

установкою: стабільна базова потужність від біогазу дозволить зменшити необхідну ємність дорогих акумуляторів, використовуючи вітрові турбіни для покриття додаткових потреб у періоди пікової активності. Враховуючи розрахункову річну генерацію у 3 512 кВт·год, система вимагає автоматизованого управління навантаженням (Smart Load), щоб кожна вироблена кіловат-година була використана цільово. Час виходу системи на робочий режим після монтажу є мінімальним (кілька циклів калібрування), проте реальна економічна ефективність залежатиме від здатності системи «підмішувати» власну енергію до загальної мережі ферми. Це дозволить не лише економити на закупівлі електрики, а й створити надійний енергетичний щит для життєво важливих процесів тваринницького комплексу.

Список використаної літератури:

1. Енергетична стратегія України до 2050 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 28 квіт. 2023 р. № 373-р. *Урядовий кур'єр*. 2023. 12 трав.
2. Кудря С. О. Відновлювані джерела енергії : підручник. Київ : Інститут відновлюваної енергії НАНУ, 2022. 392 с.
3. Метеорологічні дані для енергетики : довідник за 2021–2024 рр. / за ред. О. М. Вовченко. Вінниця : ВНТУ, 2024. 156 с.
4. Про стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел : Закон України від 15 черв. 2023 р. № 3220-ІХ. *Відомості Верховної Ради України*. 2023. № 45. Ст. 162.
5. *Practical Wind Energy Modeling with Python* / ed. by G. Stevens. Berlin : Springer, 2023. 280 p.
6. Габор С. Побудова дашбордів на Django : навч. посіб. Київ : ІТ-Преса, 2023. 180 с.
7. Меттіз Е. Python для наукових розрахунків : пер. з англ. Львів : Старий Лев, 2022. 320 с.
8. *PostgreSQL 16 High Performance* / ed. by H. J. Schonig. Birmingham : Packt Publishing, 2024. 450p.

УДК 631.4:661.183

ОСОБЛИВОСТІ ТА МЕХАНІЗМИ ДІЇ БІОВУГІЛЛЯ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В АГРОЕКОСИСТЕМАХ FEATURES AND MECHANISMS OF ACTION OF BIOCHAR FOR USE IN AGROECOSYSTEMS

Оксана Мазурак, Ірина Соловодзінська, Ірина Мазурак

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, Львів, Україна

Біовугілля (БВ) як наноконкомпозит та універсальна добавка все більше набуває актуальності в усьому світі, оскільки його виробництво та застосування є прикладом переходу до вуглецево-нейтрального балансу та циркулярної економіки.

Попри те, що фундаментальні оцінки UNEP вказують на 140 млрд. тонн біомаси [1, с. 8], сучасні тенденції інтенсифікації агросектору країн свідчать про подальше зростання цього показника, що робить питання переробки біомаси все більш критичним.

Статистичні дані свідчать [1, с. 8], що відходи біомаси залишаються ще недостатньо використаними, оскільки до 69% від їх загальної кількості піддається спалюванню, захороненню або компостуванню. Раціональне управління відходами також може знизити глобальне потепління, пов'язане з втратою ресурсів, оскільки органічні відходи, що не переробили після споживання, генерують до 12% світових викидів CH₄.

Загалом агропромислові відходи можливо переробляти різними шляхами (утворення біовугілля, переробка у біополімери та нанопоповнювачі, компостування та анаеробне розкладання,

використання в якості кормів та інші). Кожен з шляхів управління такими відходами згідно аналізування етапів життєвого шляху продукції (LCA) має свої переваги та проблеми до вирішення.

Порівняно з компостом, біовугілля має більш лонгований термін стабільності в ґрунті та кращі показники впливу на довкілля [2, 3]. Крім того, його поєднання з органічними залишками, такими як грибний компост чи пташиний послід, значно пришвидшує процес компостування та підвищує ефективність відновлення поживних речовин.

В нашому огляді ми акцентуємо увагу на механізмах дії біовугілля, як перспективного та цінного продукту [3] для аграрного виробництва, що окрім агрономічних переваг використання, може виконувати захисні функції екологічного спрямування (секвестрація вуглецю як методу боротьби зі зміною клімату; детоксикація важких металів та залишків пестицидів, а також зменшення емісії парникових газів (викидів N_2O та CH_4 з ґрунту за рахунок кращої аерації та біологічної активності).

Біовугілля є не лише модифікатором будь-якого ґрунту, а й важливим інструментом у боротьбі з деградацією земель, забрудненнями навколишнього середовища, змінами клімату (зменшення викидів метану, оксидів карбону, інших парникових газів), накопиченням сільськогосподарських відходів та може бути цінною кормовою добавкою для тварин.

Біочар є можливою заміною активованого вугілля завдяки його поверхневим функціональним групам, пористій структурі, некарбонізованим та карбонізованим компонентам, а також високій питомій поверхні. Функціональність, просочення оксидами металів та поверхнєве окиснення біовугілля допомагають покращити його фізико-хімічні властивості та роблять його більш екологічним [4].

Ефективність дії біовугільних додатків з відходів аграрного виробництва безпосередньо залежить від чинників, що визначатимуть їх застосування: виду сировини, температури піролізу, типу ґрунту та вмісту стабільного вуглецю в них. Чим чистіша та якісніша сировина, тим вищий агроекологічний потенціал кінцевого продукту. Фізико-хімічні характеристики БВ розкривають його перспективи застосування, включаючи кондиціонування ґрунту, сприяння анаеробному розкладанню, добавку в компост та будівельні матеріали, наноматеріали та все ширший перелік потенційних застосувань, який продовжує розширюватися.

Біовугілля, як перспективний продукт термічної переробки біомаси в умовах обмеженого доступу кисню, все частіше використовується в сільському господарстві. Його ефективність була перевірена як у лабораторних, так і в польових умовах. Основними напрямками агроекологічного застосування БВ є покращення якості ґрунтів, підвищення врожайності агрокультур, збільшення біодоступності поживних речовин, пролонгація дії добрив та покращення вологоутримувальної здатності ґрунту. Частинки біовугілля стають центрами грануляції. Вони «склеюють» навколо себе мінеральні частки ґрунту, створюючи стійку агрономічно цінну структуру, яка протидіє ерозії. У важких ґрунтах біовугілля створює систему великих ходів (макропор), через які виходить надлишкова волога та заходить кисень, необхідний для дихання коренів. Ще однією з важливих властивостей є його здатність нейтралізувати кислотність ґрунтів та знижувати мобільність важких металів, що сприяє екологічній реабілітації деградованих територій. Його застосування також позитивно впливає на зменшення викидів парникових газів, а саме CO_2 , CH_4 та N_2O , завдяки тривалому зв'язуванню карбону в ґрунтовому середовищі. Поєднання фізичного структурування та хімічної активності перетворює біовугілля на багатофункціональну матрицю, яка працює як «розумний» гумус. У природних умовах ці механізми неможливо відокремити, оскільки пориста структура є фундаментом для всіх хімічних процесів.

Функціональність біовугілля базується на трьох важливих чинниках: пористості, заряду поверхні та стабільності. Роль пор БВ є надважливою та багатогранною для аграрного сектору та покращення якості ґрунтових систем. Біовугілля змінює архітектуру ґрунту не лише на мікро-, а й на макрорівні.

Пори самі по собі не притягують катіони, але вони створюють величезну питому площу поверхні (може сягати $300 \div 800 \text{ м}^2/\text{г}$). Чим більше мікро- та мезопор, тим більша площа, на якій можуть розміститися активні хімічні центри. Саме на внутрішніх стінках цих пор розташовуються

функціональні групи (карбоксильні -COOH, гідроксильні -OH, фенольні), які мають негативний заряд і здатні утримувати рухливі легкорозчинні катіони лужних та лужно-земельних металів (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+).

Біовугілля працює як резервуар фізико-хімічних взаємодій, механізми яких включають: фізичну та хімічну адсорбцію іонів завдяки високій ємності катіонного обміну (ЄКО), де поверхня біовугілля утримує іони амонію (NH_4^+), калію (K^+) та магнію Mg^{2+} ; утримання фосфатів через іонні зв'язки, наприклад, з іонами Ca^{2+} або Fe^{3+} на поверхні пор (рис. 1), що призводить до лонгової стабілізації та утримання утворених сполук.

Важливим є капілярне утримання води в ґрунтових системах разом із розчиненими поживними речовинами, що утримуються в мікро- та мезопорах під дією капілярних сил. Дрібні пори утримують водні розчини разом із розчиненими в них катіонами, запобігаючи їх вимиванню в глибші шари ґрунту. Навіть якщо хімічний зв'язок слабкий, катіони, що знаходяться глибоко в лабіринтах мезопор, набагато повільніше вимиваються дощем або поливом.

Пори БВ також захищають ґрунтові бактерії та гриби від пересихання та простіших хижаків (*Protozoa*), формуючи для корисної мікробіоти життєвий бар'єр. Навіть коли простіші поїдають бактерій поза порами, вони виділяють надлишковий азот у формі амонію (NH_4^+), який стає доступним для рослин. Біовугілля дозволяє підтримувати цей баланс, не даючи хижакам повністю знищити бактеріальний запас. Саме тому, крім біологічного захисту пори є ідеальним місцем для колонізації мікробіомом у критичних умовах (посуха або хімічне забруднення) та своєрідним енергетичним резервуаром. Попри повільний розклад біовугілля, на його поверхні накопичується легкодоступна органіка (ексудати коренів), якою харчуються корисні мікроорганізми [5].



Рис. 1 – Основні фізико-хімічні механізми взаємодії біовугілля з компонентами ґрунтів

На кислих ґрунтах біовугілля стабілізує кислотність діючи як м'який розкислювач, підвищує рН, що особливо важливо для засвоєння фосфору, який стає доступним при $\text{pH} > 6,0$.

Захисна роль біовугілля проявляється у фізико-хімічному зв'язуванні (сорбції) важких металів та залишків пестицидів, іммобілізуючи їх у своїй структурі. Молекули органічних пестицидів ніби «застрягають» у порах БВ, оскільки за розміром еквівалентні розміру молекул токсиканта. Іони важких металів (Pb, Cd, Cu, Zn) вступають у реакцію з функціональними групами на поверхні біовугілля утворюючи стійкі нерозчинні комплекси. Це робить їх недоступними для поглинання рослинами, що надважливо для екологічної безпеки продукції [4 - 6].

Україна має один із найбільших у світі потенціалів біомаси злакових, який наразі використовується лише частково. За розрахунками, технічно доступний потенціал соломи в Україні

перевищує 30–40 млн. тонн на рік. Дослідження також вказують на ефективність дії рідного біовугілля для агрокультур, зокрема злаків [7]. Агропромислові відходи (солома або лушпиння), на відміну від деревини, часто багаті на кремній (Si), калій (K) та фосфор (P).

Солома злаків має унікальну трубчасту структуру судин, яка зберігається навіть після піролізу. Це створює високу макропористість БВ, що робить його ідеальним для утримання великої кількості води та колонізації корисними грибами (мікоризою).

Агровідходи часто мають вищу початкову зольність та кількість функціональних груп, а також високий вміст стабільного вуглецю та кремнію. Кремній (Si) може утворювати захисні комплекси, що додатково підвищує стійкість біовугілля до розкладання мікробами, забезпечуючи довгострокове депонування вуглецю.

Біовугілля з соломи часто має вищу ємність катіонного обміну у перші роки, що забезпечує сильнішу початкову фіксацію поживних речовин (NH_4^+ , K^+) [7 - 9].

Для деяких зернових продуктів (наприклад, вівсяних пластівців) переробка біовідходів зерна вівса (*Avena sativa* L.) стоїть надзвичайно гостро. Окрім втрат, які пов'язані з процесами обробки, лушпиння вівса становить до 36% ваги зерна та створює значну кількість залишків, які підлягають обробці, що становить серйозну проблему для виробників вівсяних пластівців [10, 11]. Щоб вирішити цю проблему, виробники вівсяних пластівців можуть створити ланцюги агропромислового симбіозу, щоб зменшити вплив на навколишнє середовище, пов'язаний із високим утворенням відходів від цієї діяльності.

Водночас важливо контролювати хімічний склад біовугілля. Наявність у його складі забруднювачів, таких як поліциклічні ароматичні вуглеводні, діоксини, фурани чи важкі метали, може спричинити лонговану токсичну дію, особливо при використанні біовугілля безпосередньо, без змішування з ґрунтом [12]. Однак, при дотриманні рекомендованих концентрацій (як правило, 1%, або менше) біовугілля не має шкідливого впливу на компоненти довкілля, навпаки воно сприяє підвищенню активності ґрунтової мікрофлори та біомаси рослин. Використання біовугілля з агропромислових відходів є не просто способом утилізації, а стратегічним методом отримання високофункціонального меліоранту, який має унікальні структурні та хімічні переваги для покращення ґрунту.

Механізми дії біовугілля в агроекосистемах є комплексними та синергічними: фізичне структурування забезпечує оптимальний гідротермічний режим, тоді як хімічна активність поверхні гарантує пролонговане живлення рослин та детоксикацію ґрунтового середовища.

Список використаних джерел

1. Перетворення сільськогосподарських відходів біомаси на ресурс : звіт Програми ООН з довкілля (UNEP). 2009. 32 с. URL: <https://www.unep.org/> (дата звернення: 08.02.2026).
2. Adhikari S. et al. Comprehensive life cycle assessment of garden organic waste valorisation: A case study in regional Australia. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 472. Art. 143496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143496>.
3. Buentello-Montoya D. A. et al. Biochar and hydrochar from agro wastes: technological pathways, characteristics, and advances in soil amendment. *Frontiers in Environmental Science*. 2026. Vol. 14. Art. 1804984. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2026.1804984>.
4. González-Cencerrado A. et al. Assessing the environmental benefit of a new fertilizer based on activated biochar applied to cereal crops. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 711. P. 134668. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134668>.
5. Singh E. et al. Circular economy-based environmental management using biochar: Driving towards sustainability. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022. Vol. 163. P. 585–600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.056>.
6. González-Pernas F. M. et al. Effects of Biochar on Biointensive Horticultural Crops and Its Economic Viability in the Mediterranean Climate. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 9. P. 3407. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15093407>.

7. Zhu M. et al. Unlocking the potential of oat straw: Efficient pretreatment methods for enhanced glucose production. *BioResources*. 2024. Vol. 19, No. 3. P. 5685–5698. DOI: 10.15376/biores.19.3.5685-5698.

8. Improving Agriculture. International Biochar Initiative. URL: <https://biochar-international.org/about-biochar/soil-health/> (дата звернення: 20.04.2025).

9. Carvalho J. et al. Life Cycle Assessment (LCA) of Biochar Production from a Circular Economy Perspective. *Processes*. 2022. Vol. 10, No. 12. P. 2684. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10122684>.

10. Global Food Losses and Food Waste - Extent, Causes and Prevention : report. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 2011. URL: <http://www.fao.org/docrep/014/mb060e/mb060e00.pdf> (дата звернення: 04.04.2026).

11. Viana L. R. et al. Would Transitioning from Conventional to Organic Oat Grains Production Reduce Environmental Impacts: A LCA Case Study in North-East Canada. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 349. Art. 131344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131344>.

12. Viana R. et al. Life Cycle Assessment of Oat Flake Production with Two End-of-Life Options for Agro-Industrial Residue Management. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 6. Art. 5124. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15065124>.

УДК 631.31

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІДРІЗАННЯ ТА ПІДЙОМУ ҐРУНТУ РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ ҐРУНТООБРОБНОЇ УСТАНОВКИ

RESEARCH OF THE PROCESS OF CUTTING AND LIFTING SOIL BY THE WORKING BODIES OF THE SOIL TILLING MACHINE

Василь Грубань, Микита Храмов

*Миколаївський національний аграрний університет,
Миколаїв, Україна*

Проблема зниження негативного впливу механізованого обробітку ґрунту та витрат енергії на його проведення виникли в першій половині минулого сторіччя та є актуальними в міру збільшення інтенсифікації виробництва і маси сільськогосподарської техніки. Сучасні світові тенденції на отримання екологічно чистої продукції вимагають часткової відмови від хімічних засобів боротьби з бур'янами. Робочі органи ґрунтообробних машин не забезпечують раціонального впливу на ґрунт з точки зору агрономічної науки і еколого-економічних вимог. Тому для вдосконалення процесів обробітку ґрунту необхідний комплексний підхід до питань зменшення руйнування робочими органами машин і зняття структури ґрунту і розробки технологічних процесів, що забезпечують оптимізацію його агрофізичних властивостей і вдосконалення технологій вирощування сільськогосподарських культур з метою зниження витрат енергії на одиницю отриманої продукції.

Поверхневий обробіток ґрунту проводиться з метою кришіння пласта, подрібнення поживних залишків, знищення бур'янів і вирівнювання поверхні поля [1, 2].

При обробітку ґрунту традиційними знаряддями і машинами розвивається складний напружений стан від спільної дії деформацій стиснення, розтягання і зсуву. При цьому превалюючими є деформація стиснення і зсуву. Оскільки ґрунт відноситься до анізотропних матеріалів з міцністю при розтягуванні значно меншим, ніж міцність при стисненні, доцільним є використання робочих органів, що здійснюють відрив ґрунту від масиву [3].

При переміщенні експериментальної ґрунтообробної установки, плоскі диски, що вільно обертаються сприяють відриву ґрунту від масиву, що є затисненим між ними і далі здійснюють його переміщення за лемішем [1,4,5]. Одночасно стрілочата лапа забезпечує заглиблення та підйом шару ґрунту, часткове його кришіння та утворює ґрунтове ядро перед лемішем, і здійснюючи рух,