма; 4 — плунжер гідравлічного преса; 5 — ємність для збирання фільтрату; 6 — електросушарка; 7 — дозувальний пристрій

Технологічна лінія (рис. 2) працює таким чином. В ємність 1 через дозатори 7 подається розрахована кількість технічної води, подрібненого гофрокартону та перемішується електромеханічним приводом до утворення однорідної водно-колоїдної пульпи. Однорідна пульпа, що утворилася, а також розрахована кількість пірокарбону та деревної тирси подається в апарат 2, де суміш

перемішується за кімнатної температури до утворення однорідної пульпи чорно-сірого кольору. Отримана пульпа/шихта порційно подається на гідравлічний прес МС-500. Отримані паливні брикети висушувались в електросушарці або шляхом складування під навісом в природних умовах з дотриманням оптимальної повітряної аерації.

Отримані комбіновані паливні брикети, що містили пірокарбон, деревну тирсу, гофрокартон, мали теплоту згорання 17,9...21,7 МДж/кг. Механічну міцність паливних брикетів визначали за стандартною методикою: за 10 падінь паливних брикетів з висоти 0,5 м кількість утворених частинок розміром до 5 мм становила 4,8...14,6 мас. %, що відповідає показнику, наприклад, паливних кам'яновугільних брикетів, виготовлених з використанням бітумних в'язучих [39].

Висновки

1. Проаналізовано комплексне використання різнопланових біоресурсів шляхом їх фізичних, хімічних, термічних, термо- та біохімічних методів перероблення/конверсії з отриманням альтернативних твердих, рідких та газоподібних джерел енергії.

2. Показана перспективність використання паливних брикетів в приватному/побутовому секторі як ефективного замітника природного газу, який дорожчає, та кам'яного вугілля, особливо у негацифікованих регіонах України.

3. Встановлено, що отримання паливних брикетів відповідає основним принципам циркулярної економіки: відходи низки виробництв (деревнообробної та целюлозно-паперової промисловості) і технологій (піролізне перероблення пластмасових відходів), відходів сільського господарства стають вихідною сировиною для отримання затребуваної кінцевої продукції, а саме паливних брикетів з подальшим їх ефективним використанням.

4. Розглянута технологія отримання паливних брикетів пресуванням шихти, що складалась із пірокарбону, деревної тирси та гофрокартону, без її нагрівання та додаткового введення клейких додатків. Отримані паливні брикети мають задовільні механічні властивості, високу теплоту згорання та можуть бути рекомендовані для використання в індивідуальних печах опалення і невеликих котельнях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] О. О. Корогодова, Н. О. Черненко, Т. С. Моїсєєнко, та Я. І. Глушенко, «Аналіз привабливості відновлюваної енергетики в окремих країнах», *Time description of economic reforms*, № 3, с. 74-82, 2022. <https://doi.org/10.32620/cher.2022.3.10>.
- [2] «Виробництво електроенергії в Україні за рік зросло на 5%», *Економічна правда*, 11 січня. 2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://epravda.com.ua/news/2022/01/11/681292/>.
- [3] Д. В. Степанов, С. Й. Ткаченко, та А. П. Ранський, «Оцінка можливостей отримання енергоносіїв з органічних відходів з урахуванням техногенного навантаження на навколишнє середовище», *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, № 1, с. 1-8, 2012.
- [4] С. Н. Гармаш, «Анаеробна біоконверсія органічних відходів в біогаз», *Питання хімії та хімічної технології*, № 6, с. 32-40, 2013.
- [5] І. Г. Кириленко, та Д. М. Токарчук, «Ефективна організація використання відходів аграрних підприємств у формуванні енергетичної та екологічної безпеки», *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*, № 2, с. 66-82, 2020. <https://doi.org/10.37128/2411-4413-2020-2-9>.
- [6] Г. Г. Гелетука, «Науково-технічні засади виробництва енергії з біологічних видів палива.» дис. д-ра техн. наук., Ін-т технік. теплофізики НАН України, Київ, 2021.
- [7] О. О. Тertiшній, О. А. Піваров та В. С. Кошулько, *Механічні процеси та обладнання харчових виробництв*. Дніпро, Україна: Дніпровський ДАЕУ, 2022.
- [8] В. О. Смирнов, П. В. Сергєєв, та В. С. Білецький, *Технологія збагачення вугілля*. Донецьк, Україна: Східний видавничий дім, 2011.
- [9] Д. П. Кіндзера, В. М. Атаманюк, Р. Р. Госовський, та І. М. Мотіль, «Дослідження процесу формування паливних брикетів із рослинної сировини та визначення їх характеристик», *Науковий вісник НЛТУ України*, вип. 23 (17), с. 138-146, 2013.
- [10] В. І. Савуляк, О. В. Березюк, В. П. Пурдик, та С. П. Білошицький, «Експериментальне визначення необхідних умов і параметрів процесу та приводу пресування паливних брикетів з відходів деревини», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 5, с. 96-99, 2010.
- [11] М. В. Коломийченко, *Дорожня карта з розвитку твердого біопалива України*. Київ, Україна: ПРООН «Розвиток та комерціалізація біоенергетичних технологій у муніципальному секторі в Україні», 2016.
- [12] Г. Гелетука, Ред., *Виробництво енергії з біомаси в Україні: технології, розвиток, перспективи*. Київ, Україна: Академперіодика, 2022.
- [13] В. А. Маляренко, О. Л. Шубенко, С. Ю. Андрєєв, М. Ю. Бабак, та О. В. Сенецький, *Когенераційні технології в малій енергетиці*. Харків, Україна: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018.
- [14] М. М. Косіюк, та А. М. Косіюк, «Автономна високоефективна когенераційна установка», *Вісник Хмельницького національного університету*, № 2 (283), с. 84-87, 2020. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2020-283-2-84-87>.

- [15] N. M. Holden, M. L. Wolfe, J. A. Ogejo, and E. J. Cummins, *Introduction to biosystems engineering*, Blacksburg (VA): ASABE and Virginia Tech. <https://doi.org/10.21061/IntroBiosystemsEngineering>.
- [16] В. Г. Мироненко, В. О. Дубровін, В. М. Полішук, та С. В. Драгнєв, *Технології виробництва біодизеля*. Київ, Україна: ХОЛТЕХ, 2009.
- [17] З. Ю. Палюх, «Основи технології алкохолізу тригліцеридів у присутності іонів двовалентних металів.» дис. канд. техн. наук., Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2017.
- [18] К. І. Патріляк, Л. К. Патріляк, та М. В. Охріменко, «Біодизельне паливо на основі етанолу та соняшникової олії,» *Каталіз та нафтохімія*, № 21, с. 100-103, 2012.
- [19] G. N. Kononov, A. N. Zarubina, A. N. Verevkin, V. D. Zaytsev, and D. B. Chekunin, "Wood as a chemical raw material. History and modernity. III. Wood pyrolysis as processing method," *Forestry Bulletin*, no. 25, pp. 126-141, 2021. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2021-3-126-141>.
- [20] В. С. Ведь, та А. М. Миронов, «Сучасні проблеми вуглевипалювання і піролізу деревини,» *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*, зб. наук. пр. темат. вип. *Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів*, № 49 (1091), с. 88-95, 2014.
- [21] N. Lakina, V. Doluda, G. Rabinovich, E. Doluda and M. Lakina, "Methods of biomass processing with the aim of obtaining bioethanol," *Bulletin of Science and Practice*, vol. 4, no. 12, pp. 96-100, 2018. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2254760>.
- [22] P. E. Matkovsiy, R. S. Yarullin, G. P. Startseva, and I. V. Sedova, "Bioethanol: technologies of production from renewable vegetable raw materials and areas of application," *International scientific journal for alternative energy and ecology*, no. 6 (86), pp. 95-105, 2010.
- [23] M. Ballesteros, J. M. Oliva, M. J. Negro, P. Manzanares, and I. Ballesteros, "Ethanol from lignocellulosic materials by a simultaneous saccharification and fermentation process (SFS) with *Kluyveromyces marxianus* CECT 10875," *Process Biochemistry*, vol. 39, iss. 12, p. 1843-1848, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.09.011>.
- [24] D. Kumar, and G. S. Murthy, "Chapter 7 – Enzymatic Hydrolysis of Cellulose for Ethanol Production: Fundamentals, Optimal Enzyme Ratio, and Hydrolysis Modeling," in *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering, Microbial Cellulase System Properties and Applications*, Elsevier, pp. 65-78, 2016. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63507-5.00007-1>.
- [25] ДСТУ 4221:2003. *Спирт етиловий ректифікаційний. Технічні умови*.
- [26] Н. О. Бублієнко, та О. І. Семенова, «Біологічна утилізація бурякового жому з використанням метанової ферментації,» *Food Industry*, iss. 30, p. 51-57, 2021. <https://doi.org/10.24263/2225-2916-2021-30-7>.
- [27] R. L. Grando, A. M. de Souza Antune, F. V. Da Fonseca, A. Sánchez, R. Barrena, and X. Font, "Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, p. 44-53, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.079>.
- [28] А. Г. Грицай, та З. В. Маслюкова, «Оцінка енергетичного потенціалу біогазу України,» *Наукові горизонти*, № 10 (83), с. 63-58, 2019. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2019-83-10-58-63>.
- [29] Ю. В. Охота, та К. В. Козак «Основні тенденції ефективного використання біогазу в Україні,» *Ефективна економіка*, № 4, 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=6264>.
- [30] P. Fuksa, J. Hakl, P. Míchal, Z. Hrevušová, J. Šantrůček, and P. Tlustoš, "Effect of silage maize plant density and plant parts on biogas production and composition," *Biomass and Bioenergy*, vol. 142, pp. 105770, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105770>
- [31] L. Artsupho, P. Jutakradsada, A. Laungphairojana, J. F. Rodriguez, and Kh. Kamwilaisak, "Effect of Temperature on Increasing Biogas Production from Sugar Industrial Wastewater Treatment by UASB Process in Pilot Scale," *Energy Procedia*, vol. 100, pp. 30-33, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.143>.
- [32] E. J. Hengeveld, J. Bekkering, W. J. T. van Gemert, and A. A. Broekhuis, "Biogas infrastructures from farm to regional scale, prospects of biogas transport grids," *Biomass and Bioenergy*, vol. 86, pp. 43-52, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.01.005>.
- [33] Г. С. Ратушняк, В. В. Джеджула, та К. В. Анохіна, *Енергозберігаючі відновлювальні джерела теплопостачання*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2010.
- [34] О. Ю. Майстренко, Ю. В. Куріс, Ю. С. Калінцева, та В. М. Власенко, «Методи та технології анаеробної переробки тваринницької біомаси,» *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*, № 2, с. 29-36, 2010.
- [35] Г. В. Панцирева, «Технологічні аспекти виробництва біогазу з органічної сировини,» *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства*, вип. 199 «Механізація сільськогосподарського виробництва», с. 276-290, 2019.
- [36] З. А. Бурова, Л. Й. Воробйов, та Р. В. Сергієнко, «Калориметричний аналіз якості паливних брикетів та пелет,» *Науковий погляд у майбутнє*, т. 2, вип. 4, с. 78-81, 2016.
- [37] І. К. Малік, *Розробка технології отримання BIO-CHAR*: моногр. Харків, Україна: НТУ «ХПІ», 2024.
- [38] А. С. Макаров, та ін., «Властивості композиційного палива на основі пірокарбону — продукту термолізу шин,» *Voprosy himii i himičeskoj tehnologii*, № 2, с. 61-69, 2024. <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2024-153-2-61-69>.
- [39] А. П. Ранський, Б. В. Коріненко, О. А. Гордієнко, та В. О. Євдокименко, «Альтернативна енергетика: отримання паливних брикетів із пірокарбону термодеструкції полімерних відходів,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 1, с. 13-20, 2023. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-166-1-13-20>.
- [40] Garbage Review (MusOboz, Smith's Look), no. 266. <https://waste.ua/index.php?page=ad&id=50162>.
- [41] В. Г. Крамар, Н. М. Жовмир, В. І. Зубенко, С. М. Чаплигін, «Паливні властивості поживних залишків кукурудзи,» *Промислова теплотехніка*, т. 31, № 5, с. 76-80, 2009.
- [42] Є. В. Сялярєнко, «Створення піролізної технології та установки для термохімічної консервації рослинної біомаси.» дис. канд. техн. наук., Київ, Україна: НАН України, Ін-т технічної теплофізики, 2017.
- [43] В. В. Клименко, В. І. Кравченко, В. М. Боков, та В. Г. Гуцул, *Технологічні основи виготовлення біопалива з рослинних відходів та їх композитів*, моногр. Кропивницький, Україна: ПП «Ексклюзив-Систем», 2017.
- [44] Б. А. Барабаш, «Потенціал недревної рослинної сировини для виробництва паперу і картону. Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість,» *Міжвідомчий науково-технічний збірник*, № 37 (1), 2009.

- [45] А. А. Ніколайчук, М. Т. Картель, Л. А. Купчик, та В. О. Денисович «Синтез та властивості біосорбентів на основі целюлози та лігніну з рослинної сировини», *Наукові записки НАУКМА. Хімічні науки та технології*, т. 42, с. 28-31, 2005.
- [46] S. S. da Silva, and A. K. Chandel, Ed., *D-Xylitol: Fermentative Pro-duction, Application and Commercialization*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31887-0>.
- [47] Г. Г. Гелетука, Т. А. Желєзна, С. В. Драгнес, та А. І. Баштовий, «Аналіз можливостей виробництва і споживання паливних брикетів з біомаси сільськогосподарського походження в Україні. Частина 1», *Промислова теплотехніка*, т. 40, № 4, с. 62-68, 2018.
- [48] Тетяна Желєзна, «Брикетування і використання агробіомаси в Україні. Перспективи для аграріїв», на *Міжнар. форумі біоенергетичних технологій та альтернативної енергетики в агробізнесі AgroEnergyDay 2018*, Київ, 2018. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2018/10/7-Zheliezna-UA-Bio-AgroEnergyDAY2018-30102018.pdf>.
- [49] О. С. Полянський, В. І. Д'яконов, та О. В. Д'яконов, «Комплексна оцінка і аналіз енергетичних показників існуючих технологій переробки рослинних відходів у паливні брикети», *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*, вип. 190, с. 192-202, 2018.
- [50] К. О. Самойчук, В. А. Самохвал, та О. О. Червоткіна, «Дослідження роботи багатосекційного пристрою формування паливних брикетів на гвинтових прес-екструдерах», *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*, вип. 24, № 2, с. 18-26, 2024. <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-2-2>.
- [51] А. П. Ранський, О. М. Сандул, Р. В. Коріненко, та О. А. Гордієнко, «Альтернативна енергетика. Повідомлення IV. селективне очищення гідравлічної оливи AW-46», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 19-26, 2024. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-177-6-19-26>.

Рекомендована кафедрою екології, хімії та технологій захисту довкілля ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 17.10.2025

Ранський Анатолій Петрович — д-р. хім. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: ranskiy@gmail.com ;

Гордієнко Ольга Анатоліївна — канд. тех. наук, доцент, доцент кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: olgordienko@vntu.edu.ua .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

A. P. Ranskiy¹
O. A. Gordienko¹

Alternative Energy. Notice V*. Complex Use of Alternative Energy Sources in the Development of Fuel Briquettes

¹Vinnitsia National Technical University

Ukraine can partially compensate for the current deficit of fossil energy sources (oil, natural gas) effectively using large volumes of biomass (23 million tons of equivalent fuel per year) as an alternative source in the production of solid, liquid and gaseous energy resources. The main physical, chemical, thermal, thermo- and biochemical methods of biomass processing and the prospective use of the resulting alternative energy sources are considered. It is noted that today the developed countries of the world are increasingly providing their own fuel and energy sector with the introduction of "green" technologies, accumulating renewable energy from the sun (PV modules), wind (wind power) and hydrogen (hydrogen power, fuel cells). Attention is focused on the prospects of producing fuel briquettes from available biomass and their possible use for heating private housing and other premises in villages, towns and cities. The composition and main technical characteristics of fuel briquettes used today in Ukraine, the calorific values of which vary within quite wide limits, have been analyzed. Thus, briquettes based on brown coal, charcoal, and pyrocarbon have a calorific value of 5500...7000 kcal/kg, waste from the wood-working and pulp and paper industries 3820...4500 kcal/kg, and agricultural waste 3860...4800 kcal/kg. The prospects and advantages of using fuel briquettes based on their manufacturing technology, including the preparation of raw materials and their pressing/briquetting, have been considered.

It was established that the production of fuel briquettes corresponds to the basic principles of the circular economy: waste from a number of industries (woodworking and pulp and paper industries) and technologies (processing of plastic waste by pyrolysis), agricultural waste become the initial raw materials for obtaining the sought-after final product — fuel briquettes with their subsequent effective use. The technology of obtaining fuel briquettes by pressing a charge consisting of pyrocarbon, wood sawdust and corrugated cardboard, without heating it and additional introduction of adhesive additives, is considered.

Keywords: waste processing, alternative energy sources, fuel briquettes, pyrocarbon, agricultural biomass, environmental protection technologies.

Ranskiy Anatoliy P. — Dr. Sc. (Chem.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: ranskiy@gmail.com ;

Gordienko Olga A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: olgordienko@vntu.edu.ua