

УДК 620.92

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИРОБНИЦТВА БІОЧАРУ ТА ТВЕРДОГО ПАЛИВА НА ОСНОВІ БІОВУГІЛЛЯ

Крамар В.Г., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.12>

Зроблено техніко-економічний аналіз виробництва біоچارу та біовугілля з гранульованого та негранульованого лушпиння соняшника на технологічній лінії продуктивністю 5 т/год по вхідній сировині. Наведено основні характеристики обладнання різних виробників, вимоги до якості біоچارу, зроблено короткий огляд ринку біоچارу та супутніх продуктів його виробництва. Визначено основні ризики впровадження проєктів виробництва біоچارу в Україні та можливості їм запобігти.

An analysis was conducted on the technical and economic aspects of producing biochar and charcoal from both granulated and non-granulated sunflower husks on a technological line with an input productivity of 5 t/h. The information provided on the main characteristics of equipment from various manufacturers, biochar quality requirements, a brief overview of the biochar market and related products of its production. The main risks of implementing biochar production in Ukraine and the possibilities to prevent them have been outlined.

Бібл. 13, табл. 6, рис. 2.

Ключові слова: виробництво біоچارу, біовугілля, піроліз, газифікація.

Актуальність роботи полягає у пошуку нових можливостей виробництва продуктів з більшою доданою вартістю шляхом переробки відходів та залишків біомаси в Україні.

Метою даної роботи є техніко-економічний аналіз ефективності виробництва біоچارу на основі найбільш доступних технічних рішень, пропонуєваних постачальниками відповідних технологій та обладнання.

Методи дослідження включають аналіз наукових та інших публікацій, збір технічних та цінових пропозицій виробників обладнання, проведення техніко-економічних розрахунків.

Результати дослідження

Під біовугіллям будемо розуміти коксозольний залишок, що утворюється в результаті термохімічної конверсії (перетворення) біомаси. В англомовній науковій літературі розрізняють такі види біовугілля:

- біовугілля ("charcoal")- чорна аморфна форма вуглецю, отримана шляхом нагрівання деревини або інших органічних речовин за відсутності повітря, що використовується як паливо, при виплавці металевих руд, у вибухових речовинах і як сорбент.

- біочар ("biochar")- пористий вуглевмісний матеріал, який виробляється шляхом піролізу біомаси та використовується як біодобриво або поліпшувач ґрунту, для довгострокового поглинання вуглецю або заміщення

викопного вуглецю у промисловому виробництві. Він не передбачений для виробництва енергії [2].

- торефікована біомаса ("torrefied biomass") – біомаса, що оброблена в процесі торефікації.

Основними технологіями, що призводять до утворення біовугілля, є торефікація, піроліз та газифікація (Рис. 1).

Результатом всіх цих процесів є збільшення вмісту вуглецю в продукті. Під час термохімічної обробки біомаси, що супроводжується її розкладанням, торефікація зазвичай є першою стадією, за якою йде піроліз і, нарешті, газифікація. По мірі виходу летких речовин, хімічний склад біомаси змінюється – зменшується вміст водню і кисню, в результаті падають молярні співвідношення Н/С та О/С, що є показником інтенсивності карбонізації [3].

Біочар фактично являє собою вуглецевий залишок, що утворюється в усіх процесах, перелічених вище. Різниця, крім різної технологічної направленості щодо отримання цільового продукту, полягає в різній кількості отриманого вуглецевого залишку – Табл. 1. Повільний піроліз вважається найкращою технологією для виробництва біоچارу, що дозволяє отримати більший його вихід [4].

Загалом біочар має високу сорбційну здатність, велику питому поверхню, мікропористість та іонообмінну здатність, тому його можна застосовувати як каталізатор,

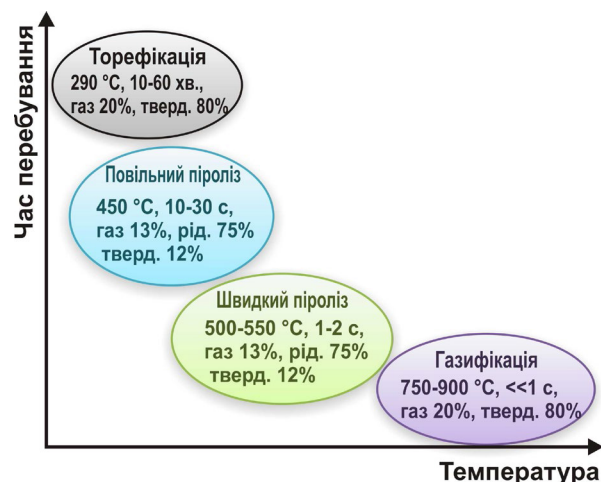


Рис. 1. Різні режими термохімічної обробки (карбонізації) біомаси в залежності від температури та часу перебування (на основі [1])

Таблиця 1. Залежність ефективності відгонки аміаку від температури, об'єму доданого у воду повітря та рН ДСВ

Техніка	Температура (°C)	Час перебування (с)	Швидкість нагріву (°C/с)	Біочар (%)	Біо-олія (%)	Синтез-газ (%)
Повільний піроліз	300-550	від годин до днів	1-10	35	30	35
Проміжний піроліз	450-550	10-20 с	10-1000	25	50	25
Швидкий піроліз	450-600	<2 с	10-1000	12	75	13
Газифікація	> 800	10-20 с	1-0,8	10	5	85
Торефікація	450-550	< 2 год	-	75	20	5
Гідротермічна карбонізація	< 200	1-16 год	<1	35	30	35

очишувач стічних вод, для компостування, зберігання енергії, секвестрації вуглецю та покращення ґрунту, а також як добавку в раціон тварин.

Встановлено, що для підвищення врожайності біочар є ефективним у поєднанні з неорганічними добривами. Він сприяє збільшенню мікробіоти, каталізує ґрунтові процеси, поліпшує структуру поверхневого шару ґрунту та його водопроникність. Завдяки застосуванню біочару можна зменшувати загальну норму внесення добрив на 30–50 %, оскільки він сприяє переведенню поживних речовин у доступну для рослин форму, накопичує їх та вивільнює для рослин тоді, коли вони цього найбільше потребують [5].

Проте, біочар в Україні поки вивчено недостатньо, ефективність його використання в наших умовах потребує подальших досліджень [5]. На ринку препаратів для внесення в ґрунт в Україні біочар (можливо, поки) не набув достатнього розповсюдження. Тому пріоритетною метою його виробництва можна вважати експорт, принаймні доти, поки не з'явиться його ринок в Україні.

З огляду на це, важливо розуміти, яким вимогам має відповідати біочар. Застосування біочару є відносно новим, і в ЄС щодо нього поки немає спеціального законодавчого регулювання. В Україні також поки немає стандарту на біочар, і він не внесений до Державного реєстру пестицидів і агрохімікатів, дозволених до використання в Україні.

Основні добровільні стандарти на біочар розроблені такими організаціями як International Biochar Initiative (IBI) та European Biochar Certificate (EBC). Деякі важливі вимоги щодо якісних характеристик показано в Табл. 2.

У світі протягом останнього десятиліття популярність біочару зростала. Основним рушієм ринку біочару є можливість його застосування як засобу захоронення вуглецю, тобто виведення його з природного кругообігу на тривалий час, що є одним із способів запобігання утворенню парникових газів. Біочар розглядається Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату (МГЕЗК) як одне з можливих кліматичних рішень для досягнення нульових

Табл. 2. Критерії якості ІВІ та ЕВС (вибірково) [3]

Параметр	Одиниці виміру	ЕВС базовий	Преміум ЕВС	ІВІ
Вуглець	вага%	>50	>50	Клас 1: >60; Клас 2: >30; Клас 3: >10
Н/С	моль/моль	<0,7	<0,7	<0,7
О/С	моль/моль	<0,4	<0,4	н/д
Порогові значення забруднюючих речовин:				
Миш'як	мг/кг	13	13	13-100
Свинець	мг/кг	150	120	121-300
Кадмій	мг/кг	1,5	1	1,4-39
Хром	мг/кг	90	80	93-1200
Кобальт	мг/кг	-	-	34-100
Мідь	мг/кг	100	100	143-6000
Молібден	мг/кг	-	-	5-75
Нікель	мг/кг	50	30	47-420
Меркурій	мг/кг	1	1	1-17
Селен	мг/кг	-	-	2-200
Цинк	мг/кг	400	400	416-7400
Поліциклічні ароматичні вуглеводні (сума 16 пріоритетних забруднювачів)	мг/кг	12	4	6-300
Поліхлоровані біфеніли	мг/кг	0,2	0,2	0,2-1
Діоксини (I-TEQ OMS)	нг/кг	20	20	17
Фурані (I-TEQ OMS)	нг/кг	20	20	17

викидів парникових газів. Таким чином, використання біочару як поліпшувача ґрунту створює можливості для агрокомпаній зменшувати свій «вуглецевий слід» [6].

Коротка характеристика основних ринків біочару [7]:

- Китай: виробництво 300-500 тис. тонн на рік, продовжує стрімко зростати;
- США: виробництво близько 50 тис. тонн на рік, продовжує зростати;
- Європа: виробництво близько 20 тис. тонн на рік, продовжує зростати;
- Австралія: виробництво близько 5 тис. тонн на рік, продовжує зростати.

В Європі з 2012 року кількість виробників біочару стрімко зростала. Лише у 2021 році було введено в експлуатацію 25 нових виробництв, завдяки чому загальна кількість заводів перевищила 100, а виробнича потужність – 35 тис. тонн, що свідчить про швидке становлення індустрії біочару. Наразі у європейському виробництві біочару домінують Німеччина, Австрія, Швейцарія та скандинавські країни (переважно Швеція),

на які припадає понад 75% ринку. Інші країни, такі як Іспанія, також розвивають цей ринок [8].

Дослідження ринку свідчить про значні ринкові можливості для біочару в Україні. Виходячи з наявної сировини, річний розмір пропозиції та попиту оцінюється відповідно у понад 8,5 та понад 40 млн тонн [6].

Світові ціни біочару як поліпшувача ґрунту коливаються в межах від 200 до 2000 євро/т, а як кормової добавки – в діапазоні від 1200 до 1750 євро/т (в біг-бегах). Однак для менших упаковок ціна може сягати до 5500 євро/т. Середня світова ціна на біочар становить 800 євро/т [7]. Попередній аналіз цін показує, що біочар має найбільшу ринкову ціну на одиницю маси, порівняно з торефікованою біомасою чи деревним вугіллям. Ціна пелет з торефікованої біомаси становить 150-250 \$/т [9]. Ціни на деревне вугілля становлять 100-600 \$/т, з максимальними цінами до 900 \$/т.

Таким чином, з перелічених видів біовугілля, біочар можна розглядати як пріоритетний продукт для впровадження його виробництва, особливо враховуючи те,

що сучасні технології та апаратурне оформлення виробництва всіх перелічених вище видів біовугілля доволі схожі.

Успіх комерційного виробництва біочару залежить від потенціалу корисного застосування супутніх продуктів. Основні можливості утилізації продуктів піролізу біомаси включають виробництво теплової та електричної енергії, виробництво дизельного пального та бензину, а також синтез метанолу, паливного етанолу та аміаку [10].

Властивості продуктів піролізу значною мірою залежать від сировини та умов проведення процесу. Біооцтова кислота (“деревний оцет”) отриманий шляхом повільного піролізу – це рідка фракція, що містить такий набір речовин, як органічні кислоти, кетони, альдегіди, спирти, бензол та його похідні, гетероциклічні сполуки, феноли та їх похідні, алкілфенілові ефіри, похідні

вуглеводів та сполуки азоту [11]. Деревний оцет виробляють і комерційно використовують у Китаї, Індонезії, Малайзії, Бразилії та Чилі. Очікується, що ринок деревного оцту у вартісному вираженні досягне близько 6 мільйонів доларів США до 2024 року при загальних річних темпах зростання 7,6% з 2016 по 2024 рік. Європейський ринок деревного оцту невеликий (за оцінками, приблизно від 1 до 1,5 млн доларів на рік). Поточна оптова ціна деревного оцту на азійському ринку становить близько 4 доларів США за галон, що відповідає ціні 900 євро/т.

Техніко-економічне обґрунтування виробництва біочару було розроблене для одного з українських заводів по виробництву рослинних олій (соняшникової та ріпакової), де соняшникове лушпиння використовують як джерело теплової енергії для виробничих потреб, а його надлишок в обсязі 40-65 тис. тонн на рік грану-

Табл. 3. Прогнозний вихід біочару та інших компонентів. Технології та обладнання

Компанія, країна	Технологія	Тип конструкції обладнання	Вихід біочару, %	Інші компоненти, %
Beston Group, Китай	Повільний піроліз, температура 200-300 °С, тривалість обробки 15-25 хвилин	Барабанного типу	28-30%	синтез-газ- 60-62%; деревний оцет- 8%; смола- 2%
Henan Mingjie, Китай	те ж	те ж	25-35%	синтез-газ-53-69%; деревний оцет + смола- 6-12%
Biomason, Німеччина	Піроліз, температура в камері до 900 °С	Піролізний котел з вбудованим шнековим піролізером	21,7%	н/д
Nettenergy, Нідерланди	Піроліз, температура в камері вище 700 °С	Піро-газифікатор з очищенням сингазу та виробництвом електроенергії	10-15%	синтез-газ- 85-90%
PYREG, Німеччина	Газифікація, діапазон температур 500-750 °С з обмеженим доступом кисню	Шнекового типу	24%	синтез-газ-76%
Baoyuan Machinery, Китай	Газифікація, діапазон температур 700-800 °С з обмеженим доступом кисню	Барабанного типу	33%-при виробництві біочару; 25% - при виробництві біовугілля	синтез-газ+деревний оцет + смола- 67-75%
Carbofex, Фінляндія	Піроліз	н/д	20-30%	синтез-газ+деревний оцет + смола- 70-80%
HaiQi, Китай	Піроліз, температура в камері 500-800 °С	Шнекового типу	20-25%	синтез-газ+деревний оцет + смола- 75-80%

люють та реалізують на ринку, але його також можна використати як сировину для виробництва біочару. Подальший аналіз базується на технічних та цінових пропозиціях виробничого обладнання, отриманих від компаній, що погодились їх надати. В Табл. 3 показано основні типи пропонованих технологій та конструкцій обладнання для виробництва біочару.

Частина компаній пропонують реактори барабанного типу, де переміщення біомаси всередині барабана відбувається при його обертанні та взаємодії з внутрішніми лопатями. Інша частина компаній пропонують варіант, де біомаса переміщується за допомогою шнека. Практично в усіх варіантах відбувається опосередкований нагрів біомаси через стінку – у варіанті як зі шнеком, так і з барабаном, що обертається, камера, де знаходиться біомаса, відокремлена стінкою від зовнішньої камери, куди подаються димові гази з камери згоряння, в якій спалюється синтез-газ. В більшості варіантів використано піроліз, при якому утворюється синтез-газ, а також «деревний оцет». Також при піролізі в певній кількості може утворюватись смола ("tar oil"), що є складною сумішшю фенолів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ) і гетероциклічних сполук. Практично всі виробники обладнання вимагають застосування сухої сировини, вологістю до 12%. Для більш вологої сировини пропонується попереднє висушування.

Соняшникове лушпиння може бути застосоване як у формі гранул, так і негранульоване. Використання гранульованого лушпиння має певні переваги: зменшення пилоутворення в процесі транспортування та обробки, хорошу заповнюваність об'єму реактора, отримання біочару також у формі гранул, хоча і менш щільних та дещо зменшеного розміру. Така форма є прийнятною для споживачів біочару та дозволяє пакувати його в тару без додаткового ущільнення (гранулювання чи брикетування). Натомість перевагою використання негранульованого лушпиння є відсутність витрат на його гранулювання, хоча отриманий біочар для зручності перевезення, все ж може потребувати ущільнення (наприклад, брикетування). Крім того, більш дрібний фракційний склад сировини може зменшувати масовий відсоток виходу біочару.

Соняшникове лушпиння не потребує подрібнення, а також є доволі сухим (вологість до 11%), тому не потребує попереднього висушування.

Аналіз літературних джерел [12] свідчить, що вихід біочару суттєво залежить від вмісту лігніну в сировині: біомаса з вищим вмістом лігніну та меншим вмістом целюлози може мати більший вихід біочару. Вміст лігніну

в лушпинні соняшнику досить низький, порівняно з деревиною – за нашою оцінкою, на рівні 22%, що створює ризик меншого виходу біочару.

Щодо енергетичного балансу, в усіх пропонованих варіантах технічних рішень процес виробництва біочару не потребує додаткового використання іншого палива, крім продуктів піролізу чи газифікації, за виключенням початку процесу, коли треба використання палива, рідкого чи газоподібного, для прогріву обладнання та запуску процесу термічного розкладу сировини. Після виходу обладнання на робочий режим, реактор починає опалюватись продуктами розкладу, а саме синтез-газом. В процесі піролізу намагаються отримати стільки синтез-газу, щоб його вистачило для опалення реактора. Решта речовин – деревний оцет та смола, виводяться з виробничого циклу та розглядаються як корисні продукти. Попереднє висушування сировини (за необхідності) проводять в окремій сушарці за допомогою димових газів. У варіантах, що передбачають газифікацію, вихід біочару суттєво менший, ніж при піролізі, а продуктів газифікації (синтез-газу) вистачає не тільки для підтримання процесу, але і для отримання додаткової теплової енергії, яку можна застосувати для опалення, сушіння чи виробництва електричної енергії.

В Табл. 4 наведено оцінку продуктивності та капітальних витрат впровадження виробництва біочару за різними варіантами.

З наведених даних видно, що максимальна виробнича потужність по переробці сировини становить 5 т/год, з продуктивністю по виробництву біочару 1,5 т/год. Найбільшу продуктивність мають варіанти піролізу, що пропонуються китайськими постачальниками.

За базовий варіант для техніко-економічної оцінки було прийнято пропозицію китайської компанії Beston Group [13], продуктивністю по сировині 5 т/год. Враховуючи рекомендації компанії HaiQi, що має досвід переробки лушпиння соняшника, було прийнято вихід біочару на рівні 24% до маси перероблюваної сировини. Тоді річна переробка лушпиння в цьому варіанті становитиме близько 28 тис. тонн на рік, а виробництво біочару, відповідно, близько 6,8 тис. тонн на рік.

Технологічну схему виробництва біочару зображено на Рис. 2.

Також для базового варіанту техніко-економічної оцінки було прийнято, що для переробки використовується лушпиння соняшника у вигляді гранул.

Обладнання компанії Beston Group розраховане на безперервну експлуатацію протягом 5 діб (24 години на добу), наступні 2 доби необхідні для проведення регла-

ментних робіт з очищення обладнання, змащування та заміни розхідних елементів. Тому коефіцієнт використання встановленої виробничої потужності лінії становить 71%. При цьому, заплановано цілодобову роботу в ті дні, коли не проводяться регламентні роботи.

Загалом, китайські виробники відзначають необхідність частих планових зупинок свого обладнання, в той час як європейські виробники говорять про можливість практично безперервної роботи їх обладнання та зупинку на обслуговування лише в той час, коли, наприклад, сам завод з виробництва рослинної олії зупиняється на обслуговування (1 місяць).

Капітальні витрати проекту виробництва біочару у вибраному варіанті, з урахуванням додаткового обладнання та будівель (бункери, транспортери, газоходи, димова труба, виробниче приміщення, автотранспортувач) становить 879 тис. євро (35,2 млн грн).

Питомі витрати електричної енергії безпосередньо обладнання компанії Beston Group становить 122 кВт (близько 153 кВт з урахуванням додаткового обладнання). Виробничий процес потребує воду для охолодження, з питомою витратою 0,125 м³/год. Також треба враховувати витрату природного газу на прогрів обладнання та вихід на робочий режим (120-140 м³/год протягом двох годин), що відбуватиметься через кожні

5 днів. Вартість технічного обслуговування свого обладнання представники компанії Beston Group оцінюють у 85 \$/добу.

Вартість сировини для виробництва біочару було враховано як середню ціну продажу гранул з лущиння соняшнику (90 євро/т без ПДВ). Розрахункова собівартість біочару та вартість доставки склала 603,4 євро/т (в тому числі середня вартість доставки до країн Західної Європи чи Скандинавії – 116,8 євро/т). Тобто, за ціни збуту, меншої за 603,4 євро/т, проект не може бути окупним. Основними статтями витрат є сировина (64,7%) та доставка продукції на експорт (19,4%), що в сумі становить 507,3 євро/т. Отже, інші виробничі витрати, крім вартості сировини, склали 96,1 євро/т.

Було розраховано варіанти фінансових показників за трьох рівнів цін на біочар, а також з урахуванням та без урахування продажу побічних продуктів (деревного опилу та смоли). Результати розрахунку показано в Табл. 5. Як видно з наведених результатів, проект може бути окупним навіть при низькій ціні біочару, якщо вдасться реалізовувати побічні продукти піролізу (деревний опил та смоли). При високій ціні на біочар, що насправді може вважатись середньою ціною, проект має дисконтований строк окупності менше одного року навіть без урахування збуту побічних продуктів.

Табл. 4. Дані щодо розглянутих варіантів виробництва біочару

Компанія, країна	Тип, марка	Продуктивність, т/год		Ціна (з доставкою та монтажем), євро	Побічні продукти, кВт		
		по сировині	по біочару		тепло	пара, кг/год	електроенергія
Beston Group, Китай	BST-50	5	1,4	551 606			
Biomason, Німеччина	C500-I	0,3	0,07	1 429 250	500		
Henan Mingjie, Китай	MJT-5000	5	1,5	569 711			
Nettenergy, Нідерланди	PyroGasifier	0,5	0,06	1 423 500			400
PYREG, Німеччина	PX1500	0,37	0,10	2 997 563	600	810	
Baoyuan Machinery, Китай		3	1,00	493 300			
Etia_VOW ASA, Норвегія	CHE5t	5	1,25	30 000 000	9000		
Carbofex, Фінляндія	IX Pyrolysis line	0,44	0,13	1 659 250			
HaiQi, Китай	CNBC1000	3,5	0,79	н/д			2800

Найбільша чутливість фінансових показників такого проєкту, в порядку зменшення впливу, відзначається до зміни ціни продажу біочару, виходу біочару по відношенню до маси сировини, вартості сировини та до зміни фонду робочого часу. Тож, при прийнятті рішення щодо впровадження проєкту, необхідний пошук потенційних споживачів та узгодження з ними ціни продажу біочару за відповідними контрактами.

Розглядався також варіант виробництва на тому ж технологічному обладнанні біочару з негранульованого лушпиння, вартість якого, за даними підприємства, становить 220,8 грн/т без ПДВ. Такий варіант технічно можливий. Але, при цьому немає гарантії, що обладнання буде працювати з тою ж продуктивністю переробки, оскільки можливість завантаження визначається

в об'ємних одиницях (м³/год), тому при використанні сировини з меншою насипною вагою слід уточнювати продуктивність. Також в цьому варіанті слід передбачити необхідність ущільнення кінцевого продукту для зручності його транспортування. Тому було передбачено встановлення лінії брикетування та враховано відповідні виробничі витрати. Якщо навіть прийняти, що продуктивність по переробці сировини знизиться з 5 до 2 т/год, фінансові результати кращі, ніж при використанні гранульованого лушпиння, причому окупність можлива навіть при мінімальній ціні біочару (Табл. 6).

При такому варіанті сировини може бути окупним також виробництво біовугілля ("charcoal"). Склад та принцип дії обладнання для його виробництва при-

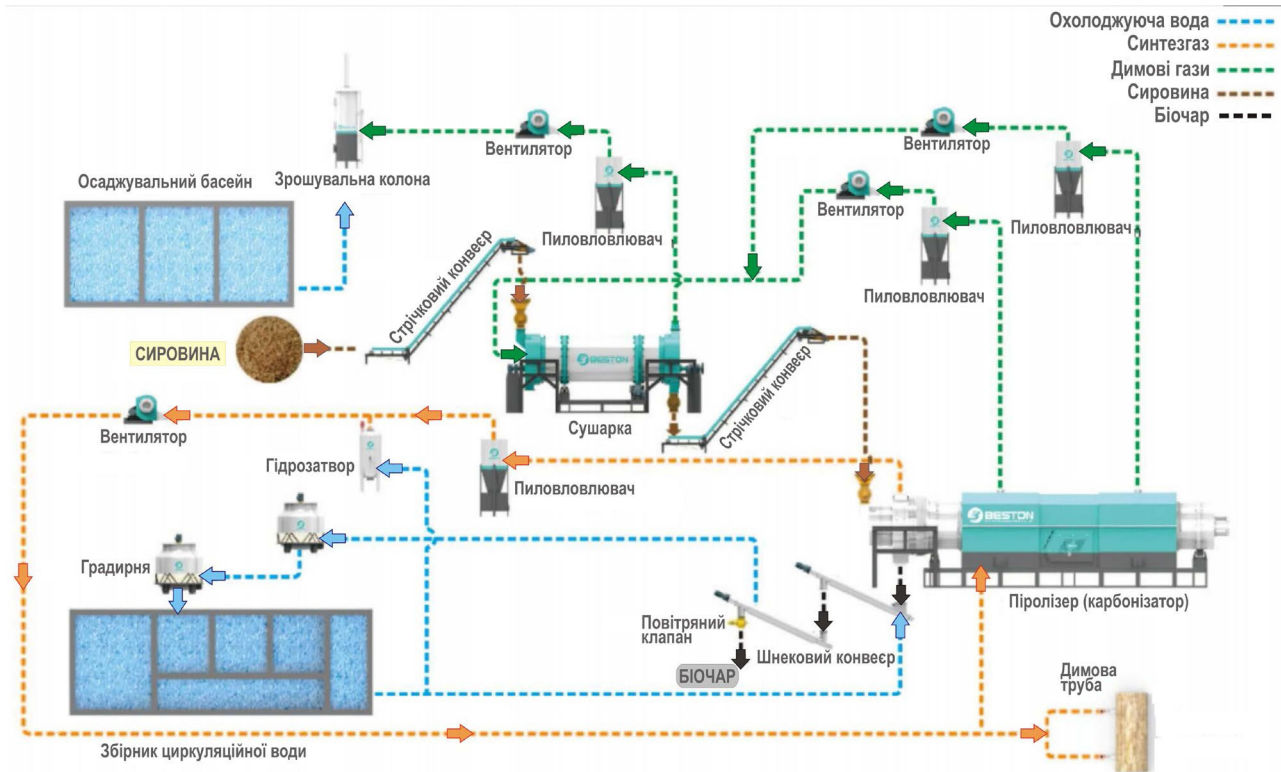


Рис. 2. Технологічна схема виробництва біочару компанії Beston Group

Табл. 5. Фінансові показники проєкту виробництва біочару з гранульованого лушпиння.

Фінансові показники	Рівень ціни на біочар, євро/т					
	450		650		800	
	1*	2**	1*	2**	1*	2**
Чиста приведена вартість (NPV), тис. євро	-8 058	3 922	671,4	11 256,5	6 172	16 758
Внутрішня норма рентабельності (IRR), %	-	76,9%	22,9%	197,2%	113,8%	287,6%
Простий період окупності, років	немає	1,3	4,2	0,5	0,9	0,3
Дисконтований період окупності, років	немає	1,44	5,64	0,52	0,97	0,32
Примітки: 1* - без урахування реалізації побічних продуктів; 2** - з урахуванням їх реалізації.						

Табл. 6. Показники проєкту при виробництві біочару та біовугілля з негранульованого лушпиння.

Показник	Біочар			Біовугілля	
Капітальні витрати, тис. євро	864,7			864,7	
Витрата сировини, т/рік	11 545			11 545	
Виробництво, т/рік	2 661			1 663	
Варіант реалізації продукції:	на експорт			на експорт	продаж в Україні
Собівартість + доставка, євро/т	337,2			442,2	339,7
Прийнята ціна реалізації, євро/т	450,00	600,00	800,00	547,50	450,00
Фінансові показники:					
Чиста приведена вартість (NPV), тис. євро	1 129	3 330	6 264	465	537
Внутрішня норма доходності (IRR),%	31,2%	68,2%	117,1%	19,3%	20,7%
Простий період окупності, років	3,2	1,5	0,9	4,8	4,6
Дисконтований період окупності, років	3,90	1,66	0,94	6,85	6,29

близко такий же, як і для біочару. Але, виробництво біовугілля передбачає досягнення ступеня карбонізації, що характеризується вмістом зв'язаного вуглецю вище 75% по масі, а це вимагає інших температурних режимів та зрештою призводить до зменшення виходу продукту (за нашою оцінкою, на 30-40%) порівняно з біочаром. Такий варіант також був розрахований (Табл. 6). Ціну реалізації на експорт було прийнято 547 євро/т (600 \$/т), а для реалізації в Україні - 450 євро/т. Для варіанту реалізації в Україні суттєвою економією є відсутність транспортних витрат для експорту.

Як видно, фінансові показники при виробництві біовугілля гірші, ніж при виробництві біочару, хоча, при впровадженні проєкту для реалізації біовугілля в Україні, могли би бути прийнятними. Певним резервом покращення фінансових результатів при виробництві біовугілля могло б стати використання вторинних енергетичних ресурсів у вигляді надлишкового синтез-газу, оскільки внаслідок вищого ступеня термічного розкладу сировини його утворюватиметься більше.

Висновки та рекомендації

Проведений аналіз показав, що впровадження виробництва біочару потенційно є достатньо цікавою опцією. Ринок біочару постійно зростає, як і кількість його виробників. Ціни біочару є достатньо високими, значно вищими, ніж для опцій, що передбачають паливне використання різних видів біовугілля. Середні світові ціни на біочар становлять близько 800 євро/т, максимальні - до 1800 євро/т. Причинами цього є, зокрема, «кліматична» складова, що передбачає використання біочару як засобу секвестрації вуглецю для потенційного досягнення нульового балансу викидів парникових газів.

Обладнання більшої продуктивності (до 5 т/год), наразі пропонується в основному китайськими виробниками. Обладнання європейських виробників має практично десятикратно меншу продуктивність переробки та значно вищі питомі ціни обладнання.

Собівартість виробництва біочару та його доставка для експорту до європейських країн у варіанті застосування гранульованого лушпиння склала 603,4 євро/т, та 337,2 євро/т при застосуванні негранульованого лушпиння. Для підприємств, що мають вологішу сировину (вологість вище 10%) більш крупного фракційного складу (більше 20 мм), знадобиться її висушування та подрібнення.

Фінансові показники проєкту є достатньо привабливими для впровадження.

Слід також відзначити суттєві ризики для впровадження проєкту, що полягають у невизначеності щодо ринкового попиту та можливостей збуту біочару (конкретні споживачі та рівні цін, що вони пропонують), якісних вимог до біочару та можливості розглянутого обладнання забезпечити виробництво продукції, що задовольняє цим вимогам, недостатній інформації щодо масової частки виходу біочару з різної біомасової сировини, зокрема, з лушпиння соняшника. Крім того, ступінь надійності обладнання, можливість його тривалої безаварійної роботи, а також витрати, пов'язані з його експлуатацією, наразі оцінені лише на основі даних виробників обладнання, та не мають поки практичного підтвердження.

Підприємствам, зацікавленим у реалізації такого проєкту рекомендується до початку впровадження:

1. Ознайомитись з практичним досвідом підприємств, що використовують обладнання подібного

типу та виробляють біочар, для отримання інформації щодо вартості та трудомісткості операцій з технічного обслуговування – способи та тривалість очищення, необхідність заміни швидкозношуваних деталей.

2. Зробити хімічний аналіз сировини, визначити її теплотворну здатність та провести пробну переробку партії сировини на обладнанні, яке планується до впровадження, зафіксувавши вихід біочару (в % до маси сировини) та супутніх продуктів, включаючи обсяги та, за можливості, калорійність синтез-газу.

3. Зробити аналіз отриманого біочару, зокрема, на відповідність вимогам, встановленим добровільними схемами сертифікації - International Biochar Initiative (IBI) та European Biochar Certificate (EBC).

4. Провести пошук потенційних покупців біочару (прямі споживачі чи роздрібні продавці) для обговорення якісних вимог до біочару та можливих цін його закупівлі, укладення попередніх контрактів.

Резервом подальшого покращення фінансових показників такого проекту є утилізація надлишкової теплоти процесу (за її наявності) та налагодження збуту побічних продуктів виробництва біочару (деревного опилу та смол).

Виробництво інших типів біовугілля (наприклад, charcoal) має окупність лише при застосуванні досить дешевої сировини.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Sharifzadeh, Mahdi & Sadeqzadeh, Majid & Guo, Miao & N.Borhani, Tohid & Konda, N.V.S.N. & Cortada Garcia, Marti & Wang, Lei & Hallett, Jason & Shah, Nilay. (2019). The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions. *Progress in Energy and Combustion Science*. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2018.10.006>.
2. *European Biochar Certificate (EBC)*: https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_en_10_3.pdf.
3. Hornung, A., Stenzel, F. & Grunwald, J. *Biochar—just a black matter is not enough*. *Biomass Conv. Bioref.* (2021). <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-021-01284-5>.
4. Farah Amalina, Abdul Syukor Abd Razak, Santhana Krishnan, Haspin Sulaiman, A.W. Zularisam, Mohd Nasrullah, *Biochar production techniques utilizing biomass waste-derived materials and environmental applications. A review*, *Journal of Hazardous Materials Advances*, Volume 7, 2022, 100134, ISSN 2772-4166, <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100134>.

5. *Інноваційно-інвестиційний розвиток аграрної сфери – запорука продовольчої безпеки країни: доповіді учасників міжнародної науково-практичної конференції Міжнародного форуму, 26 травня 2022 р., м. Миколаїв / Міністерство освіти і науки України; Миколаївський національний аграрний університет. Миколаїв: МНАУ, 2022. 264 с.*

6. *Market Review and Feasibility Study of Pilot Projects for a Biochar Mill in Ukraine*. NEFCO/ https://www.nefco.int/wp-content/uploads/2023/05/fut-f-completion-report_market-review-and-feasibility-study-biochar-mill-1.pdf.

7. Garcia, Bruno & Alves, Octávio & Rijo, Bruna & Lourinho, Gonçalo & Nobre, Catarina. (2022). *Biochar: Production, Applications, and Market Prospects in Portugal. Environments*. <https://doi.org/10.3390/environments9080095>.

8. Nematian, Maryam & Keske, Catherine & Ng'ombe, John. (2021). *A techno-economic analysis of biochar production and the bioeconomy for orchard biomass. Waste Management*. 135. 467-477. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.014>.

9. Sarker, Tumpa & German, Castaneda & Borugadda, Venu & Meda, Venkatesh & Dalai, Ajay. (2023). *Techno-economic analysis of torrefied fuel pellet production from agricultural residue via integrated torrefaction and pelletization process. Heliyon*, Volume 9, Issue 6, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16359>.

10. Guida, M. Y., Rebbah, B., Anter, N., Medaghri-Alaoui, A., Rakib, E. M., & Hannioui, A. (2021). *Biofuels and biochars production from agricultural biomass wastes by thermochemical conversion technologies: Thermogravimetric analysis and pyrolysis studies. Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 17(1), 15-36. <https://doi.org/10.1556/446.2021.00020>.

11. Zhu, K.; Gu, S.; Liu, J.; Luo, T.; Khan, Z.; Zhang, K.; Hu, L. *Wood Vinegar As a Complex Growth Regulator Promotes the Growth, Yield, and Quality of Rapeseed. Agronomy* 2021, 11, 510. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030510>.

12. Liu, Yanbing & Zhu, Zongyuan & Zhang, Jiaqi & Yang, Xinglin. (2021). *Simulate The Process of Preparing Biochar By Pyrolysis of Biomass Via Aspen Plus And Evaluate Its Economic*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-680405/v1>.

13. *Beston Group Co, Ltd.* <https://bestonmachinery.com/biochar-pyrolysis-equipment/>.

ECONOMIC EFFICIENCY OF THE PRODUCTION OF BIOCHAR AND SOLID FUEL BASED ON BIOCAL

Kramar V.G.

Ph.D (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Maria Kapnist st., Kyiv, 03057, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2024.12>

Useful disposal of industrial waste and biomass remains is increasingly relevant for Ukrainian enterprises. The purpose of this article is to find additional opportunities for the production of products with greater added value by processing waste and biomass residues to biochar. World prices for biochar are quite high, much higher than for the use of biocoals as fuel, and are around 800 EUR/t, maximum up to 1,800 EUR/t.

The main technical characteristics and price offers of equipment for the production of biochar from nine manufacturers from China, Germany, Finland, Norway and the Netherlands were analyzed. The results of feasibility study of the biochar production from sunflower husks on a technological line with an input productivity of 5 t/h for one of the Ukrainian vegetable oils production plants are presented. As the main equipment, a drum-type pyrolyzer heated by synthesis gas, formed during the thermochemical decomposition of biomass, was considered. Byproducts of production are also bioacetic acid and tar oil.

The financial indicators in the case of biochar export are attractive enough for implementation. The estimated simple payback period when using granulated husk was about 4 years at a price of biochar of 650 EUR/t and less than one year at a price of 800 EUR/t. When using non-granulated husk, the simple payback period was about 3 years, even at the price of biochar of 450 EUR/t.

Possible risks for implementation are the uncertainty regarding market demand and sales opportunities for biochar, quality requirements and the ability of the considered equipment to provide them, insufficient information regarding biochar yield from various biomass, as well as the lack of experience. Enterprises interested in the implementation of such a project are recommended to conduct trial processing of a batch of their raw materials on similar equipment in advance, to determine the share of biochar yield and its quality characteristics, to search for potential buyers to discuss quality requirements and possible prices.

References 13, table 6, figure 2.

Key words: production of biochar, biocoal, pyrolysis, gasification.

1. Sharifzadeh, Mahdi & Sadeqzadeh, Majid & Guo, Miao & N.Borhani, Tohid & Konda, N.V.S.N. & Cortada Garcia, Marti & Wang, Lei & Hallett, Jason & Shah, Nilay. (2019). The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions. Progress in Energy and Combustion Science. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.006>.
2. European Biochar Certificate (EBC): https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_en_10_3.pdf.
3. Hornung, A., Stenzel, F. & Grunwald, J. Biochar—just a black matter is not enough. Biomass Conv. Bioref. (2021). <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-021-01284-5>.
4. Farah Amalina, Abdul Syukor Abd Razak, Santhana Krishnan, Haspin Sulaiman, A.W. Zularisam, Mohd Nasrullah, Biochar production techniques utilizing biomass waste-derived materials and environmental applications. A review, Journal of Hazardous Materials Advances, Volume 7, 2022, 100134, ISSN 2772-4166, <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100134>.
5. Innovatsiino-investytsiyni rozvytok ahrarnoi sfery – zaporuka prodovolchoi bezpeky krainy: dopovidi uchasnykiv mizhnarodnoi naukovoopraktychnoi konferentsii Mizhnarodnoho forumu, 26 travnia 2022 r.,m. Mykolaiv [Innovative and investment development of the agrarian sphere - the guarantee of the country's food security: reports of the participants of the international scientific and practical conference of the International Forum, May 26, 2022, Mykolaiv] / Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy; Mykolaivskiy natsionalnyi ahrarnyi universytet. Mykolaiv: MNAU, 2022. 264 s. (in Ukr.).
6. Market Review and Feasibility Study of Pilot Projects for a Biochar Mill in Ukraine. NEFCO/ https://www.nefco.int/wp-content/uploads/2023/05/futf-completion-report_market-review-and-feasibility-study-biochar-mill-1.pdf.
7. Garcia, Bruno & Alves, Octávio & Rijo, Bruna & Lourinho, Gonçalo & Nobre, Catarina. (2022). Biochar: Production, Applications, and Market Prospects in Portugal. Environments. <https://doi.org/10.3390/environments9080095>.
8. Nematian, Maryam & Keske, Catherine & Ng'ombe, John. (2021). A techno-economic analysis of biochar production and the bioeconomy for orchard biomass. Waste Management. 135. 467-477. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.014>.
9. Sarker, Tumpa & German, Castaneda & Borugadda, Venu & Meda, Venkatesh & Dalai, Ajay. (2023). Techno-economic analysis of torrefied fuel pellet production from agricultural residue via integrated torrefaction and pelletization process. Heliyon, Volume 9, Issue 6, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16359>.

10. Guida, M. Y., Rebbah, B., Anter, N., Medaghri-Alaoui, A., Rakib, E. M., & Hannioui, A. (2021). Biofuels and biochars production from agricultural biomass wastes by thermochemical conversion technologies: Thermogravimetric analysis and pyrolysis studies. *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 17(1), 15-36. <https://doi.org/10.1556/446.2021.00020>.
11. Zhu, K.; Gu, S.; Liu, J.; Luo, T.; Khan, Z.; Zhang, K.; Hu, L. Wood Vinegar As a Complex Growth Regulator Promotes the Growth, Yield, and Quality of Rapeseed. *Agronomy* 2021, 11, 510. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030510>.
12. Liu, Yanbing & Zhu, Zongyuan & Zhang, Jiaqi & Yang, Xinglin. (2021). Simulate The Process of Preparing Biochar By Pyrolysis of Biomass Via Aspen Plus And Evaluate Its Economic. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-680405/v1>.
13. Beston Group Co, Ltd. <https://bestonmachinery.com/biochar-pyrolysis-equipment/>.

Отримано 16.01.2024

Received 16.01.2024

Прийнято до друку 11.04.2024

Accepted for publication 11.04.2024