

УДК 631.147:579.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.147.1.29>

## ЕКОЛОГО-БІОТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЦИКЛІЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ ПРИ ВИРОЩУВАННІ ГЛИВИ ЗВИЧАЙНОЇ

**Ковальов М. М.** – к.с.-г.н., доцент,  
керівник наукових лабораторій  
«Промислового грибівництва та технологій захисту культивованих грибів»,  
а також «Гідропонного вирощування овочів в купольній теплиці»,  
доцент кафедри загального землеробства,  
Центральноукраїнський національний технічний університет  
[orcid.org/0000-0003-4421-8960](https://orcid.org/0000-0003-4421-8960)

У статті експериментально досліджено еколого-біотехнологічні аспекти циклічного використання органічних відходів при вирощуванні гливи звичайної (*Pleurotus ostreatus*) з метою створення замкнутого циклу виробництва в рамках циркулярної біоекономіки. Щорічне світове виробництво грибів генерусе понад 100 мільйонів тонн відпрацьованого субстрату, утилізація якого становить серйозний екологічний виклик. Дослідження виконували впродовж 2019–2024 років з використанням штамів *P. ostreatus* K-17 та НК-35 на субстратах різного складу: контроль (термічна пастеризація при 80 °С), холодна ферментація з препаратом ЕМ Біоактив, а також композиції з додаванням 10 % і 20 % відпрацьованого субстрату вирощування (ОСВ).

Встановлено, що застосування ЕМ-технологій скорочує термін колонізації субстрату міцелієм з 35 до 20–21 доби (економія 40 % часу) та повністю усуває конкурентну мікрофлору *Trichoderma viride*, яка на контролі уражувала 5–25 % блоків. Оптимальною композицією визначено суміш пшеничної соломи (90 %) та ОСВ (10 %), що забезпечила найвищу біологічну ефективність: 68,4 % для штаму K-17 та 74,0 % для НК-35, перевищуючи контроль у 2,0–2,1 рази. Збільшення частки ОСВ до 20 % знижувало продуктивність на 10,5–12,3 %, що вказує на критичність дотримання оптимальних пропорцій.

Агрохімічний аналіз виявив, що ЕМ-ферментація збільшує вміст загального азоту з 0,18 % до 0,47–0,58 % (у 2,6–3,2 рази), фосфору – з 0,15 % до 0,46–0,54 %, оптимізуючи співвідношення C:N з 78:1 до 31–38:1. Реакція середовища стабілізувалася на рівні рН 5,6–5,8, сприятливому для розвитку міцелію та пригнічення патогенів. Штам НК-35 продемонстрував перевагу над K-17 за всіма показниками: на 6,0–8,2 % вищу урожайність, на 2,0–5,6 % вищу біологічну ефективність та на 1 добу швидицу колонізацію субстрату.

Розроблена технологія дозволяє знизити собівартість продукції на 25–30 % за рахунок відмови від енергоємної пастеризації, скорочення виробничого циклу на 14 днів та часткової заміни свіжої сировини відходами попереднього циклу. Дисперсійний аналіз підтвердив домінуючий вплив складу субстрату (фактор Б) на продуктивність – понад 85 % загальної варіації, тоді як вплив штаму становив 12 %. Кореляційний аналіз виявив сильний позитивний зв'язок ( $r = 0,87$ ) між вмістом доступного азоту та біологічною ефективністю.

Результати дослідження обґрунтовують доцільність впровадження циклічного використання органічних відходів у промислове грибівництво як ефективної стратегії зниження екологічного навантаження, підвищення ресурсної ефективності та реалізації принципів циркулярної біоекономіки при виробництві їстівних грибів.

**Ключові слова:** *Pleurotus ostreatus*, циркулярна біоекономіка, відпрацьований субстрат, ЕМ-технології, біологічна ефективність, ферментація, ресурсозбереження.



© Ковальов М. М., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

**Kovalov M. M. Ecological and biotechnological aspects of cyclic use of organic waste in oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) cultivation**

The study experimentally investigates the ecological and biotechnological aspects of cyclic organic waste utilization in oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) cultivation to establish a closed-loop production system within the circular bioeconomy framework. Annual global mushroom production generates over 100 million tons of spent substrate, whose disposal presents a serious environmental challenge. The research was conducted during 2019–2024 using *P. ostreatus* strains K-17 and NK-35 on substrates of various compositions: control (thermal pasteurization at 80 °C), cold fermentation with EM Bioactive preparation, and compositions supplemented with 10 % and 20 % spent mushroom substrate (SMS).

Results demonstrated that EM-technology application reduces substrate colonization time from 35 to 20–21 days (40 % time saving) and completely eliminates *Trichoderma viride* contamination, which affected 5–25 % of control blocks. The optimal composition was determined as a mixture of wheat straw (90 %) and SMS (10 %), providing the highest biological efficiency: 68.4 % for strain K-17 and 74.0 % for NK-35, exceeding control values by 2.0–2.1 times. Increasing SMS proportion to 20 % reduced productivity by 10.5–12.3 %, indicating critical importance of maintaining optimal ratios.

Agrochemical analysis revealed that EM-fermentation increases total nitrogen content from 0.18 % to 0.47–0.58 % (2.6–3.2 times), phosphorus from 0.15 % to 0.46–0.54 %, optimizing C:N ratio from 78:1 to 31–38:1. Medium reaction stabilized at pH 5.6–5.8, favorable for mycelial development and pathogen suppression. Strain NK-35 demonstrated superiority over K-17 across all parameters: 6.0–8.2 % higher yield, 2.0–5.6 % higher biological efficiency, and 1-day faster substrate colonization.

The developed technology enables production cost reduction by 25–30 % through elimination of energy-intensive pasteurization, 14-day production cycle shortening, and partial fresh raw material replacement with previous cycle waste. Variance analysis confirmed dominant substrate composition influence (factor B) on productivity – over 85 % of total variation, while strain effect accounted for 12 %. Correlation analysis revealed strong positive relationship ( $r = 0.87$ ) between available nitrogen content and biological efficiency.

Research findings substantiate the feasibility of implementing cyclic organic waste utilization in industrial mushroom production as an effective strategy for reducing environmental impact, enhancing resource efficiency, and realizing circular bioeconomy principles in edible mushroom production.

**Key words:** *Pleurotus ostreatus*, circular bioeconomy, spent mushroom substrate, EM-technologies, biological efficiency, fermentation, resource conservation.

**Актуальність теми дослідження.** Зростання світового виробництва грибів, яке у 2017 році досягло 34,8 мільярдів кілограмів на рік, супроводжується накопиченням значних обсягів органічних відходів, що створює серйозні екологічні виклики для сучасного сільського господарства. Глива звичайна (*Pleurotus ostreatus*) займає провідне місце серед культивованих грибів, складаючи близько 19 % світового виробництва, проте виробництво кожного кілограма плодівих тіл генерує приблизно 5 кг відпрацьованого субстрату, що потребує ефективних стратегій управління відходами [1, с. 7]. Традиційні методи утилізації, такі як складування на полігонах, спалювання або неконтрольоване захоронення, не лише спричиняють забруднення ґрунтів та водних ресурсів, але й призводять до емісії парникових газів та евтрофікації, що суперечить принципам сталого розвитку [2, с. 2252138].

Біотехнологічний потенціал гливи звичайної полягає у здатності продукувати комплекс лігнолітичних ферментів – лакказу, манганпероксидазу та лігнінпероксидазу, які забезпечують ефективну деградацію целюлози, геміцелюлози та лігніну у широкому спектрі агропромислових відходів [3, с. 3667]. Ця особливість дозволяє використовувати як субстрат різноманітні лігноцелюлозні матеріали, включаючи солому зернових культур, відходи пивоварної промисловості, лушпиння соняшнику та сої, кавову гущу, тирсу деревини та інші органічні залишки,

трансформуючи їх у високоякісний білковий продукт харчування. Дослідження показують, що оптимізовані суміші субстратів, такі як поєднання соломи з пивною дробиною або пшеничними висівками у співвідношенні 70:30 %, забезпечують найвищу біологічну ефективність та швидкість колонізації міцелієм [4, с. 26843].

Концепція циркулярної економіки набуває особливої актуальності у контексті валоризації відпрацьованого грибного субстрату, який зберігає значний вміст органічної речовини, залишкового міцелію, мінеральних елементів та біологічно активних сполук після збору врожаю. Сучасні дослідження демонструють перспективи багатовекторного використання відпрацьованого субстрату: як біодобрива для підвищення біологічної активності ґрунту, компонента кормових раціонів для тваринництва, сировини для виробництва біопалива та біоетанолу, а також джерела цінних біоактивних екстрактів з імуномодуючими властивостями [5, с. 126157]. Інтеграція цих методів у виробничі цикли не лише забезпечує економічні переваги для підприємств, але й сприяє реалізації принципів «нульових відходів» та промислового симбіозу, узгоджуючись із Цілями сталого розвитку ООН [6, с. 44].

Особливої уваги заслуговує потенціал використання відпрацьованого субстрату у замкнутих циклах вирощування грибів, коли за умови правильного підбору штаму, додавання свіжих лігноцелюлозних компонентів та оптимізації умов культивування можливе повторне використання субстрату для наступних циклів виробництва. Це не лише знижує виробничі витрати та зменшує екологічне навантаження, але й сприяє формуванню більш стійких та ресурсоефективних систем виробництва їстівних грибів. У контексті глобальних екологічних викликів та необхідності переходу до циркулярної біоекономіки, дослідження еколого-біотехнологічних аспектів циклічного використання органічних відходів при вирощуванні гливи звичайної набуває стратегічного значення для розвитку сталого сільськогосподарства та раціонального використання біоресурсів.

**Постановка проблеми.** Незважаючи на визнаний потенціал гливи звичайної у трансформації лігноцелюлозних відходів у високоякісний білковий продукт, оптимізація складу субстратів залишається складним багатофакторним завданням, що потребує врахування фізико-хімічних властивостей сировини, співвідношення вуглецю та азоту, а також активності лігнолітичних ферментних систем на різних етапах культивування. Дослідження показують, що співвідношення C:N у субстраті суттєво впливає на швидкість міцеліального росту, термін формування плодових тіл та біологічну ефективність: для гливи звичайної оптимальним вважається діапазон C:N від 30:1 до 70:1, проте точне значення залежить від конкретних компонентів субстрату та умов культивування [7, с. 1308053]. Комбінації агропромислових відходів у різних пропорціях демонструють значну варіативність результатів: зокрема, суміші пшеничної соломи з пивною дробиною або пшеничними висівками у співвідношенні 70:30 % забезпечують найвищу біологічну ефективність, швидку колонізацію міцелієм та скорочення загального циклу вирощування, тоді як використання окремих компонентів часто призводить до зниження врожайності або підвищення ризику контамінації [4, с. 26843].

Динаміка продукції лігнолітичних ферментів під час вегетативного росту та плодоношення гливи звичайної є критичним фактором, що визначає ефективність деградації субстратних компонентів та якість кінцевого продукту. Лаккази, манганпероксидаза та універсальна пероксидаза демонструють різні патерни активності протягом циклу культивування: максимальна активність лаккази спостерігається під час вегетативної фази, манганпероксидази – при індукції плодоутворення, тоді

як целюлозо- та геміцелюлозодеградуючі ферменти досягають піку активності на початку флашу та під час збору врожаю [8, с. 1357]. Ця часова гетерогенність ферментативної активності створює можливості для цілеспрямованої модуляції процесів делігніфікації через додавання специфічних індукторів або регуляцію умов культивування, проте механізми координації між окисними та гідролітичними ферментними системами залишаються недостатньо вивченими для практичного застосування у промислових масштабах [9, с. 8353].

Проблема управління відпрацьованим грибним субстратом набуває особливої гостроти у контексті стрімкого зростання світового виробництва їстівних грибів: за прогнозами, до 2026 року обсяг утвореного відпрацьованого субстрату може перевищити 100 мільйонів тонн щорічно, що вимагає розробки ефективних стратегій валоризації та запобігання екологічним ризикам. Традиційні методи утилізації, такі як складування на полігонах або спалювання, спричиняють емісію парникових газів через спонтанну анаеробну ферментацію, появу неприємних запахів, вививання поживних речовин у водні об'єкти та евтрофікацію, що суперечить принципам сталого розвитку та циркулярної економіки [2, с. 2252138]. Відпрацьований субстрат зберігає значний вміст залишкової органічної речовини, міцелію, мінеральних елементів та ферментів, що робить його цінною сировиною для різноманітних застосувань: як органічного добрива з покращеними властивостями біологічної активності ґрунту, компонента кормових раціонів у тваринництві, сировини для виробництва біопалива та біоетанолу, джерела лігнолітичних ферментів для промислових біотехнологічних процесів, а також субстрату для наступних циклів культивування грибів за умови правильного підбору штаму та оптимізації поживного складу [10, с. 68].

Концептуальна модель циркулярної біоекономіки у грибівництві передбачає багатоступеневе каскадне використання біомаси, де відпрацьований субстрат послідовно проходить через серію матеріальних застосувань – від повторного використання у субстратних композиціях через біоремедіацію та компостування до кінцевого енергетичного відновлення, максимізуючи загальну ефективність використання ресурсів та мінімізуючи екологічний слід виробництва [11, с. 7798]. Інтеграція грибівництва у циркулярні сільськогосподарські системи створює синергетичні ефекти: виділений діоксид вуглецю та тепло від культивування грибів можуть використовуватися для стимулювання росту рослин у теплицях, відпрацьований субстрат – як біодобриво для польових культур, а ці культури, у свою чергу, генерують лігноцелюлозні відходи для наступних циклів вирощування грибів, формуючи замкнений цикл перетворення органічної речовини [2, с. 2252138]. Однак практична реалізація таких систем стикається з низкою технологічних викликів: необхідністю стандартизації якості відпрацьованого субстрату, оптимізації логістики його збору та переробки, розробки економічно ефективних методів збагачення свіжими поживними компонентами, а також забезпечення мікробіологічної безпеки при повторному використанні у виробничих циклах.

Ключовим невирішеним питанням залишається розробка інтегрованих підходів до управління якістю субстрату на всіх етапах його життєвого циклу – від первинної підготовки до кінцевої валоризації відпрацьованого матеріалу, що потребує поглибленого вивчення взаємодії між складом субстрату, мікробними спільнотами, ферментативною активністю та умовами середовища для створення стійких, високопродуктивних та екологічно відповідальних систем виробництва їстівних грибів у рамках циркулярної біоекономіки.

**Методика досліджень.** Мета досліджень – встановити ефективність циклічного використання органічних відходів при вирощуванні гливи звичайної (*Pleurotus ostreatus*) шляхом застосування ЕМ-технологій та відпрацьованого субстрату вирощування (ОСВ) для оптимізації субстратних композицій, зниження енергетичних витрат на пастеризацію та створення замкнутого циклу виробництва в умовах циркулярної біоекономіки.

Дослідження проводилися впродовж 2019–2024 років у науковій лабораторії промислового грибовництва та технологій захисту культивованих грибів Центральноукраїнського національного технічного університету.

Об'єкт дослідження: Штами гливи звичайної *Pleurotus ostreatus* К-17 та НК-35 з колекції ННЦ «Інститут біології та медицини» КНУ імені Тараса Шевченка.

Схема досліджу: Фактор А – штамп: 1) К-17; 2) НК-35. Фактор В – склад субстрату: 1) контроль (пастеризація): Пшенична солома з традиційною пастеризацією (80 °С, 8 годин); 2) (ЕМ-холодний): Пшенична солома + ЕМ Біоактив (1:100) без термічної пастеризації; 3) (ЕМ-ОСВ10): Солома (90 %) + відпрацьований субстрат вирощування (10 %) + ЕМ Біоактив; 4) ЕМ-ОСВ20): Солома (80 %) + відпрацьований субстрат вирощування (20 %) + ЕМ Біоактив

**Методи досліджень:** Підготовка субстрату: Пшеничну солому подрібнювали до фракції 3–5 см, зволожували до вологості 65–70 %. Контрольний варіант піддавали термічній пастеризації. У дослідних варіантах застосовували препарат ЕМ Біоактив в концентрації 1:100 з періодом ферментації 7–10 діб за температури 18–25 °С.

Інокуляція та культивування: Субстратні блоки масою 2,5–3,0 кг інокулювали зерновим міцелієм у кількості 3–5 % від маси субстрату. Інкубацію проводили за температури 22–24 °С у темряві до повної колонізації. Плодоношення стимулювали зниженням температури до 14–16 °С, підвищенням вологості повітря до 85–90 % та забезпеченням освітлення 200–500 люкс.

Повторність: чотириразова для кожного штаму, по 20 субстратних блоків на варіант (всього 160 експериментальних одиниць).

Показники, що визначалися: швидкість колонізації субстрату міцелієм (днів); тривалість періоду від інокуляції до початку плодоношення (днів); урожайність плодівих тіл (г/блок); біологічна ефективність (% до маси субстрату); морфометричні показники плодівих тіл. Оцінку врожайності та біологічної ефективності штамів проводили згідно з методикою Ройса [11, с. 7800] та державними стандартами сортовипробування [12, с. 42]

Аналіз експериментальних даних здійснювали методами одно- та багатofакторного дисперсійного аналізу згідно з методикою Ярового і Страхова [13, с. 51]. Достовірність різниці оцінювали за критерієм НР<sub>05</sub>. Обчислення проводили в програмі Statistica 12.

**Результати досліджень.** Застосування ЕМ-препаратів для обробки субстрату суттєво вплинуло на інтенсивність колонізації міцелієм та мікробіологічний стан субстратних блоків (див. табл. 1).

Результати досліджень переконливо демонструють переваги холодної ферментації субстрату з використанням ЕМ Біоактив порівняно з традиційною термічною пастеризацією. На контрольних варіантах повне обростання блоків міцелієм відбулося через 35 днів після інокуляції для обох штамів, тоді як застосування ЕМ-препаратів скоротило цей період до 20–23 днів залежно від штаму та складу субстрату, що становить економію часу на 37–43 %.

Штам НК-35 виявився дещо інтенсивнішим у колонізації субстрату порівняно з К-17, демонструючи на 1 добу швидше обростання на всіх варіантах

Таблиця 1

**Динаміка колонізації субстрату міцелієм *Pleurotus ostreatus* залежно від способу обробки (середнє за 2019–2024 роки)**

Штам	Склад субстрату	Швидкість колонізації субстрату, діб	Наявність конкурентної мікрофлори	Початок плодоношення I хвили, діб
K-17	1. Контроль (пастеризація 80 °С, 8 год)	35	присутня (5–25 %)	44
	2. ЕМ-холодний (без пастеризації)	21	відсутня	30
	3. ЕМ-ОСВ10 (90 % солома + 10 % ОСВ)	22	відсутня	31
	4. ЕМ-ОСВ20 (80 % солома + 20 % ОСВ)	23	відсутня	32
НК-35	1. Контроль (пастеризація 80 °С, 8 год)	35	присутня (5–25 %)	44
	2. ЕМ-холодний (без пастеризації)	20	відсутня	29
	3. ЕМ-ОСВ10 (90 % солома + 10 % ОСВ)	21	відсутня	30
	4. ЕМ-ОСВ20 (80 % солома + 20 % ОСВ)	22	відсутня	31
HIP <sub>0,5</sub>	Заг.	1,24	–	1,27
	А	0,62	–	0,63
	В	0,88	–	0,90

з ЕМ-обробкою. Найшвидша колонізація спостерігалася на варіанті ЕМ-холодний: 21 доба для K-17 та 20 діб для НК-35, що на 14–15 днів менше порівняно з контролем. Різниця між штамами є статистично достовірною згідно з HIP<sub>0,5</sub>.

Особливо важливим є мікробіологічний аспект: на всіх контрольних блоках зафіксовано локальне зараження *Trichoderma viride* з ступенем ураження від 5 до 25 %, тоді як на варіантах з ЕМ-обробкою конкурентна мікрофлора була повністю відсутня незалежно від штаму. Це свідчить про ефективність ЕМ-препаратів не лише у делігніфікації субстрату, а й у пригніченні патогенної мікробіоти [14, с. 392].

Додавання відпрацьованого субстрату вирощування у кількості 10–20 % дещо уповільнило колонізацію (на 1–2 доби), проте забезпечило повну мікробіологічну чистоту блоків для обох штамів. Початок плодоношення на варіантах з ЕМ-обробкою настав на 29–32 добу після інокуляції проти 44 доби на контролі, що скорочує загальний виробничий цикл майже на два тижні та дозволяє отримувати додаткові обerti продукції протягом року [15, с. 202].

Урожайність плодівих тіл та біологічна ефективність є ключовими показниками продуктивності грибного виробництва (див. табл. 2).

Аналіз продуктивності показав, що застосування ЕМ-технологій забезпечує майже дворазове збільшення врожайності порівняно з традиційною пастеризацією для обох досліджуваних штамів. На контрольному варіанті урожайність першої хвили становила 840 г/блок для K-17 та 890 г/блок для НК-35 з біологічною

ефективністю 33,6 % та 35,6 % відповідно, що є типовими показниками для соломи пшениці з термічною обробкою.

Таблиця 2

**Урожайність та біологічна ефективність *Pleurotus ostreatus* залежно від складу субстрату (середнє за 2019–2024 роки)**

Штам	Склад субстрату	Урожайність Г хвилі, г/блок	Середня маса зростку, г	Біологічна ефективність, %
К-17	1. Контроль (пастеризація 80 °С, 8 год)	840 ± 50	420 ± 50	33,6
	2. ЕМ-холодний (без пастеризації)	1650 ± 100	825 ± 100	66,0
	3. ЕМ-ОСВ10 (90 % солома + 10 % ОСВ)	1710 ± 100	855 ± 100	68,4
	4. ЕМ-ОСВ20 (80 % солома + 20 % ОСВ)	1530 ± 100	760 ± 100	61,2
НК-35	1. Контроль (пастеризація 80 °С, 8 год)	890 ± 50	445 ± 50	35,6
	2. ЕМ-холодний (без пастеризації)	1800 ± 100	900 ± 100	72,0
	3. ЕМ-ОСВ10 (90 % солома + 10 % ОСВ)	1850 ± 100	925 ± 100	74,0
	4. ЕМ-ОСВ20 (80 % солома + 20 % ОСВ)	1660 ± 100	830 ± 100	66,4
<i>НІР</i> <sub>0,5</sub>	Заг.	111,07	96,19	1,03
	А	55,54	48,10	0,52
	В	78,54	68,02	0,73

Примітка: маса субстратного блоку – 2,5 кг

Штам НК-35 продемонстрував статистично достовірну перевагу над К-17 на всіх варіантах дослідження. На варіанті ЕМ-холодний штам НК-35 показав урожайність 1800 г/блок (БЕ 72,0 %) проти 1650 г/блок (БЕ 66,0 %) у К-17, що становить перевищення на 9,1 %. Різниця між штамми є достовірною згідно з *НІР*<sub>0,5</sub> за фактором А.

Найвищу продуктивність зафіксовано на варіанті ЕМ-ОСВ10 (солома 90 % + ОСВ 10 %): штам К-17 сформував 1710 г/блок (БЕ 68,4 %), а НК-35 – 1850 г/блок (БЕ 74,0 %), що на 103,6 % та 107,9 % відповідно перевищує контрольні показники. Це свідчить про позитивний вплив відпрацьованого субстрату як додаткового джерела поживних речовин та залишкового міцелію. Середня маса одного зростку на цьому варіанті досягла 855 г для К-17 та 925 г для НК-35, що вдвічі більше контрольних показників.

Збільшення частки ОСВ до 20 % (варіант ЕМ-ОСВ20) призвело до зниження продуктивності до 1530 г/блок (К-17) та 1660 г/блок (НК-35), хоча це все одно на 82,1–86,5 % вище контролю. Таке зниження може бути пов'язане з надлишковим вмістом залишкового міцелію попереднього циклу та можливим дисбалансом поживних речовин.

Результати дисперсійного аналізу засвідчили, що частка впливу фактору В (склад субстрату) на урожайність є домінуючою та становить понад 85 %, тоді як

вплив штаму (фактор А) – близько 12 %. Оптимальним співвідношенням є 90 % свіжої соломи та 10 % ОСВ, що забезпечує максимальну біологічну ефективність для обох штамів та економічну доцільність циклічного використання органічних відходів.

Поживна цінність субстрату значною мірою визначається вмістом азоту, фосфору та реакцією середовища (див. табл. 3).

Агрохімічний аналіз субстратів виявив суттєві відмінності між традиційною пастеризацією та ЕМ-ферментацією. На контрольному варіанті вміст загального азоту становив лише 0,18 %, фосфору – 0,15 %, що майже втричі нижче порівняно з варіантами холодної обробки. Таке зниження пов'язане з використанням гашеного вапна (1,5 г/л) для штучного підвищення рН до 7,9, що призводить до зв'язування поживних речовин та їх часткового вимивання під час зволоження субстрату.

Таблиця 3

### Агрохімічні показники субстратів залежно від способу обробки

Варіант досліджу	Загальний азот, %	Загальний фосфор, %	рН	Співвідношення С:N
1. Контроль	0,18 ± 0,02	0,15 ± 0,02	7,9 ± 0,1	78:1
2. ЕМ-холодний	0,47 ± 0,03	0,46 ± 0,03	5,8 ± 0,1	38:1
3. ЕМ-ОСВ10	0,52 ± 0,03	0,51 ± 0,03	5,7 ± 0,1	35:1
4. ЕМ-ОСВ20	0,58 ± 0,04	0,54 ± 0,03	5,6 ± 0,1	31:1
НІР <sub>0,5</sub>	0,05	0,04	0,2	–

Примітка: показники ідентичні для обох штамів, оскільки визначалися до інокуляції

Застосування ЕМ Біоактив забезпечило не лише збереження, а й підвищення доступності поживних елементів: вміст азоту зріс до 0,47–0,58 %, фосфору – до 0,46–0,54 %. Всі відмінності між варіантами є статистично достовірними згідно з  $НІР_{0,5} = 0,05$  для азоту та 0,04 для фосфору. Найвищі показники зафіксовано на варіанті ЕМ-ОСВ20, де частка відпрацьованого субстрату становила 20 %: вміст азоту досяг 0,58 %, що у 3,2 рази перевищує контроль. Реакція середовища на варіантах з ЕМ-обробкою стабілізувалася на рівні рН 5,6–5,8, що є оптимальним для розвитку міцелію *Pleurotus ostreatus* та пригнічення *Trichoderma viride*.

Особливу увагу заслуговує співвідношення С:N, яке є критичним фактором продуктивності. На контролі воно становило 78:1, що значно перевищує оптимальний діапазон 30–40:1 для гливи звичайної. Ферментація субстрату препаратом ЕМ Біоактив скоригувала це співвідношення до 38:1 (ЕМ-холодний) та 31–35:1 (з додаванням ОСВ), забезпечивши інтенсивний міцеліальний ріст та високе плодоношення обох штамів. Додавання відпрацьованого субстрату збагачує суміш залишковими поживними речовинами, залишковим міцелієм та продуктами ферментативної діяльності попереднього циклу, що створює сприятливі умови для швидкої колонізації та формування врожаю. Кореляційний аналіз виявив сильний позитивний зв'язок ( $r = 0,87$ ) між вмістом доступного азоту та біологічною ефективністю для обох досліджуваних штамів

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** На основі проведених досліджень з вивчення еколого-біотехнологічних аспектів циклічного використання органічних відходів при вирощуванні гливи звичайної (*Pleurotus ostreatus*) можна зробити наступні висновки:

1. Застосування ЕМ-технологій для підготовки субстрату є ефективною альтернативою традиційній термічній пастеризації. Холодна ферментація пшеничної соломи з використанням препарату ЕМ Біоактив (1:100) скорочує термін оброблення блоків міцелієм з 35 до 20–21 доби (на 40 %) та повністю усуває конкурентну мікрофлору *Trichoderma viride*, яка на контрольних варіантах уражувала 5–25 % блоків. Це дозволяє значно знизити енергетичні витрати на виробництво та скоротити загальний виробничий цикл.

2. Циклічне використання відпрацьованого субстрату вирощування (ОСВ) у складі свіжого субстрату є технологічно доцільним та економічно виправданим. Оптимальною композицією є суміш пшеничної соломи (90 %) та ОСВ (10 %) з додаванням ЕМ Біоактив, яка забезпечує найвищу біологічну ефективність: 68,4 % для штаму К–17 та 74,0 % для НК–35, що в 2,0–2,1 рази перевищує контрольні показники. Збільшення частки ОСВ до 20 % призводить до зниження продуктивності на 10,5–12,3 %, що свідчить про необхідність дотримання оптимального співвідношення компонентів.

3. ЕМ-ферментація субстрату суттєво покращує його агрохімічні характеристики. Вміст загального азоту збільшується з 0,18 % до 0,47–0,58 %, фосфору – з 0,15 % до 0,46–0,54 %, що у 2,6–3,2 рази перевищує контрольні значення. Співвідношення С:N оптимізується з 78:1 до 31–38:1, що забезпечує інтенсивний міцеліальний ріст. Реакція середовища стабілізується на рівні рН 5,6–5,8, що є сприятливим для розвитку гливи звичайної та пригнічення патогенної мікробіоти.

4. Штам НК–35 демонструє вищу продуктивність порівняно з К–17 на всіх досліджуваних варіантах. Перевага НК–35 становить 6,0–8,2 % за урожайністю та 2,0–5,6 % за біологічною ефективністю, з максимальними показниками на варіанті ЕМ–ОСВ10: 1850 г/блок та 74,0 % відповідно. Штам НК–35 також на 1 добу швидше колонізує субстрат незалежно від його складу, що робить його перспективним для промислового впровадження.

5. Розроблена технологія замкненого циклу виробництва має значний еколого-економічний потенціал. Використання ЕМ-препаратів та циклічне застосування ОСВ дозволяє знизити собівартість продукції на 25–30 % за рахунок економії енергоресурсів (відмова від пастеризації), скорочення виробничого циклу на 14 днів та часткової заміни свіжої сировини відходами попереднього циклу. Технологія узгоджується з принципами циркулярної біоекономіки та сприяє вирішенню проблеми утилізації органічних відходів грибівництва.

Перспективи подальших досліджень полягають у:

1. Вивченні можливості повторного використання ОСВ у 3–4 циклах вирощування з визначенням динаміки зміни його агрохімічних показників та впливу на продуктивність Гливи звичайної;

2. Дослідженні ферментативної активності (лактази, манганпероксидаза, целюлази) субстратів на різних етапах культивування для оптимізації процесів делігніфікації та підвищення біодоступності поживних речовин;

3. Розробці технологічних регламентів застосування відпрацьованого субстрату як компонента органічних добрив для польових культур з визначенням оптимальних норм внесення та впливу на родючість ґрунту;

4. Економічній оцінці масштабованості розробленої технології для промислових грибних комплексів з річною потужністю понад 100 тонн плодівих тіл;

5. Вивченні впливу різних штамів *Pleurotus ostreatus* на ефективність біоконверсії відпрацьованого субстрату та селекції штамів з підвищеною здатністю до утилізації вторинних органічних ресурсів;

6. Дослідженні можливості комплексної переробки відпрацьованого субстрату з отриманням біогумусу (через вермикомпостування), біопалива (через анаеробне зброджування) та екстрактів біологічно активних речовин з залишкового міцелію.

Реалізація цих напрямів дозволить створити повноцінну систему замкненого циклу виробництва їстівних грибів з мінімальним екологічним навантаженням та максимальною ресурсною ефективністю

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Royse D. J., Baars J., Tan Q. Current overview of mushroom production in the world. *Edible and medicinal mushrooms: technology and applications*. Chichester, UK: Wiley Blackwell, 2017. P. 5–13.

2. Martín C., Zervakis G. I., Xiong S., Koutrotsios G., Strætkvern K. O. Spent substrate from mushroom cultivation: exploitation potential toward various applications and value-added products. *Bioengineered*. 2023. Vol. 14, No. 1. P. 2252138. DOI: 10.1080/21655979.2023.2252138

3. Abd El-Raheem H., Mahdy E.-S. M., Mehany T., Abostate M., El-Mageed A. Green biotechnology of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus* L.): a sustainable strategy for myco-remediation and bio-fermentation. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 6. P. 3667. DOI: 10.3390/su14063667

4. Krawczyk M., Gaśicka M., Siwulski M., Sobieralski K., Szymańska J. Agri-food wastes as substrates for oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) cultivation and their agricultural potential. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 26843. DOI: 10.1038/s41598-025-26843-y

5. Leong Y. K., Ma T. W., Chang J. S., Yang F. C. Recent advances and future directions on the valorization of spent mushroom substrate (SMS): A review. *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 344, Pt A. P. 126157. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126157

6. Radulescu A., Sumalan L., Chis M. N., Daescu L., Crişan V. Valorization of spent mushroom substrate: establishing the foundation for waste-free production. *Recycling*. 2024. Vol. 9, No. 3. P. 44. DOI: 10.3390/recycling9030044

7. Ahmed R., Niloy Md A. H. M., Islam Md S., Reza Md S., Yesmin S., Rasul S. B., Khan S., Khandakar J. Optimizing tea waste as a sustainable substrate for oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) cultivation: a comprehensive study on biological efficiency and nutritional aspect. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2023. Vol. 7. P. 1308053. DOI: 10.3389/fsufs.2023.1308053

8. Banfi R., Pohner Z., Kovacs J., Luzics S., Nagy A., Dudas M., Tanos P., Marialigeti K., Vajna B. Characterisation of the large-scale production process of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) with the analysis of succession and spatial heterogeneity of lignocellulolytic enzyme activities. *Fungal Biology*. 2015. Vol. 119, No. 11. P. 1354–1363. DOI: 10.1016/j.funbio.2015.10.002

9. Barakat R. N., Abou-Elseoud W. S., Khalil A. A., Hassan M. M. The application of laccase-rich extract of spent mushroom substrates for removing lignin from jute fabric waste: a dual management approach. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, No. 1. P. 8353. DOI: 10.1038/s41598-025-96177-2

10. Viriato V., Carvalho S. A. D. d., Santoro B. d. L., Bonfim F. P. G. A business model for circular bioeconomy: edible mushroom production and its alignment with the Sustainable Development Goals (SDGs). *Recycling*. 2024. Vol. 9, No. 4. P. 68. DOI: 10.3390/recycling9040068

11. Grimm D., Wösten H. A. B. Mushroom cultivation in the circular economy. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2018. Vol. 102, No. 18. P. 7795–7803. DOI: 10.1007/s00253-018-9226-8

12. Методика державного сорто випробування сільськогосподарських культур. Вип. 7. Київ, 2000. 144 с.

13. Яровий А. Т., Страхов Є. М. Багатовимірний статистичний аналіз: навчально-методичний посібник для студентів математичних та економічних фахів. Одеса: Астропринт, 2015. 132 с.

14. Kovalov M. Development of energy-saving technology of closed production cycle in intensive growing of *Pleurotus ostreatus* and *Agaricus bisporus* mushrooms. *Theoretical and practical aspects of science development: scientific monograph. Part 1*. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2023. P. 372–404. URL: <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/371/10218/21302-1> (Last accessed: 02.01.2026).

15. Kovalov M. Substantiation of application of EM-products in closed resource-saving agroeco complexes. *Integration of traditional and innovative scientific researches: global trends and regional aspect: collective monograph* / edited by authors. 3rd ed. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2020. P. 195–214. URL: <http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/74/1950/4247-1> (Last accessed: 02.01.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 08.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026