

БІОВУГІЛЛЯ З АГРОВІДХОДІВ: ТЕХНОЛОГІЇ СТАЛОГО РОЗВИТКУ**О. Мазурак¹, к. т. н.**

ORCID ID: 0000-0001-7846-2799

І. Мазурак¹, к. с.-г. н.

ORCID ID: 0009-0006-2838-5282

А. Разанова^{1,2}, доктор філософії з екології

ORCID ID: 0000-0002-3546-3692

Ю. Ковалів¹

ORCID ID: 0009-0001-9156-1879

¹Львівський національний університет природокористування²Вінницький національний аграрний університет<https://doi.org/10.31734/agronomy2025.29.037>**Мазурак О., Мазурак І., Разанова А., Ковалів Ю. Біовугілля з агровідходів: технології сталого розвитку**

Зауважено, що відходи аграрного виробництва становлять суттєву частку загальносвітових відходів, спричиняючи забруднення екосистем та створюючи небезпеку для здоров'я у разі їх нераціонального оброблення.

Надзвичайно важливо розробити та впроваджувати оригінальні ефективні підходи, спрямовані на дієве пом'якшення негативного впливу сільськогосподарських побічних продуктів, що вимагає поглибленого аналізу сутності аграрних біовідходів. Виявлено критичну роль таких факторів, як різноманітність джерел відходів, варіативність їхнього хімічного складу та фізико-хімічних властивостей, потенціал використання в різних сферах та ефективність щодо специфічних забруднювачів, а також практичні аспекти реалізації технологій переробки.

Досліджено сучасне ефективне поводження з органічними відходами аграрної галузі, що характерне різноманітністю технологій та сировини, принципів підбору складових для біовугілля та стійкістю. Проаналізовано вплив піролізованих залишків (із відходів деяких типів біомаси рослинного походження в Україні) сільськогосподарської діяльності у вигляді біовугілля на стабілізацію довкілля.

Деталізовано механізми перетворення біомаси за технологій термохімічного перетворення, що є ефективними в процесах розкладання довгих ланцюгових ділянок речовин на менші молекули. При цьому відбуваються як процеси відновлення енергії, продукування нових цінних біологічних матеріалів із відходів біомаси, так і емісія забруднювальних шкідливих речовин. Встановлено, що концентрація забруднювачів унаслідок термохімічних реакцій є функцією технологічних параметрів процесу газифікування та характеристик вихідної сировини.

Проаналізовано вплив біовугілля на стан екосистем, зокрема ґрунтів. Більшість досліджень демонструють позитивні тенденції застосування органічно поєднаних біочарів для ґрунтових та інших систем (як повноцінних добрив, добавок у процесах компостування, селективних біосорбентів та різнофункціональних композитів).

Наголошено на синергетичному характері проблем використання та одержання біовуглецевих матеріалів, що вимагає додаткових випробувань і розробки відповідних технологій та інтегрованих підходів до їхнього вирішення.

Ключові слова: відходи, біовугілля, піроліз, біомаса, ґрунт, модифікування, сорбенти.

Mazurak O., Mazurak I., Razanova A., Kovaliv Yu. Biochar from agricultural waste: sustainable development technologies

Agricultural waste represents a significant portion of global waste, leading to ecosystem pollution and health risks if not processed properly.

It is crucial to develop and implement effective strategies to mitigate the negative impact of agricultural by-products, which necessitates a thorough analysis of the nature of agricultural biowaste. Key factors influencing this process include the diversity of waste sources, the variability of their chemical composition and physicochemical properties, their potential applications, effectiveness against specific pollutants, and the practical aspects of recycling technologies.

This review focuses on the analysis of modern and effective management practices for organic waste in the agricultural sector. It highlights a variety of technologies, raw materials, and principles for selecting components for biochar while emphasizing sustainability. A comprehensive analysis was conducted on the impact of pyrolyzed residues, derived from certain types of plant-based biomass waste in Ukraine, on environmental stabilization when used as biochar.

The study details the mechanisms of biomass conversion through thermochemical conversion technologies, which effectively break down long-chain substances into smaller molecules. During this process, energy recovery occurs alongside the production of valuable biological materials from biomass waste, although harmful pollutants may also be emitted. It is established that the concentration of pollutants as a result of thermochemical reactions is a function of the technological parameters of the gasification process and the characteristics of the feedstock.

The impact of biochar on ecosystems, particularly soils, is explored. Most studies indicate positive trends regarding the use of organically combined biochars as complete fertilizers, compost additives, and multifunctional biosorbents.

The review emphasizes the interconnected challenges of producing and utilizing biochar materials, which underscores the need for developing appropriate technologies and integrated approaches to address these issues effectively.

Keywords: waste, biochar, pyrolysis, biomass, soil, modification, sorbents.

Постановка проблеми. Зростання обсягів аграрного виробництва та споживчого попиту на сільськогосподарську продукцію призвели до виникнення низки екологічних проблем, пов'язаних із агробіовідходами. Відходи аграрного виробництва становлять значну частку загального обсягу відходів планети, потребуючи відповідних невідкладних технологій рециклінгу для одержання продуктів із заданими фізико-хімічними властивостями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для України, як держави з агропромисловим сектором економіки, правильне управління відходами на засадах циркулярної економіки, зокрема розробка та впровадження методів декарбонізації для оброблення та переробки сільськогосподарських відходів сучасними високотехнологічними методами [2, с. 8], – надзвичайно актуальне завдання.

Тривалий час найбільш перспективними вважалися традиційні методи утилізування сільськогосподарських відходів, зокрема такі як рециклінг, компостування органічних відходів, виробництво кормів для тварин та отримання біоенергії. За останні роки акцент досліджень – на одержанні біовугілля (так званого чорного алмазу) технологіями піролізу (повільним, швидким, швидким з газифікацією) із подальшим хімічним модифікуванням [9, с. 592; 31, с. 369].

Багато публікацій науковців присвячені використанню модифікованих продуктів піролізу біовідходів, зокрема твердого біовугілля, як сорбентів (ремедіантів) важких металів, радіонуклідів, органічних забруднювачів різної природи, а також регуляторів росту рослин, що покращують показники ґрунтових [5, с. 995; 12, с. 114528; 20, с. 142102] та водних екосистем [28, с. 146; 37, с. 2158; 43, с. 104144]. Згідно з дослідженнями [8, с. 421; 14, с. 124, 373], піролізовані вуглецеві сорбенти з відходів аграрного виробництва та побічних продуктів володіють високими показниками пористості та здатністю до очищення забруднених екосистем від органічних та неорганічних токсикантів.

Нині громадськість недостатньо обізнана з перевагами біовугілля та не впевнена щодо кількісної оцінки стабільності вуглецю, що оцінюється за допомогою польових і лабораторних інкубацій,

моделювання та/або методів інструментального аналізу [23, с. 213].

Сучасні аспекти та механізми рециклінгу відходів рослинного походження [32, с. 1773], які краще репрезентують промислове приготування біовугілля, і критичне порівняння різних методів оцінки стабільності зміцнюватимуть довіру до оцінювання стабільності карбону в біовугіллі [30, с. 139990].

Постановка завдання. Наше завдання – зацентрувавши увагу на відходах аграрного сектору, охарактеризувати можливості їхнього використання та апробовані методи піролізу, модифікування для утворення функціонального біовугілля з його подальшим використанням у різних галузях, особливо для покращання стану ґрунтів та сорбування токсинів.

Виклад основного матеріалу.

Відходи біомаси та їхнє використання.

Біомаса має потенціал для використання як паливо, включно з деревиною, швидкоростучими деревними культурами, сільськогосподарськими та тваринницькими відходами, а також спеціально вирощеними трав'янистими культурами.

Основною масою органічних відходів сільськогосподарського (аграрного) виробництва України є відходи соняшника, кукурудзи, солома злакових, бобових культур та ріпаку, залишки овочів та фруктів, обрізки деревини (кора, тирса) тощо.

Як правило, біовідходи аграрного виробництва мають такі переваги: доступність, низька вартість, короткий цикл відновлення, хімічна стабільність, низькі вимоги до оброблення та екологічність, зокрема вуглецева нейтральність [18, с. 1753; 23, с. 211].

Чимало досліджень минулих років присвячено технологіям високотемпературної переробки до активованого вугілля відходів аграрного виробництва, що містять високомолекулярні полімери полісахаридів целюлози, геміцелюлози та лігніну [34, с. 249]. Ці основні компоненти володіють полярними функціональними групами ефірів, альдегідів, кетонів, спиртів (карбоксильні, фенольні, гідроксильні групи (рис. 1)), котрі після піролізу, модифікування здатні формувати підвищену адсорбційну здатність завдяки пористості

новоутворених матеріалів із великою питомою площею, будовою поверхні та властивостями [25, с. 143–139].

Як відомо, найважливішими екстрактивними компонентами біомаси є моно- та полімерні фе-

ноли, як-от флавоноїди, таніни та фенольні кислоти, котрі після високотемпературної обробки та активування хімічними реагентами здатні до іонообмінних реакцій (наприклад, етерифікації) на поверхні біосорбента [37, с. 21–60].

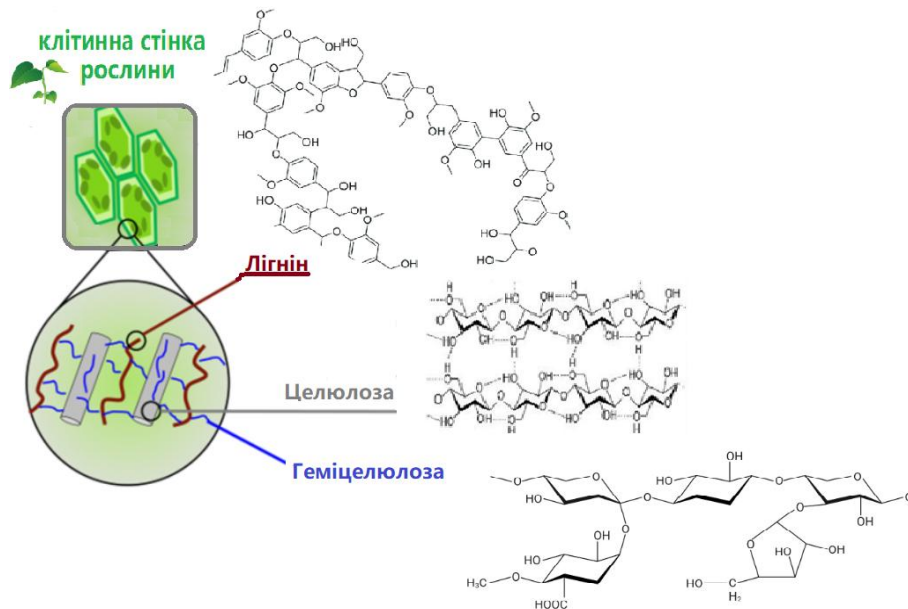


Рис. 1. Структурні формули целюлози, лігніну та геміцелюлози

Стабільність вуглецю та накопичування карбоновмісної компоненти ґрунтів [38, с. 107–532] за зниження емісії парникових газів, навіть порівняно з варіантами традиційного поводження (компостування чи рециклінгу), відносять до переваг використання біочару [29, с. 167–169].

Методи досліджень біосорбентів. Для вивчення активних центрів генерованих біосорбційних структур (біосорбентів), що адсорбують забруднювальні речовини, а також для визначення концентрації забруднювальних речовин, використовують низку складних аналітичних методик та фізико-хімічного інструментарію: атомно-абсорбційну спектроскопію; індуктивно зв'язану плазму, чи спектрофотометрію для визначення концентрації іонів металу, або барвника; інфрачервону абсорбційну спектроскопію або Фур'є трансформовану інфрачервону спектроскопію, для визначення активних центрів біосорбенту. Сканувальною електронною мікроскопією візуально підтверджують морфологію поверхні біосорбентів, а методом електронної мікроскопії здійснюють візуалізацію для підтвердження внутрішньої морфології біомаси, особливо клітин, ілюстрування диспергування енергії. Рентгенівська спектроскопія використовується для елементного аналізу та хімічної характеристики металів, зв'язаних із

біосорбентом. Рентгеноструктурний аналіз застосовують для досліджень кристалографічної структури та хімічного складу металу. Ядерним магнітним резонансом досліджують активні центри біосорбенту. Рентгенівською фотоелектронною спектроскопією визначають ступінь окиснення зв'язаного на біосорбенті металу та його лігандні ефекти [3, с. 1390; 39, с. 448].

Технології одержання біовугілля та його властивості. Щодо способів виробництва біовугілля розрізняють карбонізацію, піроліз, гідротермальне зрідження [16, с. 17; 22, с. 425] та газифікацію [13, с. 599; 24, с. 11765] з використанням різних типів біосировини. Сьогодні піроліз вважають найбільш оптимальним методом, який забезпечує унікальну економічну перевагу завдяки низькій вартості, безперервності виробничих процесів і різноманітності продуктів. Технологію активно вивчають і широко застосовують [9, с. 593] у піролізерах із киплячим шаром, піролізаторах із обертовим конусом, шнекових піролізаторах тощо.

Одержання біовугілля піролізом передбачає три етапи. Перший етап – це попередній піроліз (температура до 200 °С; випаровуються вода, легкі леткі речовини, руйнуються зв'язки з утворенням гідропероксидів, карбонільних та карбоксильних груп. Другий етап ($T \sim 200 \div 500$ °С) передбачає

швидке випаровування з розкладанням геміцелюлози та целюлози [17, с. 1395]. Останньою стадією (вище ніж 500 °С) є деградація лігніну та інших органічних речовин із сильнішими хімічними зв'язками. Доведено кореляційний зв'язок між підвищенням температури піролізу та зміною фізико-хімічних властивостей біовугілля, зокрема збільшенням площі поверхні, карбонізованих фракцій, рН і летких речовин, проте певне зниження катіонообмінної здатності та вмісту поверхневих функціональних груп [22, с. 422; 36, с. 197].

Результати дослідження [32, с. 12961] показують, що під час піролізу за температури, нижчої ніж 500 °С, біомаса переважно перетворюється на поліциклічні ароматичні та низькомолекулярні сполуки, а за підвищення температури (більше ніж 600 °С) – на неконденсовані гази, схожі на піролізні, а також піролізні масла та залишки біовугілля. Проте згідно з дослідженнями [9, с. 591], лігнін за нижчих температур (≥ 50 °С) не перетворюється на гідрофобні поліциклічні ароматичні вуглеводні, а біовугілля стає більш гідрофільним. За температур вище ніж 650 °С біовугілля є термічно стабільним і стає більш гідрофобним. Зростання ароматичності структури зі збільшенням температури піролізу підвищує стійкість до мікробного розкладання [4, с. 807]. Доведено також [15, с. 124–375], що високий вміст лігніну в сировині призводить до більшого утворення біовугілля.

Різноманітні результати досліджень можуть апроксимуватися типом сировини біомаси, швидкістю нагрівання та температурою піролізу, а також за використання каталізаторів.

Системи піролітичної полігенерації біомаси забезпечують ширший спектр комерційних продуктів за незначну вартість та здатні перетворювати біомасу відходів у різноманітні комерційні продукти (рис. 2), включно з піролізним газом, біонафтою (біомасло) та біовугіллям [10, с. 4; 27, с. 599; 35, с. 112–963].



Рис. 2. Продукти конверсії біомаси

Піролізний газ можна використати безпосередньо як біометан після очищення [22, с. 11765], а біонафту також як засіб проти обмерзання та очищення, адже вона містить високу концентрацію органічних сполук [19, с. 30]. Біовугілля широко використовують як сільськогосподарське добриво завдяки функціональним групам та важливим біоелементам [14, с. 582], а також його здатності ефективно покращувати рН ґрунту, перешкоджаючи поглинанню важких металів, що слід використовувати для ремедіації екосистем [40, с. 105–152].

Досліджено піроліз азотовмісної біомаси [41, с. 162217] для вивчення характеристик біопалива, розгляду міграції сполук нітрогену під час піролізу, перспектив застосування та унікальності переваг легованих азотом карбоновмісних матеріалів для каталізу, адсорбції та зберігання енергії, а також їхню доцільність у виробництві нітрогеновмісних хімікатів (ацетонітрилу та азотних гетероциклічних сполук).

Біовугілля, отримане з рослинної сировини, часто має низький вміст поживних речовин, що можна пояснити втратами нітрогену під час піролізу, а також низьким початковим вмістом і складом золи, яка переважно складається з SiO_2 і CaO . Однак вміст нітрогену, як правило, досягає максимуму в діапазоні температур від 300 до 400 °С через наявність гетероциклічних N-сполук [8, с. 424]. Унаслідок випаровування знижується вміст фосфору в біомасі за дещо вищих температур (760 °С). Незважаючи на це, проведення піролізу за інших температурних діапазонів може сприяти накопиченню поживних речовин у біовугіллі [42, с. 143658; 8, с. 422; 19, с. 189].

Дослідження стабільності біовугілля, отриманого при спільному копіролізі соломи злакових та відходів вугільної шахти при 300, 450 та 600 °С, переконало у підвищенні показників його термічної та хімічної стабільності на 1,16 %–8,25 % та 39,17 %–68,36 % відповідно [11, с. 14].

Активування та структурні особливості модифікованого біовугілля. Попередні спроби модифікування були зроблені із застосуванням: а) фізичних модифікацій з активацією парою і очищенням газом; б) магнітної обробки та синтезу магніточутливих адсорбентів для видалення як катіонних, так і аніонних забруднень [7, с. 20; 28]; в) методів просочення, включно з мінеральними оксидами, а також хімічної модифікації кислотами, основами, органічними розчинниками або поверхнево-активними речовинами [6, с. 1158944; 5, с. 421].

Хімічна активація може бути дешевим і простим способом орієнтованих змін поверхні та сорбційних властивостей біовугілля і може призвести до отримання продукту, націленого на бажані механізми взаємодії в ґрунті, наприклад, шляхом комплексоутворення, поверхневої фізичної адсорбції, донорно-акцепторного механізму, сил Ван-дер-Ваальса та π - π -взаємодій – залежно від типу забруднювальних речовин [6, с. 115–895].

Хімічне окислення агросировини означає поверхневе окислення біовугілля до ескалації кисневмісних функціональних груп. При цьому розмір і структура пор біовугілля змінюються, а його адсорбційна здатність для полярного адсорбату – посилюється [33, с. 16]. Окиснювачами, які часто вводять для зміни природи біовугілля, є HCl , HNO_3 , H_2O_2 та H_3PO_4 [24, с. 370; 26, с. 143137].

Біовугілля містить велику кількість поверхневих оксигеновмісних ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, фенольних тощо) та інших функціональних груп у целюлозній матриці, або в матеріалах, пов'язаних із целюлозою, таких як геміцелюлоза та лігнін [13, с. 18]. Функціональні групи здатні підвищувати гідрофільність поверхні біовугілля, його катіонообмінні властивості та здатні перетворюватися на життєво важливі джерела енергії (речовини) на основі карбону [29, с. 167–172; 42, с. 143–658].

Біовугілля, одержане шляхом піролізу біомаси при температурах $400 \div 600^\circ\text{C}$, має меншу площу поверхні, але крім карбону ($\sim 60\%$) все ще містить значну кількість функціональних груп і різноманітних біогенних елементів (O, N, P, S, Ca, Mg і K). Численні дослідження [31, с. 371; 35, с. 112–959] показали, що ємність катіонного обміну біовугілля зменшується зі збільшенням температури піролізу.

Різні фізико-хімічні властивості біовугілля дозволяють використовувати його як біоадсорбент, каталізатор, засіб для зберігання енергії тощо. Зокрема, його змінна пористість і функціональність поверхні роблять його універсальною платформою для вирощування різних додаткових функціональних матеріалів [26, с. 26; 34, с. 248].

У літературних джерелах трапляється суперечлива інформація про вплив модифікаторів на фізико-хімічні властивості вуглецевих матеріалів, зокрема біовугілля: з одного боку, вказують на відсутність ефекту, або погіршення властивостей після модифікації, тоді як інші дослідження – на покращення тих же властивостей [4, с. 115–894; 11, с. 581].

Механізми впливу біовугілля на ґрунти. Одним із потужних напрямків використання піро-

лізованих відходів аграрного виробництва є покращання властивостей ґрунтів. Загалом у більшості досліджень відображено позитивні тенденції застосування біовугілля у формі модифікаторів ґрунтових систем, що покращують їхні властивості та продуктивність, знижуючи емісію парникових газів та інших поллютантів.

Біовугілля потенційно є альтернативою спалюванню органічних залишків у присадибних ділянках, запобігаючи втратам біоти та фауни в екосистемах, поживних речовин із ґрунтів, одночасно підвищуючи їхню родючість.

Аналіз хімічного складу та фізичних властивостей золи з відходів деревини та рослин, у тому числі бур'янів, дає змогу визначити її оптимальне застосування як добрив, оскільки вона містить багато біогенних елементів [29, с. 167–173]. Так, зола, отримана із соломи, яка містить багато кальцію та калію та фосфору, придатна для створення калійних та фосфорно-калійних добрив, підвищуючи рівень рН кислих ґрунтів [14, с. 582].

У науковій літературі виокремлено чотири основні типи лужності біовугілля: з поверхневими органічними функціональними групами (як спряжені основи), розчинні органічні сполуки (також спряжені основи слабких кислот), карбонати та луи (неорганічні оксиди, гідроксиди, сульфати, сульфіді, ортофосфати) [32, с. 1771]. Кожна з цих груп по-різному впливатиме на рН ґрунтів. Якщо розчинні форми забезпечують швидке зниження кислотності, то поверхневі органічні групи здійснюють довготривале буферування рН та катіонний обмін у середовищі ґрунтів [31, с. 370].

Результати інфрачервоної та рентгенівської спектроскопії доводять, що окси- та нітрогеновмісні групи на поверхні синтезованого біочару відіграють помітну роль в адсорбції важких металів через утворення хелатного комплексу з мультилігандом [40, с. 162–215].

Додавання біовугілля до ґрунту покращує виробництво біомаси, збільшуючи продуктивність культур та змінюючи властивості (покращує якість) ґрунту, такі як мікробіом, органічний вуглець, катіонний обмін, вологоутримувальна здатність та утримання поживних речовин. Дослідження показують, що біовугілля сприяє кращій доступності поживних речовин, проростанню, росту пагонів і коренів, а також виживанню рослин [38, с. 107532; 20, с. 142102] внаслідок дії поллютантів, зокрема важких металів та органічних токсикантів.

Згідно з дослідженнями максимальної ємності (перша адсорбція) біовугільного сорбента з кукурудзяної целюлози за одночасного видалення

адсорбованих на біовугіллі іонів важких металів (Pb^{2+} , Cu^{2+} і Zn^{2+}), та порівнянням його характеристик з іншими технічними адсорбентами, виготовлений сорбент має хороші адсорбційні характеристики [43, с. 104142]. Ємність усіх трьох іонів металів, адсорбованих на зазначеному біочарі, була набагато вищою, ніж для інших неорганічних адсорбентів (зокрема для нанодропу TiO_2 , Fe -гідротальциту і цеоліту, покритого залізом). Адсорбційна здатність, розрахована за допомогою моделі ізотерми Ленгмюра, становила 59,10 мг/г для Cu^{2+} , 68,92 мг/г для Pb^{2+} і 60,79 мг/г для Zn^{2+} , що дещо перевищувало експериментальні дані внаслідок конкуренції між іонами металів під час процесу гібридної за природою адсорбції [33, с. 4530; 43, с. 104143].

Незважаючи на відому здатність біовугілля підвищувати та стабілізувати рН ґрунту, залишається багато невідомого щодо природи його лужних компонентів, впливу вихідної сировини та умов виробництва на лужність, а також її мінливість [40, с. 105–152]. Для подальших досліджень впливу біовугілля на рН ґрунту необхідне глибше розуміння механізмів взаємодії його лужних складових із ґрунтом.

Хоча біовугілля має численні переваги, його широке застосування для покращення ґрунту та управління довкіллям стикається з певними перешкодами та обмеженнями: залежність ефективності від типу ґрунту та клімату [12, с. 114528; 38, с. 107532], висока вартість виробництва, потенційні екологічні ризики викидів токсинів та потреба в подальших дослідженнях довгострокових наслідків. Вирішення таких питань важливе для повної реалізації потенціалу біовугілля.

Висновки. Аналіз наукових публікацій показує, що біовугілля можна отримувати з різноманітної сировини та технологічних особливостей. Властивості кінцевого продукту можна змінювати, контролюючи ці параметри та застосовуючи підходи для надання біовугіллю бажаних функціональних характеристик. Це дозволяє виробляти біовугілля з характеристиками, адаптованими до конкретних потреб.

Потенційними шляхами вирішення проблем використання піролізованої біомаси з відходів аграрного виробництва є необхідність проведення подальших наукових досліджень з біовугіллями на основі різних видів біовідходів, розвитку інфраструктури та розробки відповідної нормативно-правової бази та політики щодо управління відходами.

Бібліографічний список

1. Брунеткін В. О., Давидов В. О., Тарахтій О. С. Дослідження термохімічної конверсії органічних речовин з використанням рівноважної моделі. *Вісник Херсонського НТУ. Інженерні науки*. 2023. № 2 (85). С. 9–19. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.1>
2. Коріненко Б. В. та ін. Циркулярна економіка та термохімічна конверсія твердих відходів. *Вісник ВПІ*. 2021. № 4. С. 7–19. <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2652>
3. Abdi O., Kazemi M. A review study of biosorption of heavy metals and comparison between different biosorbents. *J. Mater. Environ. Sci.*, 2015. Vol. 6 (5). P. 1386–1399.
4. Ali N. et al. Biochars reduced the bioaccessibility and (bio)uptake of organochlorine pesticides and changed the microbial community dynamics in agricultural soils. *Chemosphere*. 2019. Vol. 224. P. 805–815. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.163>
5. Alkharabsheh H. M. et al. Biochar and its broad impacts in soil quality and fertility, nutrient leaching and crop productivity: a review. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. № 5. . 993. 10.3390/AGRONOMY11050993
6. Boguta P. et al. Chemically engineered biochar – Effect of concentration and type of modifier on sorption and structural properties of biochar from wood waste. *Fuel*. 2019. Vol. 256. № 15. P. 115893. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115893>
7. Bordun I. Structural and Magnetic Properties of Ni/C Composites Synthesized from Beet Pulp and Corn Stems. *Magnetochemistry*. 2021. Vol. 7 (3). 31 p. DOI: 10.3390/magnetochemistry7030031
8. Cantrell K. B. et al. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 107. P. 419–428.
9. Czemik. S., Bridgewater, A. V. Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis. *Energy Fuels*. 2004. Vol. 18. P. 590–598.
10. Chen D., Liu W., Wang Y. Effect of biochar aging on the adsorption and stabilization of Pb in soil. *Journal Soils Sediments*. 2022. Vol. 22. No 1. P. 56–66. 10.1007/s11368-021-03059-x
11. Chen M., Sun Y., Peng Y. Effect of low-carbon coal gangue on the stability and dissolved organic matter characteristics of co-pyrolysis biochar: insights on pyrolysis temperatures and minerals. *Carbon Res*. 2025. Vol. 4. № 19. 14 p. <https://doi.org/10.1007/s44246-024-00186-1>
12. Choudhary Payal et al. Exploring invasive weed biochar as soil amendment: A study on fodder oats productivity and soil biological properties. *Environmental Research*. 2023. Vol. 216. (2) 1. P. 114527. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114527>
13. Couto N. Influence of the Biomass Gasification Processes on the Final Composition of Syngas: [Text]. *Energy Procedia*. 2013. Vol. 36. P. 596–606. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.068>
14. Dai Z., Zhang X., Tang C. Potential role of biochars in decreasing soil acidification: a critical review. *Sci. Total Environmental*. 2017. Vol. 601. No 1. P. 581–582. 10.1016/j.scitotenv.2016.12.169

15. Das S. K., Ghosh G. K., Avasthe R. Morpho-mineralogical exploration of crop, weed and tree derived biochar. *J. Hazard. Mater.* 2020. Vol. 407. No 7. P. 124370. 10.1016/j.jhazmat.2020.124370
16. Fang J. et al. Minireview of potential applications of hydrochar derived from hydrothermal carbonization of biomass: *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2018. Vol. 57. No 25. P. 15–21.
17. González P. G. Activated carbon from lignocellulosics precursors: A review of the synthesis methods, characterization techniques and applications. *Citation DataRenewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. P. 1393–1414.
18. Gheewala S. H. et al. Sustainability assessment of palm oil-based refinery systems for food, fuel, and chemicals. *Biofuel Research Journal*. 2022. Vol. 36. P. 1750–1763. DOI: 10.18331/BRJ2022.9.4.5
19. Ippolito J. et al. Designer, acidic biochar influences calcareous soil characteristics. *Chemosphere*. 2016. Vol. 142. P. 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.05.092>
20. Kapoor T. R., Zdarta J. Fabrication of engineered biochar for remediation of toxic contaminants in soil matrices and soil valorization. *Chemosphere*. 2024. Vol. 358. P. 142101. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142101>
21. Hong Yu. et al. Innovative use of silvichemical biomass and its derivatives for heavy metal sorption from wastewater. *Int. J. Environment and Pollution*. 2008. Vol. 34. No 1–4. P. 427–450.
22. Keri B. et al. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 107. P. 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.084>
23. Leng Lijian et al. Biochar stability assessment methods: a review. *Bioproducts and Biosystems Engineering: review article. Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 647. P. 210–222 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.402>
24. Lyons Cerón A. Effect of Woody Biomass Gasification Process Conditions on the Composition of the Producer Gas [Text]. Special Issue Selected Papers from the 9th European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES2021). Sustainability, 2021. Vol. 13, No 21. P. 11763.
25. Marathe S., Sadowski Ł. Developments in biochar incorporated geopolymers and alkali activated materials: a review. *Journal of Cleaner Product*. 2024. Vol. 469. P. 143136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143136>
26. Miao Z. and Zixin P. Porous carbon materials with different dimensions and their applications in supercapacitors. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2024. Vol. 57, No 43. 26 p. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024JPhD...57Q3001Z/abstract>
27. Nuno Couto et al. Influence of the Biomass Gasification Processes on the Final Composition of Syngas. *Energy Procedia*. 2013. Vol. 36. P. 596–606.
28. Qiu M. et al. Biochar for the removal of contaminants from soil and water: a review. *Biochar*. 2022. Vol. 4, 19. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00146-1>
29. Ranjeet Kumar Mishra, Kaustubha Mohanty. A review of the next-generation biochar production from waste biomass for material applications. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 904, No 15. P. 167171. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167171>
30. Resego Phiri, Sanjay Mavinkere Rangappa, Suchart Siengchin. Agro-waste for renewable and sustainable green production: a review. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 434, No 1. P. 139989. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139989>
31. Rivka B. et al. Characterization and quantification of biochar alkalinity. *Chemosphere*. 2017. Vol. 167. P. 367–373. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.151>
32. Singh B. P., Cowie A. L., Smernik R. J. Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature. *Environmental Science and Technology*. 2012. Vol. 46, No 21. P. 1770–1778. 10.1021/es302545b
33. Shahbazi R., Behbahani, F. K. Synthesis, modifications, and applications of iron-based nanoparticles. *Mol. Divers*. 2024. Vol. 28. P. 4515–4552. <https://doi.org/10.1007/s11030-023-10801-9>
34. Shahzadi T. et al. Advances in lignocellulosic biotechnology: A brief review on lignocellulosic biomass and cellulases. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 2014. Vol. 5, No 3. P. 246–251. DOI: 10.4236/abb.2014.53031
35. Song G. et al. Quality of gaseous biofuels: Statistical assessment and guidance on production technologies. *Renew Sustain Energy Rev*. 2022. Vol. 169. P. 112959.
36. Tomczyk A., Sokolowska Z., Boguta P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 2020. Vol. 19. P. 191–215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
37. Tran H. et al. Removal of various contaminants from water by renewable lignocellulose-derived biosorbents: *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2019. P. 2155–2219.
38. Waheed A. et al. Biochar in sustainable agriculture and Climate Mitigation: Mechanisms, challenges, and applications in the circular bioeconomy. *Biomass and Bioenerg*. 2025. Vol. 193. P. 107531. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107531>
39. Wang J. and Chen. C. Biosorption of Heavy Metals by *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnology Advances*. 2006. Vol. 24. P. 427–451. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.03.001>
40. Xingxiu Huang et al. Combined resource utilization of ash from biomass power generation and wheat straw biochar for soil remediation. *Applied Soil Ecology*. 2024. Vol. 193. P. 105150.
41. Xiong J. et. al. Research progress on pyrolysis of nitrogen-containing biomass for fuels, materials, and chemicals production. *The Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 872 (3). P.162214. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.162214
42. Yang Lu. et al. Effects of biochar addition on the abundance, speciation, availability, and leaching loss of soil phosphorus. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 758, No 1. P. 143657.
43. Zhao D. et al. Recycling corn stalks as an effective biosorbent for heavy metal removal from wastewater: Investigation on the adsorption performance and mechanism. *Environmental Technology & Innovation*. 2025. Vol. 38. P. 104140. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104140>

Стаття надійшла 13.01.2025