

МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ФАРМАЦЕВТИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет медико-фармацевтичних технологій
Кафедра біотехнології

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА БІОМАТЕРІАЛУ НА
ОСНОВІ ГРИБНОГО МІЦЕЛІЮ»

Виконала: здобувачка вищої освіти групи БТ621(3,10д)-01
спеціальності 162 Біотехнології та біоінженерія
освітньої програми Біотехнологія

Поліна ПРИХОДЬКО

Керівник: Доцент закладу вищої освіти кафедри біотехнології,
к.фарм.н, доцент Ольга КАЛЮЖНАЯ

Рецензент: Завідувачка кафедри біотехнології, біофізики та
аналітичної хімії Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут», д.т.н., проф
Ольга БЛИЗНЮК

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто використання грибного міцелію для створення інноваційних будівельних матеріалів. Розроблено технологічну схему виробництва композиту на основі міцелію та запропоновано концепцію впровадження цієї технології для вітчизняного виробництва. Оцінено екологічну безпечність матеріалу, його біорозкладність, відновлюваність сировини та низький вуглецевий слід. Матеріал розглядається як екологічна альтернатива традиційним утеплювачам. Проаналізовано потенціал масштабування технології в контексті сталого розвитку та енергоефективного будівництва.

Ключові слова: грибний міцелій, виробництво композиту, біорозкладність, відновлюваність сировини.

ANNOTATION

The paper considers the use of mushroom mycelium to create innovative building materials. A technological scheme for the production of a composite based on mycelium has been developed and a concept for the implementation of this technology for domestic production has been proposed. The environmental safety of the material, its biodegradability, renewability of raw materials, and low carbon footprint have been assessed. The material is considered as an ecological alternative to traditional insulation materials. Potential for scaling the technology in the context of sustainable development and energy-efficient construction have also been analyzed.

Keywords: mushroom mycelium, composite production, biodegradability, renewability of raw materials.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Аналітичний огляд.....	8
2 Характеристика готового продукту, сировини, матеріалів, напівпродуктів.....	17
2.1 Характеристика готового продукту.....	17
2.2 Характеристика сировини.....	20
2.3 Характеристика біологічних об'єктів.....	24
2.4 Біосинтез цільового продукту.....	31
3 Технологічна частина.....	38
3.1 Розрахунок матеріального балансу.....	38
3.2 Розрахунок і вибір технологічного обладнання	42
3.3 Опис технологічного процесу.....	55
3.4 Схеми виробництва.....	67
3.5 Контроль виробництва.....	72
3.6 Аналіз екологічних аспектів.....	75
Висновок.....	80
Список використаної літератури.....	82
Додатки.....	87

					162.01.15.00 000 ПЗ			
Змн..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Приходько				Організація виробництва біоматеріалу на основі грибного міцелію Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевірив	Калюжная						2	81
.						НФаУ Кафедра біотехнології		
Н. контр.								
Затвердив	Хохленкова Н.В.							

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному світі зростає попит на екологічно чисті, біорозкладні та енергоефективні матеріали, що обумовлено глобальними викликами, такими як зміна клімату, виснаження природних ресурсів та потреба в сталому розвитку. Біокомпозитні матеріали на основі грибного міцелію, зокрема *Pleurotus ostreatus*, культивованого на відходах лісопереробної промисловості, є інноваційною альтернативою традиційним синтетичним матеріалам, таким як пінополістирол чи пластик, завдяки своїм тепло- та шумоізоляційним властивостям, біорозкладності та низькій собівартості сировини. На кафедрі біотехнології НФаУ розроблена технологія отримання біокомпозитного матеріалу на основі грибного міцелію, який розглядається як альтернатива шумо- та теплоізоляційним матеріалам. Однак перехід від лабораторних розробок до промислового виробництва стикається з проблемами нестабільності параметрів культивування, складності масштабування, високих витрат на обладнання та потреби в точному контролі якості. З огляду на це, розробка технології організації виробництва біоматеріалу на основі грибного міцелію, адаптованої до промислових умов, є актуальним завданням, яке сприяє зниженню екологічного навантаження та підвищенню конкурентоспроможності вітчизняних виробників.

Міцеліальні біокомпозити, що формуються шляхом культивування грибів на органічних субстратах, таких як тирса, пшеничні висівки чи кавове лушпиння, забезпечують міцність, легкість та екологічність, що робить їх ідеальними для тепло- та шумоізоляції в будівництві, пакувальній промисловості та дизайні. За даними Grand View Research, обсяг світового ринку біокомпозитних матеріалів у 2023 році оцінювався в 31,96 млрд доларів США, і, за прогнозами, з 2024 по 2030 рік він зростатиме зі

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

середньорічним темпом зростання (CAGR) на рівні 15,6%, що свідчить про глобальний попит. Водночас в Україні виробництво таких матеріалів перебуває на початковій стадії, а більшість ізоляційних матеріалів імпортується, що підкреслює необхідність локалізації технологій для зменшення залежності від закордонних постачальників та підтримки економічної стійкості. Актуальність теми посилюється потенціалом використання відходів агро- та лісопереробної промисловості, що відповідає принципам циркулярної економіки та сталого розвитку.

Застосування інноваційних підходів до організації виробництва біоматеріалу на основі міцелію дозволить українським підприємствам підвищити ефективність використання сировини, знизити витрати на імпорт та відповідати екологічним стандартам ЄС, що є важливим у контексті інтеграції України до європейського ринку. Ця розробка, виконана в лабораторних умовах кафедри біотехнології НФаУ та адаптована до промислового виробництва за участі фахівців ТОВ «ІНЖЕНІУМ ГРУП», спрямована на створення технології, придатної для умов вітчизняних підприємств.

Мета роботи. Розробити та обґрунтувати технологічний процес організації виробництва біокомпозитного матеріалу на основі грибного міцелію *Pleurotus ostreatus*, адаптований до промислових умов українських підприємств, із забезпеченням високої якості продукту, економічної ефективності та екологічної стійкості.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Проаналізувати сучасні наукові та нормативні джерела щодо біотехнологічних особливостей культивування грибного міцелію, умов його росту та вимог до якості біокомпозитів.
2. Описати біооб'єкт дослідження (*Pleurotus ostreatus*) із акцентом на його фізіолого-біохімічні властивості та придатність для промислового

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4

виробництва.

3. Обґрунтувати вибір технологічного підходу, включаючи етапи підготовки субстрату, інокуляції, інкубації, формування та стабілізації біокомпозиту.

4. Підібрати та розрахувати необхідне технологічне обладнання відповідно до умов виробництва, особливостей сировини та масштабованого процесу.

5. Скласти біологічну, технологічну та апаратурну схеми виробництва, що відображають послідовність і умови реалізації біотехнологічного процесу.

6. Визначити точки контролю якості на кожному етапі, розробити заходи моніторингу та регулювання параметрів.

7. Проаналізувати екологічні аспекти виробництва та запропонувати рішення щодо зменшення впливу на довкілля.

8. Розробити додаткові технологічні рішення для оптимізації виробництва біоматеріалу, що сприятимуть зниженню витрат та підвищенню рентабельності.

Об'єкт роботи. Міцелій гриба *Pleurotus ostreatus*, культивованій на відходах лісопереробної промисловості, як основа для виробництва біокомпозитного матеріалу з тепло- та шумоізоляційними властивостями.

Предмет роботи. Біотехнологічний процес отримання біокомпозитного матеріалу на основі міцелію, а також технологічні схеми та обладнання, що використовуються на підприємстві.

Методи. У процесі дослідження застосовувалися аналітичні методи (аналіз наукових джерел, нормативних документів), розрахункові методи для підбору обладнання, а також принципи системного підходу до проектування біотехнологічних процесів, характерні для діяльності ТОВ «ІНЖЕНІУМ ГРУП».

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена на кафедрі

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

біотехнології НФаУ технологія організації виробництва біокомпозитного матеріалу на основі грибного міцелію *Pleurotus ostreatus* за сприяння ТОВ «ІНЖЕНІУМ ГРУП» може бути впроваджена на українських підприємствах, що дозволить знизити залежність від імпорту ізоляційних матеріалів для будівництва, оптимізувати використання відходів агро- та лісопереробної промисловості та підвищити якість продукції відповідно до стандартів ЄС. Представлені розрахунки обладнання, контрольні точки процесу та технологічні схеми є практичним інструментом для реалізації проєкту в умовах вітчизняних виробництв. Розроблена технологія в перспективі може бути адаптована до виробництва інших видів матеріалів – пакувальних, виробництва меблів, предметів інтер'єру, посуду тощо.

Окремі результати роботи представлено на науково-практичних заходах (додатки) та опубліковано в матеріалах конференцій:

1. Приходько П. С., Калюжная О. С., Хохленкова Н. В. Перспективи використання біорозкладних матеріалів як альтернативи пластику. Проблеми та досягнення сучасної біотехнології: матеріали IV міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., (22 березня 2024 р., м. Харків). Х. : НФаУ, 2024. С. 322-325.

2. Приходько П. С. Калюжная О.С. Створення біоматеріалу на основі грибного міцелію. Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті: матеріали XX Міжнародного форуму молоді (4-5 квітня 2024, м. Харків) Держ. біотехнол. ун-т., Харків, 2024. С. 292.

3. Приходько П.С. Виробництво текстилю з міцелію грибів. Актуальні питання створення нових лікарських засобів: мат. XXX міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів (17-19 квітня 2024 р., м. Харків). Харків: НФаУ, 2024. С. 170-171.

4. Prykhodko P., Kaliuzhnaia O., Khokhlenkova N. Biomaterials based on fungi mycelium in the concept of sustainable development. European dimensions of sustainable development: VI International conference under the support of Erasmus+ projects, 15-17 may, Kyiv. P. 39.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

5. Приходько П. С. Перспективність організації виробництва біоматеріалу на основі грибного міцелію. Youth Pharmacy Science: матеріали V Всеукраїнської науково практичної конференції з міжнародною участю (10-11 грудня 2024 р., м. Харків). Харків: НФаУ, 2024. С. 165-167.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Розвиток біодизайну: сучасні тенденції та екологічні аспекти

Біодизайн сьогодні є одним із провідних напрямків інновацій у дизайні та виробництві, спрямованих на створення екологічно чистих і сталих матеріалів та продуктів. Він ґрунтується на використанні біологічних процесів і матеріалів, що дозволяють знизити негативний вплив на навколишнє середовище та сприяти циркулярній економіці.

Однією з ключових проблем сучасної індустрії є залежність від синтетичних матеріалів, які забруднюють природу і важко розкладаються. Біодизайн пропонує альтернативи у вигляді природних, біорозкладних і відновлюваних ресурсів. Так, наприклад, у сфері барвників і пігментів активно розвиваються технології отримання натуральних барвників із рослин, бактерій, водоростей та грибів. У цьому контексті гриби розглядаються як перспективне джерело натуральних пігментів, що можуть застосовуватися в текстильній, харчовій, косметичній промисловості, а також у сфері біодизайну. Гриби продукують широкий спектр вторинних метаболітів, серед яких особливе місце займають кольорові пігменти. Вони представлені антрахінонами, меланінами, хінонами, каротиноїдами та іншими фенольними сполуками [20]. Ці пігменти забезпечують грибам жовті, червоні, помаранчеві, бурі й навіть сині кольори, мають високу стабільність та, в багатьох випадках, антиоксидантну активність.

Гриби родів *Pleurotus* демонструють перспективні властивості як продуценти природних барвників. У цих видах містяться не тільки ферменти, здатні до біодеградації органічних решток, але й сполуки, що мають забарвлення і можуть бути використані як пігментні компоненти в

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

екологічно орієнтованих технологіях. Особливо цікавими є жовті каротиноїди в *Pleurotus citrinopileatus*, які можуть бути екстраговані при відповідних умовах культивування. *Pleurotus ostreatus* здатен продукувати темно-коричневі меланіноподібні речовини, які мають природну стійкість до світла та термічної обробки. У той час як *Lentinula edode*, окрім відомих лікувальних властивостей, також виявляє здатність синтезувати пігменти у міцеліальній біомасі в залежності від середовища культивування [31].

Окрім вищезазначених видів, слід також згадати низку інших грибів, які активно досліджуються як джерела пігментів: *Trametes versicolor* продукує пігменти із антимікробними та антиоксидантними властивостями. *Russpororus sanguineus* синтезує яскраво-червоні хінонові пігменти, зокрема сангвінарин, що мають потенціал як біофарбники для текстилю. *Scytalidium cuboideum* відомий завдяки утворенню пурпурових і синіх барвників, які вже досліджуються для застосування у деревообробній та дизайнерській індустрії.

Застосування грибних барвників ґрунтується на їхній екологічній безпечності, біорозкладності, відновлюваності та сумісності з різними поверхнями та матеріалами. Барвники, отримані з міцелію, можуть бути інтегровані в текстильні матеріали як альтернативи синтетичним фарбникам, або використовуватись у біодизайнерських розробках для створення кольорових біополімерів і біоматеріалів.

Текстильна індустрія, будучи одним із найбільших забруднювачів довкілля, особливо гостро потребує інновацій. Біодизайн пропонує альтернативи у вигляді натуральних волокон, отриманих із рослинних чи мікробіологічних джерел, а також матеріалів на основі грибного міцелію. Такі матеріали не лише екологічні, а й мають високу міцність, гнучкість та біорозкладність, що значно знижує кількість промислових відходів. Особливо перспективними є біоматеріали на основі грибів, які можна вирощувати у потрібній формі і розмірах, отримуючи міцні та легкі

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

конструкції, здатні замінити пластик, пінопласт, тканини і навіть деякі будівельні матеріали. Вирощування міцелію відбувається за низьких енергетичних витрат і практично без відходів, що робить цей процес стійким і економічно вигідним.

Крім того, біодизайн активно впроваджується у харчову промисловість, де грибний міцелій використовується для створення альтернативних білкових продуктів. Це важливо з огляду на необхідність зменшення впливу традиційного тваринництва на клімат і довкілля. Продукти на основі грибного міцелію мають високі поживні властивості і підтримують тренд здорового та екологічного харчування [32].

Загалом біодизайн відповідає принципам сталого розвитку, оскільки сприяє зменшенню забруднень, ефективнішому використанню ресурсів, а також зниженню кількості відходів завдяки біорозкладним і відновлюваним матеріалам. Цей підхід підтримує циркулярну економіку, у якій матеріали можуть повторно використовуватися або безпечно розкладатися в природі без шкоди для екосистем.

Таким чином, розвиток біодизайну в різних галузях - від пігментів і барвників до текстилю, пакування та харчових продуктів - відкриває нові горизонти для створення сталих, екологічних технологій і виробів, які допомагають зменшити негативний вплив людини на планету та забезпечують перспективи для більш відповідального і гармонійного співіснування з природою.

1.2 Сучасний стан виробництва біоматеріалів з грибного міцелію

Сучасні застосування біоматеріалів на основі грибного міцелію охоплюють декілька ключових напрямків, кожен з яких демонструє значний

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

потенціал для екологічно чистої альтернативи традиційним матеріалам. Однією з найбільш розвинених сфер є пакування, де міцеліальні композити виступають як біорозкладний та амортизаційний заміник пінополістиролу [12]. Провідною компанією в цій галузі є Ecovative Design зі своєю технологією Mushroom® Packaging (рис 1.1), що використовує міцелій для створення захисного пакування з сільськогосподарських відходів [14]. Також інші компанії, зокрема MagGrow, інтегрують міцелій у своє пакування. Наукові дослідження підтверджують придатність цих матеріалів для пакування завдяки їхнім механічним властивостям та здатності до біодеградації.



Рис. 1.1 – Пакування, вироблене за технологією Mushroom® Packaging компанії Ecovative Design

(Джерело: Ecovative Design. (2025) <https://mushroompackaging.com/pages/licensing>)

Іншим важливим напрямком є використання міцелію в будівельних матеріалах. Завдяки своїй легкості, відносній міцності та вогнестійкості, міцеліальні композити розглядаються як екологічна альтернатива традиційним будівельним матеріалам. Компанії, такі як Biohm (рис. 1.2), розробляють ізоляційні панелі та композитні матеріали на основі міцелію. Академічні дослідження також активно вивчають потенціал міцелію для створення будівельних блоків та інших конструкційних елементів.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11



Рис. 1.2 – Будівельні блоки, вироблені компанією Biohm на основі грибного міцелію [22]

Перспективним є застосування міцелію в текстильній промисловості як замінишки шкіри. Компанії Mylo™ від Bolt Threads та Reishi™ від MycoWorks розробили інноваційні процеси вирощування міцелію для створення матеріалів з текстурою та властивостями (рис.1.3), подібними до шкіри тваринного походження, пропонуючи етичну та екологічну альтернативу.



Рис. 1.3 – Шкірозамінники на основі міцелію, розроблені компаніями Mylo™ від Bolt Threads та Reishi™ від MycoWorks

(Джерело: MycoWorks, Bolt Threads. (2025)<https://boltthreads.com/technology/mylo/>
<https://reishi.mycoworks.com/products/reishi%E2%84%A2-natural-doux>)

Художники та дизайнери адаптують цей новий матеріал у створенні

різноманітних екологічно чистих продуктів, таких як взуття MarsBoot, розроблене Ліз Чіокайло та Мауріціо Монталті, горщик MусoComposite та транспортні ящики розроблені Ecovative, екологічна лампа та панель Sinewave від Krown під керівництвом Еріка Кларенбека. Тимчасові архітектурні інсталяції також реалізуються дизайнерами, які використовують міцелій, одним із таких прикладів є вежа Ну-Фі від Девіда Бенджаміна з The Living, New York Architects (рис. 1.4), яка була відкрита у виставковому приміщенні МоМА PS1 в Нью-Йорку [21].



А



Б



В



Г

Рис. 1.4 - Світові реалізовані проєкти та дизайнерські рішення на основі грибного міцелію [21]:

А - Вежа Ну-Фі від Девіда Бенджаміна з The Living, New York Architects, відкрита у виставковому приміщенні МоМА PS1 у Нью-Йорку

Б - Взуття MarsBoot, розроблене Ліз Чіокайло та Мауріціо Монталті

В - Пакування MусoComposite та Ecovative

Г - Екологічна лампа та панель Sinewave від Krown під керівництвом Еріка Кларенбека

Окрім міжнародних прикладів, в Україні також активно розвиваються

інноваційні проекти, пов'язані з використанням грибного міцелію. Зокрема, український стартап S.Lab створює екологічне пакування на основі міцелію грибів та конопель [34]. Це пакування є повністю біорозкладним і служить альтернативою пінопласту, що відкриває нові можливості для сталого дизайну й логістики. Розробка отримала міжнародне визнання та була представлена на кліматичній конференції ООН COP29 (рис. 1.5).



Рис. 1.5 - Екологічне пакування з конопель та грибного міцелію, розроблене українським стартапом S.Lab як альтернатива пінопласту [34]

Завдяки своїй пористій структурі, міцеліальні композити також знаходять застосування у виробництві акустичних панелей, хоча комерційні продукти в цій сфері ще перебувають на стадії розробки. Крім того, досліджується потенціал міцелію як фільтраційного матеріалу для очищення води та повітря, а також як носія для клітинної культури в біомедичних дослідженнях завдяки його тривимірній структурі.

Загалом, сучасні застосування біоматеріалів з грибного міцелію демонструють значний прогрес у різних галузях, підкреслюючи екологічні переваги та універсальність цього інноваційного класу матеріалів. Подальші дослідження та комерціалізація цих технологій мають важливе значення для переходу до більш стійкого майбутнього.

1.3 Переваги грибного міцелію як біотехнологічної сировини

Міцелій - вегетативна частина гриба, розташована в субстраті, є щільною мережею тонких ниток - гіф, які зростаються разом в однорідну структуру, діючи як матриця, що зв'язує інші природні субстрати в легкий композитний матеріал. Колонії грибів, що складаються з міцелію, знаходяться в ґрунті та інших субстратах, таких як каміння, пісок тощо [2, 3]. Через міцелій гриб поглинає поживні речовини з навколишнього середовища. Міцелій життєво важливий у наземних і водних екосистемах через його роль у розкладанні рослинного матеріалу. Міцелій у природі може утворювати невеликі або великі колонії грибів. Через міцелій гриб поглинає поживні речовини (вуглеводи, жир, білки, воду) з навколишнього середовища. Це відбувається в два етапи. На першому етапі гіфи виділяють ферменти в джерело їжі. Це розщеплює біологічні полімери на більш дрібні одиниці, такі як мономери. На другому етапі міцелій поглинає ці мономери шляхом полегшеної дифузії та активного транспорту. Оскільки міцелій живиться поживними органічними матеріалами, він перетворює та зв'язує відокремлені частинки в цілісну речовину, діючи як живий клей [1].

Матеріали, пов'язані з міцелієм, – це композити, виготовлені з використанням живого організму, гриба, що виростає на багатому поживними речовинами субстраті, зазвичай на рослинній основі, наприклад, солома, тирса, бавовна тощо [10]. Міцелій являє собою гідрофобну розгалужену мережу, яку розвивають гриби для колонізації субстрату, його деградації та перетравлення поживних речовин. Використання міцелію як живого сполучного для біокомпозитів може створити цікаві властивості недорогих матеріалів. Дійсно, було виявлено, що пов'язані з міцелієм композитні піни або пресовані ламінати мають міцність, протипожежну та акустичні властивості. Композити, пов'язані з міцелієм, виготовлені з видів

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

грибів, таких як *Schizophyllum commune*, *Pleurotus ostreatus* або *Ganoderma lucidum*, знайшли застосування в упаковці, моді, тепло- та звукоізоляції та архітектурі [30].

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

2 ХАРАКТЕРИСТИКА ГОТОВОГО ПРОДУКТУ, СИРОВИНИ, МАТЕРІАЛІВ, НАПІВПРОДУКТІВ

2.1 Характеристика готового продукту

Готовий продукт - біокомпозитний матеріал на основі міцелію *Pleurotus ostreatus*, культивованого на органічному субстраті (тирса, пшеничні висівки, гіпс, CaCO_3), є інноваційним рішенням для тепло- та шумоізоляції, пакувальної промисловості та дизайну. Нижче наведено основні характеристики продукту, отриманого в результаті розробленого технологічного процесу, адаптованого до промислових умов.

Фізико-механічні характеристики.

Густина: близько 200 кг/м³. Визначається шляхом зважування зразків (ZwickRoell Z010) та вимірювання об'єму стандартних плит (1 м × 1 м × 0,05 м). Легка структура забезпечує зручність транспортування та монтажу.

Механічна міцність на стиск: $\geq 0,5$ МПа. Перевіряється на стадії ТП 4.4 за допомогою тестера ZwickRoell Z010. Відповідає вимогам для ізоляційних матеріалів у будівництві.

Товщина: 5 см (50 мм). Стандартний розмір плити, сформованої на стадії ТП 4.1 (прес Langzauner LZT-OK), оптимальний для тепло- та звукоізоляційних застосувань.

Площа однієї плити: 1 м². Розміри 1 м × 1 м, що полегшує розрахунок і використання в промислових і побутових проєктах.

Вологість: <10 %. Досягнуто на стадії ТП 4.3 (сушіння в Memmert UFR 800 при 60–80 °С, 12–24 год), що гарантує стабільність і запобігає гниттю.

Однорідність: Відсутність тріщин, дефектів, видимих неоднорідностей. Контролюється візуально та за допомогою мікроскопії (Leica DM750) на стадії ТП 4.4.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Теплоізоляційні властивості.

Коефіцієнт теплопровідності (λ): $\sim 0,05\text{--}0,07$ Вт/(м·К). Вимірюється за стандартом ISO 8301. Низьке значення порівняно з пінополістиролом ($0,03\text{--}0,04$ Вт/(м·К)) підтверджує ефективність для теплоізоляції стін, підлог, дахів.

Термостійкість: Стабільність при температурах від -20 °С до $+80$ °С. Забезпечено термостабілізацією (ТП 4.3), що дозволяє використання в різних кліматичних умовах.

Звукоізоляційні властивості.

Коефіцієнт звукопоглинання (α): $0,6\text{--}0,8$ (при частотах $500\text{--}2000$ Гц). Визначається за стандартом ISO 354. Пориста структура, сформована міцелієм, ефективно поглинає звук, що робить продукт придатним для акустичних панелей.

Індекс зниження шуму (R_w): $30\text{--}35$ дБ. Перевіряється для плити товщиною 5 см, що відповідає вимогам для внутрішніх перегородок і студій.

Екологічні характеристики.

Біорозкладність: 100% . Матеріал повністю розкладається в ґрунті за $30\text{--}60$ днів, не залишаючи токсичних залишків, на відміну від синтетичних аналогів (пінопласт, пластик).

Сировина: Відходи лісопереробки (80% тирса) та агропромисловості (15% висівки). Використання вторинної сировини зменшує навантаження на сміттєзвалища та підтримує принципи циркулярної економіки.

Відсутність токсичності: Не виділяє шкідливих речовин. Підтверджується відсутністю летких органічних сполук (VOC) після термостабілізації (ТП 4.3).

Хімічні та біологічні характеристики. Склад:

Органічна основа: міцелій *Pleurotus ostreatus*, зв'язаний із субстратом (тирса, висівки). Додатки: 5% гіпс, 1% CaCO_3 для стабільності та регулювання рН.

Стійкість до контамінації: Відсутність контамінації. Забезпечується

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стерилізацією (ТП 3.2, 121 °С, 1,1 атм) та контролем на стадіях ТП 2.4, ТП 3.3, ТП 4.4 (мікроскопія Zeiss Stemi 508).

рН поверхні: 6,5–7,0. Нейтральне значення, безпечне для контакту та використання.

Експлуатаційні характеристики.

Застосування:

1. Теплоізоляція: стіни, дахи, підлоги в будівництві.
2. Звукоізоляція: акустичні панелі для студій, офісів, житлових приміщень.

3. Пакування: екологічна альтернатива пінопласту для захисту товарів.

4. Дизайн: декоративні панелі, меблі.

Довговічність: Стійкість до деградації за умов вологості <10 % і температури -20 °С до +80 °С.

Переваги та відповідність стандартам.

Переваги:

1. Екологічність: біорозкладний, виготовлений із відходів.
2. Енергоефективність: низька теплопровідність, зменшення витрат на опалення.
3. Легкість: мала вага спрощує монтаж.
4. Економічність: використання дешевої сировини знижує собівартість.

Відповідність стандартам: ISO 8301 (теплопровідність), ISO 354 (звукопоглинання), ISO 14001 (екологічний менеджмент).

Продукт відповідає вимогам ЄС до екологічних будівельних матеріалів.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2 Характеристика сировини

Для виробництва біокомпозитного матеріалу на основі грибного міцелію *Pleurotus ostreatus* використовується комбінація органічних і мінеральних матеріалів, які забезпечують оптимальні умови для росту міцелію та формування міцної структури кінцевого продукту. Основна сировина включає відходи лісопереробної та агропромислової промисловості, а також мінеральні добавки для стабілізації субстрату. У табл. 2.1 наведено детальну характеристику сировини, її відповідність нормативно-технічній документації (НТД), показники якості, які підлягають обов'язковій перевірці, та призначення у технологічному процесі.

1. Тирса листяних порід (дуб, бук, береза) є основним компонентом субстрату, що становить 80% від загальної маси. Вона виступає джерелом лігноцелюлози, яку міцелій *Pleurotus ostreatus* розщеплює за допомогою ферментів (лакази, целюлази). Тирса забезпечує структурну основу біокомпозиту, сприяючи формуванню пористої та міцної матриці.

Категорія та номер НТД: ДСТУ 2034-92 Відходи деревинні. Загальні технічні умови.

Показники НТД, обов'язкові для перевірки:

Розмір частинок: 1–5 мм (вимірюється ситовим аналізом).

Вологість: 8–12% до запарювання (вимірюється вологоміром РСЕ-ММК 20).

Відсутність сторонніх домішок (каміння, метал, кора) – візуальний контроль.

pH: 6,0–7,0 (вимірюється рН-метром).

Примітка (призначення у технології): Основне джерело вуглецю та структурна основа субстрату. Забезпечує пористість і міцність біокомпозиту.

2. Пшеничні висівки є джерелом поживних речовин (вуглеводи, білки) для росту міцелію, становлять 15% субстрату. Вони сприяють швидкій

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

колонізації субстрату міцелієм завдяки високому вмісту доступних вуглеводів.

Категорія та номер НТД: ДСТУ 3016-95 Висівки кормові пшеничні і житні. Технічні умови.

Показники НТД, обов'язкові для перевірки:

Вологість: $\leq 14\%$ (вимірюється вологоміром).

Зольність: $\leq 6\%$ (визначається методом спалювання).

Відсутність контамінації (цвіль, бактерії) – мікробіологічний аналіз.

Розмір частинок: 0,5–2 мм (ситовий аналіз).

Примітка (призначення у технології): Джерело поживних речовин для росту міцелію, стимуляція ферментативної активності.

3. Кавове лушпиння використовується як додаткове джерело органічної речовини та поживних компонентів, становить до 5% субстрату. Воно підвищує поживну цінність субстрату та сприяє біодеградації.

Категорія та номер НТД: Відсутній специфічний стандарт, використовується внутрішній стандарт підприємства (СОП «Контроль якості сировини»).

Показники НТД, обов'язкові для перевірки:

Вологість: $\leq 10\%$ (вимірюється вологоміром).

Відсутність контамінації (мікробіологічний аналіз).

pH: 5,5–6,5 (вимірюється pH-метром).

Примітка (призначення у технології): Додаткове джерело вуглецю та органічних сполук, підвищення поживної цінності субстрату.

4. Гіпс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) використовується як мінеральна добавка (5% від маси субстрату) для стабілізації структури субстрату та регулювання його вологості.

Категорія та номер НТД: ДСТУ Б В.2.7-82:2010 Будівельні матеріали. В'язучі гіпсові.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Показники НТД, обов'язкові для перевірки:

Чистота: $\geq 95\%$ (хімічний аналіз).

Розмір частинок: $\leq 0,2$ мм (ситовий аналіз).

Відсутність домішок (візуальний контроль).

Примітка (призначення у технології): Стабілізація структури субстрату, регулювання вологості, підтримка оптимального рівня рН.

5. Карбонат кальцію (CaCO_3) додається в кількості 1% для регулювання рН субстрату та забезпечення оптимальних умов для росту міцелію.

Категорія та номер НТД: ГОСТ 4530-76, ГОСТ 8253-79.

Показники НТД, обов'язкові для перевірки:

Чистота: $\geq 98\%$ (хімічний аналіз).

Розмір частинок: $\leq 0,1$ мм (ситовий аналіз).

рН у водному розчині: 8,5–9,5 (вимірюється рН-метром).

Примітка (призначення у технології): Регулювання рН субстрату до 6,5–7,0, підтримка росту міцелію.

6. Міцелій *Pleurotus ostreatus* (штам ІВК-453) є основним біотехнологічним агентом, який зв'язує субстрат у міцну композитну структуру. Використовується у вигляді робочої культури, отриманої на солодовому агарі.

Категорія та номер НТД: Внутрішній стандарт підприємства (СОП «Контроль якості міцелію»).

Показники НТД, обов'язкові для перевірки:

Відсутність контамінації (мікробіологічний контроль).

Наявність пошукового міцелію, пряжок, анастомозів (мікроскопічний аналіз).

Життєздатність: $\geq 95\%$ (тестування на агаровому середовищі).

Примітка (призначення у технології): Біотехнологічний агент, що забезпечує зв'язування субстрату та формування біокомпозиту.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1

Характеристика сировини і матеріалів

№	Найменування	Категорія та номер НТД	Показники НТД, обов'язкові для перевірки	Примітка (призначення у технології)
1	Тирса листяних порід	ДСТУ 2034-92	Розмір частинок: 1–5 мм, вологість: 8–12%, рН: 6,0–7,0, без домішок	Основне джерело вуглецю, структурна основа біокомпозиту
2	Пшеничні висівки	ДСТУ 3016-95	Вологість: $\leq 14\%$, зольність: $\leq 6\%$, розмір: 0,5–2 мм, без контамінації	Джерело поживних речовин, стимуляція росту міцелію
3	Кавове лушпиння	СОП "Контроль якості сировини"	Вологість: $\leq 10\%$, рН: 5,5–6,5, без контамінації	Додаткове джерело вуглецю, підвищення поживної цінності
4	Гіпс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	ДСТУ Б В.2.7-82:2010	Чистота: $\geq 95\%$, розмір частинок: $\leq 0,2$ мм, без домішок	Стабілізація структури, регулювання вологості
5	Карбонат кальцію (CaCO_3)	ГОСТ 4530-76, ГОСТ 8253-79	Чистота: $\geq 98\%$, розмір частинок: $\leq 0,1$ мм, рН: 8,5–9,5	Регулювання рН субстрату, підтримка росту міцелію
6	Міцелій <i>Pleurotus ostreatus</i>	СОП "Контроль якості міцелію"	Відсутність контамінації, життєздатність: $\geq 95\%$, морфологія норма	Біотехнологічний агент, зв'язування субстрату в біокомпозит

2.3 Характеристика біологічних об'єктів

На етапі лабораторного дослідження для отримання біокомпозитного матеріалу вивчали потенціал трьох видів ксилотрофних базидіальних грибів *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus citrinopileatus*, *Lentinula edode*.

У дослідженні використовували виробничі штами:

- *Pleurotus ostreatus* IBK-453, отримані з колекції культур шапинкових грибів Інституту ботаніки ім.М. Г. Холодного НАН України (рис. 2.1, А)
- *Pleurotus citrinopileatus*, міцелій на шпильках (фірма-виробник Planto, Польща) (рис. 2.1, Б)
- *Lentinula edode* 370, зерновий міцелій (фірма-виробник MyceliumTrade, Україна) (рис. 2.1, В).



Рис. 2.1 – Культури грибів, що використовувались у дослідженнях:

А - *Pleurotus ostreatus*, міцелій на сусло агарі, Б - *Pleurotus citrinopileatus*, міцелій на шпильках, В - *Lentinula edode*, зерновий міцелій

Глива звичайна або устрична *Pleurotus ostreatus* IBK-453, належить до домену *Eukaryota*, царства *Fungi*, відділу *Basidiomycota*, класу *Agaricomycetes*, порядку *Agaricales*, родини *Pleurotaceae*, роду *Pleurotus* та виду глива звичайна[18].

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Має розвинений міцелій білого кольору зображений на рис. 2.2, щільної або повстяної консистенції. Є сапротрофом, що бере участь у розкладі деревини та целюлозовмісної сировини [23]. Гриб має яйцеподібні або віялоподібні плодові тіла з характерним попелястим забарвленням (від світло-сірого до темно-сірого), які формуються пучками. Пластинки білі, густі, спускаються по ніжці. Ніжка коротка, ексцентрична або бічна [26].

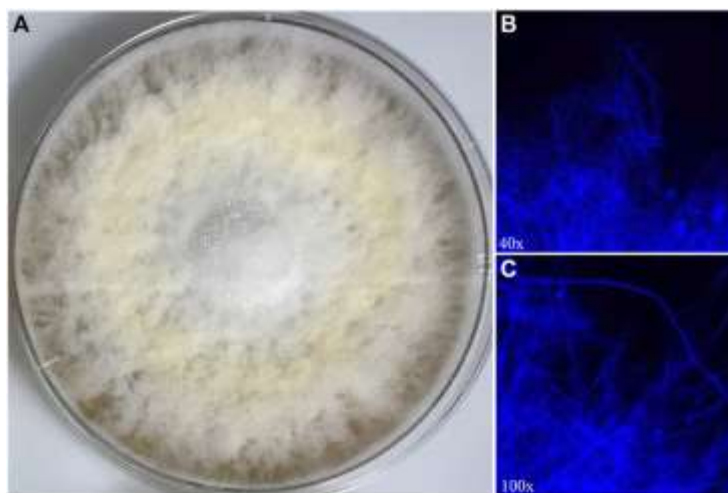


Рис. 2.2 – Ріст міцелію *P. ostreatus* на агаровій пластині з солодовим екстрактом після 7 днів інкубації при 22 °C [27]

Власні дослідження мікроморфології вегетативного міцелію *P. ostreatus* на сусло-агарі показало наявність звичайного товстого міцелію та тонкого пошукового міцелію. Звичайний міцелій без пряжек, формує групи тісно наближених гіф – тяжи. Тонкий міцелій часто утворює анастомози зі звичайним міцелієм (Рис. 2.3).



Рис. 2.3 - Мікроскопія міцелію *P. ostreatus*

P. ostreatus - один з найперспективніших представників роду для промислового культивування. Має високу швидкість росту та здатність до колонізації широкого спектру субстратів (тирса, солома, лущиння соняшнику). Вид характеризується толерантністю до різних умов середовища, не потребує стерильного середовища для культивування. Активно застосовується в біотехнологіях: у виробництві харчових продуктів [19, 29], біоконверсії відходів, біоочищенні, синтезі ферментів і біоактивних речовин.

Другий об'єкт дослідження глива лимонно-жовта *Pleurotus citrinopileatus*. Систематичне положення наступне: домен *Eukaryota*, царство *Fungi*, відділ *Basidiomycota*, клас *Agaricomycetes*, порядок *Agaricales*, родина *Pleurotaceae*, рід *Pleurotus* та вид *Pleurotus citrinopileatus* [17].

Pleurotus citrinopileatus - формує добре розвинений міцелій білого або кремового кольору, повстяної чи вато-подібної консистенції. Є сапротрофом, що бере участь у мінералізації органічної речовини, зокрема деревини та лігноцелюлозовмісної сировини. Плодові тіла цього виду утворюються у вигляді яскраво-жовтих віялоподібних шапинок, які розміщуються щільними пучками. Шапинка має тонку, ламку структуру з насиченим жовтим забарвленням, що іноді знебарвлюється до світло-жовтого у центральній частині. Пластинки світлі, білі або жовтуваті, густі, спускаються по ніжці. Ніжка коротка, ексцентрична, іноді дещо зігнута або бічна.

Pleurotus citrinopileatus є одним із перспективних видів для культивування, зважаючи на швидке проростання міцелію, високу продуктивність плодових тіл та привабливі органолептичні властивості. Цей гриб вирізняється високою здатністю до колонізації різноманітних рослинних субстратів, серед яких найбільш ефективними є солома, тирса, кукурудзяні залишки та лущиння соняшнику. Вид демонструє толерантність до широкого діапазону умов середовища, не потребує стерильності при вирощуванні, що значно спрощує його культивування у

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

промислових і фермерських масштабах (рис. 2.4).

Міцелій *Pleurotus citrinopileatus* проявляє добре виражену ферментативну активність у відношенні до полімерних сполук, таких як лігнін, целюлоза та геміцелюлоза, а також має потенціал до біотрансформації токсичних органічних речовин, зокрема фенольних сполук. Крім того, гриб продукує низку біоактивних метаболітів з антиоксидантними, антимікробними та імуномодуючими властивостями, що розширює сферу його застосування в екобіотехнологіях, зокрема у виробництві функціональних продуктів харчування, біоочищенні та переробці органічних відходів [24].



Рис. 2.4 – Етапи культивування *Pleurotus citrinopileatus* [13]:

a - розвиток міцелію на агаризованому середовищі; b - підготовка зернового інокуляту; c - повністю колонізований зерновий інокулят; d - підготовка субстрату; e - інокуляція субстрату; f - інкубація; g - поява примордіїв; h - формування молодих плодових тіл; i - зрілі плодові тіла.

Гриби роду *Pleurotus* є аеробними мезофільними мікроорганізмами,

оптимальна температура росту міцелію становить 24–28 °С, нижній температурний поріг - 10 °С, а верхній - 32–33 °С. Оптимальне значення рН середовища для росту знаходиться в межах 5,5–6,5. Найкращі умови для формування плодових тіл досягаються при температурі 18–22 °С, відносній вологості повітря 85–90% та світловому режимі 12 годин світла і 12 годин темряви.

Як основні джерела вуглецю гриби ефективно засвоюють целюлозні та лігноцелюлозні сполуки, а також крохмаловмісні агровідходи. Здатні продукувати широкий спектр ферментів, включаючи лакказу, целюлазу, ксиланазу, β -глюкозидазу та протеїнази. Для вирощування міцелію у рідкому середовищі використовували поживний розчин зі складом: глюкоза — 20,0 г/л, пептон — 5,0 г/л, K_2HPO_4 — 1,0 г/л, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 0,5 г/л, екстракт дріжджів — 1,0 г/л, при рН 6,2. Максимальний вихід біомаси досягається на 6–7 добу культивування та становить близько 9,2–10,0 г/л у перерахунку на суху речовину.

Третій штам *Lentinula edode* 370. Систематично він класифікується як: домен *Eukaryota*, царство *Fungi*, відділ *Basidiomycota*, клас *Agaricomycetes*, порядок *Agaricales*, родина *Omphalotaceae*, рід *Lentinula* та вид *Lentinula edode* [16].

Є сапротрофом, що формує добре розвинений міцелій білого або кремового кольору, повстяної чи вато-подібної консистенції. Цей вид бере участь у розкладанні деревини та лігноцелюлозовмісної сировини, переважно листяних порід, таких як дуб, бук і каштан [15]. Плодові тіла *Lentinula edode* утворюються у вигляді капелюшків середнього розміру діаметром 5–15 (іноді до 20) см, з опуклою або подушкоподібною формою. Поверхня капелюшка гладка або злегка зморшкувата, має забарвлення від світло-коричневого до темно-коричневого з рудуватими або жовтуватими відтінками, що варіюють залежно від віку гриба та умов середовища. Пластинки під капелюшком густі, приростаючі до ніжки, мають світло-кремовий або блідо-коричневий

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

колір. Ніжка циліндричної форми, міцна, завдовжки 4–10 см, з волокнистою поверхнею, білого або коричневого забарвлення, іноді з темними плямами або кільцями [30].

Lentinula edode є одним із найцінніших їстівних грибів, широко культивованих у світі завдяки своїм гастрономічним та лікарським властивостям. Міцелій гриба характеризується високою активністю ферментних систем [23], що забезпечують розклад лігніну, целюлози та інших полімерів рослинної клітковини. Оптимальна температура росту міцелію становить 20–25 °С, гриб здатний розвиватися в діапазоні 10–30 °С. *Lentinula edodes* є аеробним мезофільним організмом, що потребує хорошої вентиляції при культивуванні (рис. 2.5). Розмножується за допомогою спор овальної форми розміром 7–10 × 3–5 мкм, які забезпечують його розповсюдження в природних умовах.

Гриб здатний колонізувати різноманітні деревні субстрати з високим вмістом лігніну, проявляючи при цьому ефективну ферментативну активність, зокрема лакказу, пероксидази, целюлази та інших гідролітичних ферментів. *Lentinula edode* продукує біоактивні сполуки, зокрема полісахариди (лентинан), які мають імуномодулюючі, протипухлинні та антиоксидантні властивості. Цей гриб широко застосовується у медичній, фармакологічній та харчовій промисловості, а також розглядається як перспективний об'єкт для біотехнологічного використання у переробці рослинних відходів і виробництві функціональних продуктів [31].

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

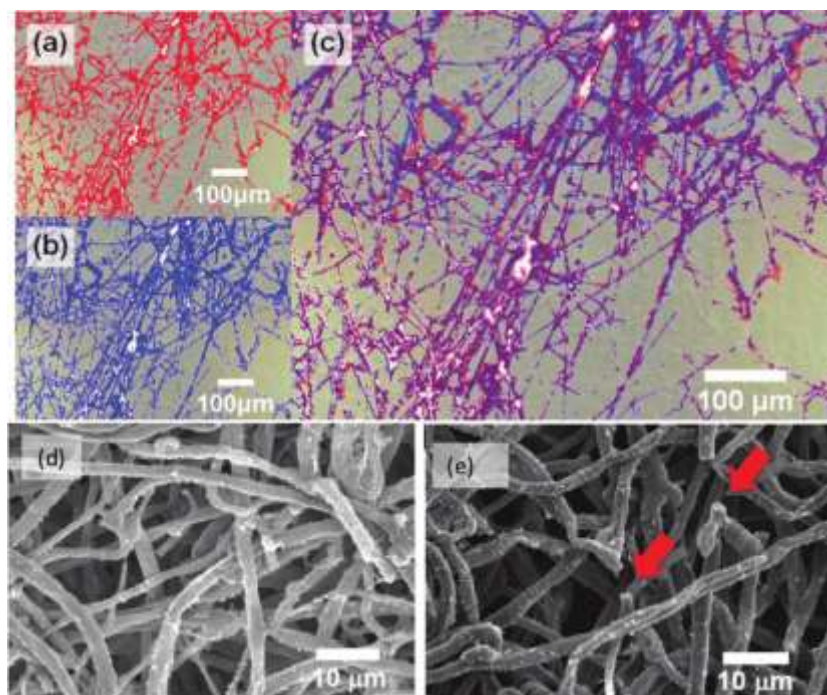


Рис. 2.5 – Мікроскопічні зображення гіф *Lentinula edode* [21]:

- (а) - Зображення гіф до обробки імпульсним електричним полем.
- (б) - Зображення гіф після обробки імпульсним електричним полем (5 кВ/см, ширина імпульсу 100 нс, 500 повторень).
- (с) - Накладене зображення (а) та (б), що демонструє зміни в морфології гіф після обробки.
- (д) - SEM-зображення гіф до обробки імпульсними електричними напругами.
- (е) - SEM-зображення гіф після обробки імпульсними електричними напругами (10 кВ). Червоними стрілками вказано фрагментацію гіф.

В результаті проведених досліджень для подальшої роботи було обрано *Pleurotus ostreatus*, використання якого у отриманні біоматеріалу було економічно та технологічно обґрунтовано.

2.4 Біосинтез цільового продукту

Метаболізм грибів *Pleurotus ostreatus* є складним процесом, який включає анаболічні та катаболічні реакції, спрямовані на забезпечення енергії, синтез біомолекул і підтримання життєдіяльності організму. Ці гриби належать до сапротрофів, що розкладають органічний матеріал, зокрема лігноцелюлозу, і мають унікальні метаболічні особливості, які дозволяють їм

ефективно використовувати субстрати, такі як деревина, солома чи сільськогосподарські відходи [25].

2.4.1. Загальний огляд метаболізму

Метаболізм грибів *Pleurotus ostreatus* поділяється на два основні процеси:

- Катаболізм: розщеплення складних органічних молекул (вуглеводів, білків, ліпідів) до простіших сполук для отримання енергії (у формі АТФ) і метаболічних попередників.
- Анаболізм: синтез складних молекул (білків, полісахаридів, ліпідів) з простіших сполук для росту, розвитку та репродукції.

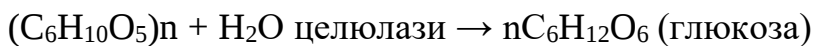
2.4.2. Катаболізм у *Pleurotus ostreatus*

Катаболічні процеси в *Pleurotus ostreatus* спрямовані на розщеплення складних органічних субстратів, таких як целюлоза, геміцелюлоза, лігнін, а також білки та ліпіди, які містяться в рослинних залишках. Основні катаболічні шляхи включають:

1. Розщеплення лігноцелюлози:

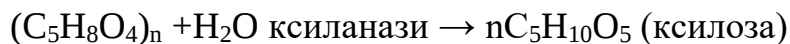
Pleurotus ostreatus є білим гнильним грибом, здатним ефективно розкласти лігноцелюлозу — комплекс целюлози, геміцелюлози та лігніну.

Целюлоза розщеплюється за допомогою комплексу целюлаз (ендоглюканази, екзоглюканази, β -глюкозидази).



Глюкоза, що утворюється, надходить у гліколіз для подальшого катаболізму.

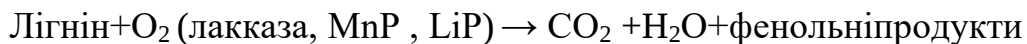
Геміцелюлоза розщеплюється ксиланазами, маннаназами та іншими гідролазами до моносахаридів (ксилоза, маноза, галактоза).



Ксилоза може метаболізуватися через пентозофосфатний шлях.

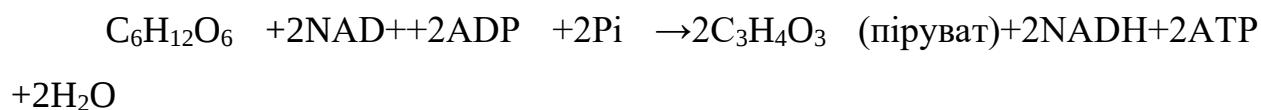
					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

Лігнін розкладається за допомогою оксидативних ферментів, таких як лаккази, марганець-залежні пероксидази (MnP) і лігнін-пероксидази (LiP). Лігнін розщеплюється до низькомолекулярних фенольних сполук, які можуть частково метаболізуватися або виводитися.

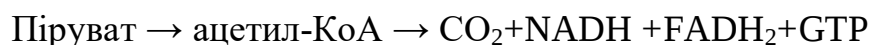


2. Гліколіз і цикл Кребса

Глюкоза, отримана з целюлози, та інші моносахариди надходять у гліколіз:



Піруват надходить у мітохондрії, де окислюється в циклі Кребса (цикл трикарбонових кислот):



NADH і FADH₂ беруть участь у дихальному ланцюгу, де через окисне фосфорилування синтезується АТФ.

Для кращого розуміння складних метаболічних перетворень вуглеводів, які відбуваються на цьому етапі, розглянемо детальну схему ключових реакцій. Ця схема ілюструє (рис 2.6), як *P. ostreatus* перетворює різні вуглеводи, такі як глюкоза, фруктоза, манноза та галактоза, у проміжні продукти гліколізу, а також показує зв'язки з синтезом інших важливих сполук, таких як трегалоза та хітин.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

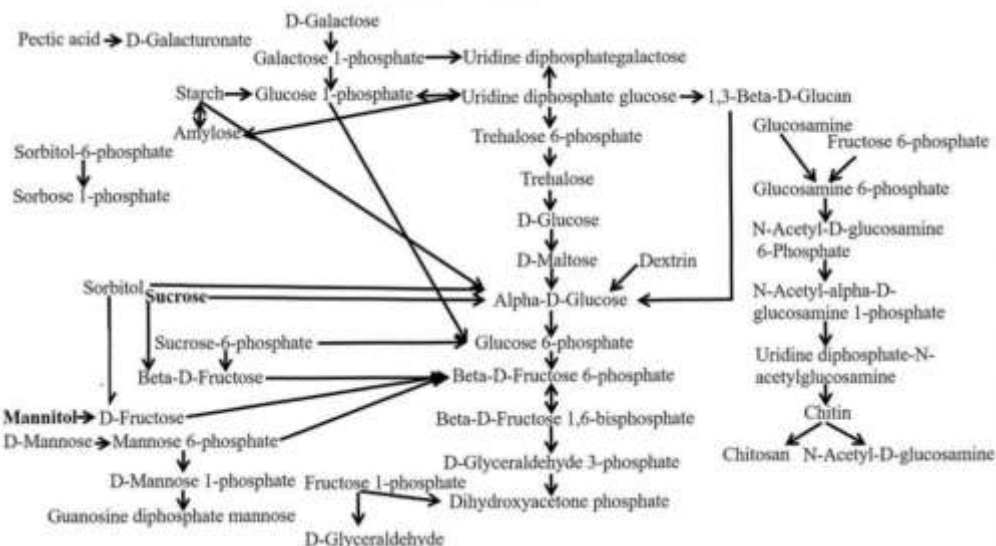


Рис. 2.6 – Метаболічні шляхи перетворення вуглеводів у *Pleurotus ostreatus*: від глюкози до проміжних продуктів гліколізу [11]

3. Розщеплення білків

Білки субстрату розщеплюються позаклітинними протеазами до пептидів і амінокислот. Амінокислоти дезамінуються, утворюючи кетокислоти, які можуть надходити в цикл Кребса (наприклад, через глутамат або аспартат).



4. Розщеплення ліпідів

Ліпіди субстрату гідролізуються ліпазами до гліцерину та жирних кислот. Жирні кислоти окислюються в β -окисленні, утворюючи ацетил-КоА:



Гліцерин метаболізується через гліколіз (перетворюється на гліцераальдегід-3-фосфат).

2.4.3. Анаболізм у *Pleurotus ostreatus*

Анаболічні процеси в *Pleurotus ostreatus* спрямовані на синтез біомолекул, необхідних для росту міцелію, утворення плодових тіл, накопичення запасних речовин і синтезу вторинних метаболітів. Основні

анаболічні шляхи:

1. Синтез полісахаридів

Хітин синтезується з глюкози через глюкозамін-6-фосфат:

Глюкоза → фруктоза-6-фосфат → глюкозамін-6-фосфат → хітин

β-глюкани (наприклад, β-1,3-глюкани) синтезуються з UDP-глюкози за участю глюкансинтаз.

Запасні полісахариди (глікоген) синтезуються для накопичення енергії:

Глюкоза-1-фосфат+UTP → UDP-глюкоза → глікоген

2. Синтез ліпідів

Ліпіди (фосфоліпіди, стероли) синтезуються для мембран і запасних речовин. Ацетил-КоА є основним попередником для синтезу жирних кислот:

Ацетил-КоА+малонил-КоА синтазажирнихкислот → жирні кислоти

Ергостерол, ключовий стерол грибних мембран, синтезується через мевалонатний шлях.

Pleurotus ostreatus синтезує сфінголіпіди, які є ключовими компонентами клітинних мембран і відіграють роль у сигнальних шляхах. Біосинтез сфінголіпідів починається з конденсації пальмітил-КоА та L-серину з утворенням 3-дегідросфінганіну, який потім перетворюється на сфінганін, фітосфінгозин та інші похідні. Для детального розуміння цього процесу на рис. 2.7 наведена схема, яка ілюструє основні етапи синтезу сфінголіпідів.

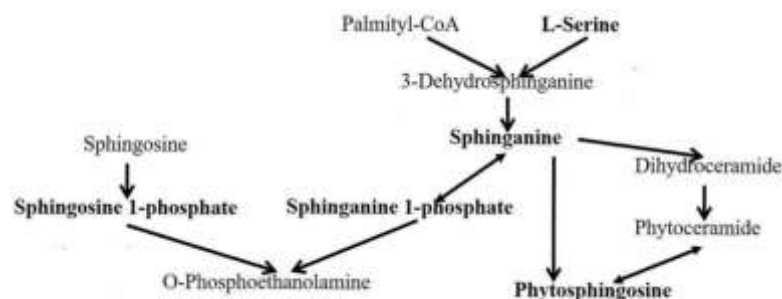


Рис. 2.7 – Етапи біосинтезу сфінголіпідів: від пальмітил-КоА до фітосфінгозину та похідних [11]

3. Синтез білків

Білки необхідні для ферментативної активності, структурних компонентів і регуляції метаболізму. Важливим аспектом синтезу білків є біосинтез амінокислот, які *P. ostreatus* продукує з метаболічних проміжних продуктів, таких як оксалоацетат і α -кетоглутарат. Цей процес включає складні метаболічні шляхи, що пов'язують амінокислоти з вуглеводним і ліпідним метаболізмом. Для кращого розуміння цих шляхів розглянемо схему, яка ілюструє синтез амінокислот у *P. ostreatus*, включаючи перетворення серину, треоніну, триптофану, фенілаланіну та інших амінокислот, а також їх зв'язок із циклом Кребса (рис. 2.8).

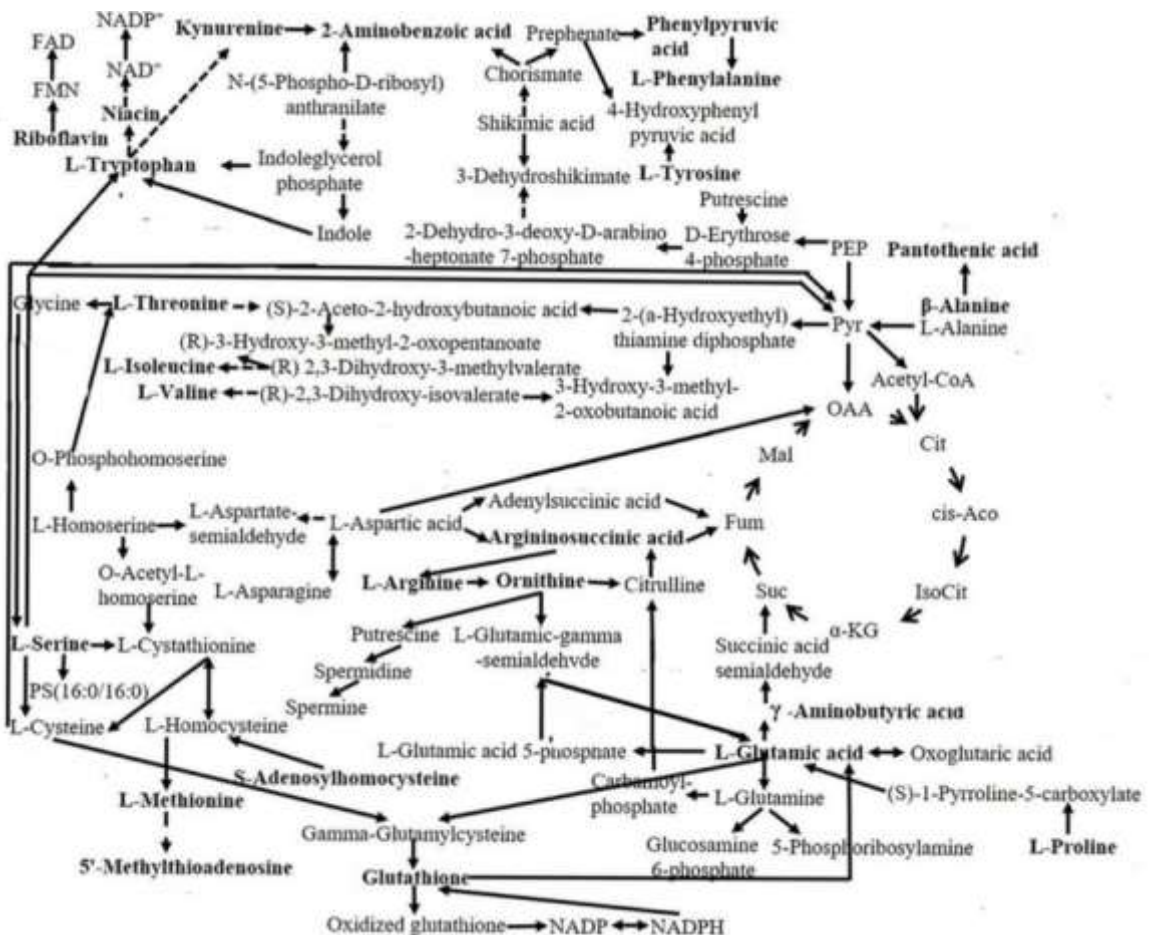


Рис. 2.8 – Метаболічні шляхи біосинтезу амінокислот у *Pleurotus ostreatus*: від серину до фенілаланіну, тирозину та проліну [11]

4. Синтез нуклеїнових кислот

Вторинні метаболіти, такі як фенольні сполуки, терпеноїди та алкалоїди, синтезуються через шикіматний шлях:

Фосфоенолпіруват + еритрозо-4-фосфат → шикімат → фенольні сполуки

Вони відіграють антиоксидантні, антимікробні та сигнальні функції. Нуклеїнові кислоти синтезуються з рибозо-5-фосфату (з пентозофосфатного шляху) та амінокислот, таких як аспартат і гліцин:

Рибозо-5-фосфат + аспартат + гліцин + АТФ → нуклеотиди

Цей процес включає синтез пуринових (GMP, AMP) і піримідинових (CMP, UMP) нуклеотидів, а також їх взаємоперетворення та розпад, що ілюструється на схемі метаболічного шляху нуклеотидів (рис. 2.9).

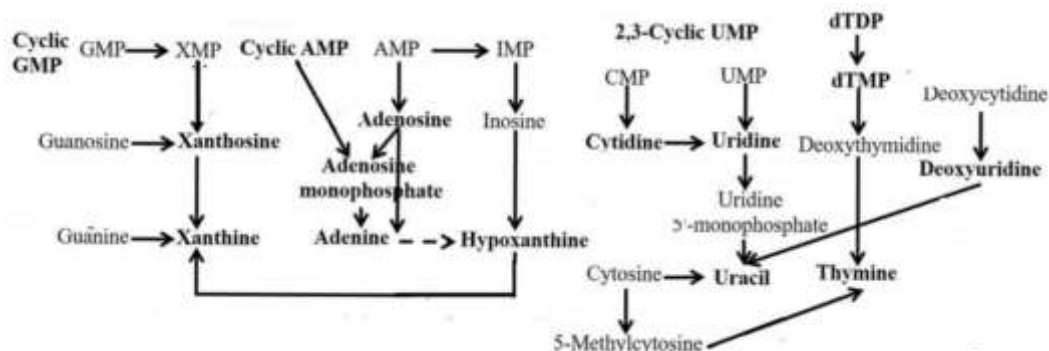


Рис. 2.9 – Схема метаболічного шляху пуринових і піримідинових нуклеотидів [11]

Ця схема демонструє ключові етапи біосинтезу та метаболізму нуклеотидів, які є основою для синтезу ДНК і РНК, необхідних для росту та репродукції гриба.

Таким чином, метаболізм *Pleurotus ostreatus* характеризується складною взаємодією катаболічних і анаболічних процесів, які дозволяють грибу ефективно розкладати лігноцелюлозу, отримувати енергію та синтезувати необхідні біомолекули. Катаболізм забезпечує енергію через гліколіз, цикл Кребса та окислення субстратів, тоді як анаболізм підтримує

ріст і синтез структурних і функціональних молекул. Унікальна здатність гриба розкласти лігнін і целюлозу робить його важливим об'єктом для біотехнологічних і екологічних застосувань та перспективним об'єктом цієї роботи.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок матеріального балансу

Матеріальний баланс відображає рух сировини, напівпродуктів і готової продукції через усі стадії технологічного процесу з урахуванням втрат (5 % на кожній стадії) [9]. Для розрахунку враховуємо параметри промислового процесу, описані в технології великомасштабного виробництва, і визначаємо вихід готового біокомпозитного матеріалу в квадратних метрах (m^2) за одну серію. Припускаємо, що одна серія базується на максимальній продуктивності обладнання, а кінцевий продукт — це біокомпозитні плити стандартного розміру (наприклад, 1 м х 1 м х 0,05 м, тобто товщина 5 см, що типово для тепло- та шумоізоляційних матеріалів).

Для розрахунку матеріального балансу для однієї серії виробництва біокомпозитного матеріалу використовуємо наступні дані:

1. Склад субстрату (з ТП 3.1): Тирса листяних порід: 80 %, пшеничні висівки: 15 %, гіпс: 5 %, $CaCO_3$: 1 % (додається до маси субстрату), вологість субстрату: 70 %.

2. Продуктивність обладнання, яке підібрано для промислового виробництва:

Промисловий запарювач (Satrise Mushroom Equipment): 5 т/год.

Змішувач (Hobart Planetary Mixer): об'єм 500 л, що дозволяє обробляти певну масу субстрату за цикл.

Автоматизована система інокуляції (Bühler Grain Mixer): 500 кг/год.

Форми та прес (Langzauner LZT-OK): платформа 2 м х 1,5 м, тиск до 1000 кН.

3. Втрати: 5 % на кожній стадії (ДР 1.4, ТП 3.1, ТП 3.2, ТП 3.3, ТП 3.4, ТП 4.1, ТП 4.3, ТП 4.4).

4. Густина біокомпозиту: Припускаємо, що густина готового

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

висушеного біокомпозиту становить близько 2 г/см³.

5. Розмір партії: Одна серія визначається як максимальна кількість субстрату, яку може обробити запарювач за 1 годину (5 т), з урахуванням подальших обмежень обладнання.

6. Геометрія продукту: Готовий біокомпозит формується у плити 1 м х 1 м х 0,05 м (площа 1 м², об'єм 0,05 м³ на плиту).

Етапи розрахунку матеріального балансу

1. ДР 1.4 Підготовка технологічних матеріалів

Вхід: Початкова маса сировини для однієї серії = 5 т (5000 кг), продуктивність запарювача.

Склад:

Тирса: 80 % = 5000 кг × 0,8 = 4000 кг.

Висівки: 15 % = 5000 кг × 0,15 = 750 кг.

Гіпс: 5 % = 5000 кг × 0,05 = 250 кг.

CaCO₃: 1 % = 5000 кг × 0,01 = 50 кг.

Вологість 70 %: Вода = 5000 кг × 0,7 = 3500 кг; Суха речовина = 5000 кг × 0,3 = 1500 кг.

Загальна маса: 5000 кг (3500 кг вода + 1500 кг суха речовина).

Втрати: 5 % = 5000 кг × 0,05 = 250 кг.

Вихід: 5000 кг - 250 кг = 4750 кг (вода: 3500 кг × 0,95 = 3325 кг; суха речовина: 1500 кг × 0,95 = 1425 кг).

2. ТП 3.1 Підготовка субстрату

Вхід: 4750 кг.

Процес: Запарювання при 100 °С, змішування компонентів, вологість 70 % підтримується.

Втрати: 5 % = 4750 кг × 0,05 = 237,5 кг.

Вихід: 4750 кг - 237,5 кг = 4512,5 кг (вода: 3325 кг × 0,95 = 3158,75 кг; суха речовина: 1425 кг × 0,95 = 1353,75 кг).

3. ТП 3.2 Стерилізація субстрату

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вхід: 4512,5 кг.

Процес: Стерилізація в автоклаві (Systec НХ-1000) при 121 °С, 1,1 атм, 40 хв.

Втрати: 5 % = $4512,5 \text{ кг} \times 0,05 = 225,63 \text{ кг}$.

Вихід: $4512,5 \text{ кг} - 225,63 \text{ кг} = 4286,87 \text{ кг}$ (вода: $3158,75 \text{ кг} \times 0,95 = 3000,81 \text{ кг}$; суха речовина: $1353,75 \text{ кг} \times 0,95 = 1286,06 \text{ кг}$).

4. ТП 3.3 Інокуляція субстрату

Вхід: 4286,87 кг субстрату.

Додавання міцелію: Кількість міцелію = 3–5 % від маси субстрату, беремо 4 % = $4286,87 \text{ кг} \times 0,04 = 171,47 \text{ кг}$.

Загальна маса: $4286,87 \text{ кг} + 171,47 \text{ кг} = 4458,34 \text{ кг}$.

Втрати: 5 % = $4458,34 \text{ кг} \times 0,05 = 222,92 \text{ кг}$.

Вихід: $4458,34 \text{ кг} - 222,92 \text{ кг} = 4235,42 \text{ кг}$ (вода: $3000,81 \text{ кг} \times 0,95 = 2850,77 \text{ кг}$; суха речовина: $1286,06 \text{ кг} + 171,47 \text{ кг} = 1457,53 \text{ кг}$; після втрат суха речовина: $1457,53 \text{ кг} \times 0,95 = 1384,65 \text{ кг}$).

5. ТП 3.4 Інкубація посівного міцелію

Вхід: 4235,42 кг.

Процес: Інкубація в камері (Binder KB 2400) при $24 \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, вологість 60–70 %, 6–14 діб.

Втрати: 5 % = $4235,42 \text{ кг} \times 0,05 = 211,77 \text{ кг}$.

Вихід: $4235,42 \text{ кг} - 211,77 \text{ кг} = 4023,65 \text{ кг}$ (вода: $2850,77 \text{ кг} \times 0,95 = 2708,23 \text{ кг}$; суха речовина: $1384,65 \text{ кг} \times 0,95 = 1315,42 \text{ кг}$).

6. ТП 4.1 Формування у форми

Вхід: 4023,65 кг.

Процес: Розподіл у форми, пресування (Langzauner LZT-OK) при 0,5–1 МПа.

Втрати: 5 % = $4023,65 \text{ кг} \times 0,05 = 201,18 \text{ кг}$.

Вихід: $4023,65 \text{ кг} - 201,18 \text{ кг} = 3822,47 \text{ кг}$ (вода: $2708,23 \text{ кг} \times 0,95 = 2572,82 \text{ кг}$; суха речовина: $1315,42 \text{ кг} \times 0,95 = 1249,65 \text{ кг}$).

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. ТП 4.3 Термостабілізація матеріалу

Вхід: 3822,47 кг.

Процес: Сушіння в камері (Mettmert UFP 800) при 60–80 °С, 12–24 год, вологість кінцевого продукту <10 %.

Вологість видаляється: Припускаємо, що вологість знижується з 67 % (2572,82 кг вода / 3822,47 кг) до <10 %. Для 9 % вологості: маса води = суха речовина $\times$ 0,09 / 0,91. Суха речовина = 1249,65 кг, отже вода = 1249,65 $\times$ 0,09 / 0,91 = 123,63 кг.

Маса після сушіння: 1249,65 кг (суха) + 123,63 кг (вода) = 1373,28 кг.

Втрати: 5 % = 1373,28 кг $\times$ 0,05 = 68,66 кг.

Вихід: 1373,28 кг - 68,66 кг = 1304,62 кг (суха речовина: 1249,65 кг $\times$ 0,95 = 1187,17 кг; вода: 123,63 кг $\times$ 0,95 = 117,45 кг).

8. ТП 4.4 Охолодження та вилучення з форм

Вхід: 1304,62 кг.

Процес: Охолодження (Liebherr GKPy 6570), перевірка міцності (ZwickRoell Z010).

Втрати: 5 % = 1304,62 кг $\times$ 0,05 = 65,23 кг.

Вихід: 1304,62 кг - 65,23 кг = 1239,39 кг (готовий біокомпозит).

Вихід біокомпозиту в м²:

Маса готового продукту: 1239,39 кг.

Густина біокомпозиту: 200 кг/м³.

Об'єм продукту: Маса / Густина = 1239,39 кг / 200 кг/м³ = 6,197 м³.

Площа плит: При товщині 0,05 м, площа = об'єм / товщина = 6,197 м³ / 0,05 м = 123,94 м².

Матеріальний баланс (підсумок)

Вхід: Тирса: 4000 кг, висівки: 750 кг, гіпс: 250 кг, СаСО₃: 50 кг, міцелій: 171,47 кг, вода: 3500 кг.

Загальна вхідна маса: 8721,47 кг.

Вихід: Готовий біокомпозит: 1239,39 кг.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Втрати (сумарно): 8721,47 кг - 1239,39 кг = 7482,08 кг (включає випаровування води під час сушіння та втрати 5 % на кожній стадії).

Площа готового продукту: 123,94 м².

Таким чином, за одну серію, з урахуванням продуктивності обладнання та втрат 5 % на кожній стадії, вихід готового біокомпозитного матеріалу становить 1239,39 кг, що відповідає 123,94 м² плит товщиною 5 см.

3.2 Розрахунок і вибір технологічного обладнання

При проведенні дослідження з розробки технології біоматеріалу для пілотного виробництва на основі міцелію грибів роду *Pleurotus* використовувалось обладнання, наявне на кафедрі біотехнології НФаУ: ламінарний бокс АС2-4Е1 класу 2 - для проведення робіт в асептичних умовах, стерилізатор ГП-80 - для стерилізації лабораторного посуду, стерилізатор паровий ГП-20 - для автоклавування живильних середовищ, баня водяна ВБ-10 - для розтоплення живильних середовищ та нагрівання компонентів, термостат ТС 1/80СПУ - для культивування штамів та вирощування зразків продуктів, ваги SPU 402 - для зважування компонентів середовища та зразків продуктів, мікроскоп біологічний XSP-128 ULAB - для вивчення препаратів штамів та зразків продуктів, мікроскоп стереоскопічний МБС-10 - для вивчення морфології колоній культури. Виходячи із призначення обладнання згідно з аналізом сайтів виробників для виробничого процесу було підібране наступне обладнання: Виходячи із призначення обладнання згідно з аналізом сайтів виробників для виробничого процесу було підібране наступне обладнання: промислова мийна система Kärcher IVR-L 100/24-2 — для очищення виробничих цехів від забруднень, система вентиляції з Camfil Absolute HEPA-фільтрами, клас H14 — для фільтрації повітря та зниження мікробного забруднення,

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аеробіологічний сканер Sartorius MD8 Airscan — для контролю рівня мікробного забруднення повітря, паровий стерилізатор Getinge HS66 — для стерилізації великогабаритного обладнання та тари, ламінарний бокс Esco Airstream Class II, — для забезпечення асептичних умов під час інокуляції, шафа для стерильного одягу Steris AMSCO — для зберігання стерильного одягу, УФ-лампа Philips TUV 30W — для дезінфекції при вході до чистих зон, промислова мийна установка GEA Westfalia — для промивання та запарювання тирси, планетарний змішувач Hobart Planetary Mixer — для рівномірного змішування субстратів із добавками, термостат Memmert IN750plus — для інкубації культур у контрольованих умовах, автоклав Tuttnauer 5075HSG — для стерилізації живильних середовищ, водяна баня Julabo SW23 — для розтоплення живильних середовищ, інкубатор Binder KB 720 — для контрольованої інкубації міцелію, біологічний мікроскоп Leica DM750 — для аналізу структури міцелію, стереомікроскоп Zeiss Stemi 508 — для оцінки морфології колоній, промисловий запарювач Satrise Mushroom Equipment — для запарювання та змішування субстратів, автоклав Systec NX-1000 — для стерилізації великих партій субстрату, змішувач зерна Bühler Grain Mixer — для змішування субстрату з міцеліями, чиста кімната Camfil Cleanroom — для забезпечення асептичних умов, інкубаційна камера Binder KB 2400 — для контрольованої інкубації субстрату та структуроутворення, гідравлічний прес Langzauner LZT-OK — для формування щільних біокомпозитних панелей, сушильна камера Memmert UFP 800 — для сушіння з метою зупинки росту міцелію, охолоджувальна камера Liebherr GKPrv 6570 — для охолодження біокомпозиту до стабільної температури, та тестер міцності ZwickRoell Z010 — для перевірки механічної міцності готових виробів.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

3.2.1 Конструктивні та механічні розрахунки промислового інкубатора Binder KB 720

Для забезпечення стабільної роботи промислового інкубатора (кліматичної камери) Binder KB 720 у процесі виробництва біокомпозитного матеріалу на основі міцелію *Pleurotus ostreatus* необхідно провести конструктивні та механічні розрахунки. Ці розрахунки охоплюють оцінку об'єму, навантаження на конструкцію, теплових характеристик, механічної міцності елементів та вентиляційних параметрів, щоб гарантувати відповідність вимогам технологічного процесу (температура 26 ± 1 °C, вологість 60–70 %, об'єм 698 л) та надійність обладнання.

1. Конструктивні розрахунки

Згідно з технічними даними, інкубатор Binder KB 720 має внутрішній об'єм 698 л. Внутрішні розміри камери становлять 970 мм (ширина) $\times$ 575 мм (глибина) $\times$ 1250 мм (висота), що відповідає специфікаціям виробника.

Внутрішній об'єм:

$$V = \text{ширина} \times \text{глибина} \times \text{висота} = 0,97 \text{ м} \times 0,575 \text{ м} \times 1,25 \text{ м} = 0,698 \text{ м}^3 = 698 \text{ л}$$

Корисна площа полиць:

5 полиць розміром 0,9 м $\times$ 0,5 м кожна.

$$S_{\text{полиць}} = 5 \times 0,9 \text{ м} \times 0,5 \text{ м} = 2,25 \text{ м}^2$$

Максимальна маса субстрату: З попереднього матеріального балансу, вихід після інокуляції (ТП 3.4) становить 4023,65 кг за серію. Обмеженням є місткість камери. При густині субстрату близько 500 кг/м³ (вологість 70 %), об'єм субстрату:

$$V_{\text{субстрату}} = 4023,65 \text{ кг} / 500 \text{ кг/м}^3 = 8,05 \text{ м}^3$$

Оскільки 8,05 м³ перевищує об'єм камери (0,698 м³), одна камера Binder KB 720 може вмістити:

$$m_{\text{субстрату}} = 0,698 \text{ м}^3 \times 500 \text{ кг/м}^3 = 349 \text{ кг}$$

Таким чином, для обробки 4023,65 кг субстрату потрібно:

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

$$n_{\text{камер}} = 4023,65 \text{ кг} / 349 \text{ кг} \approx 12 \text{ інкубаторів}$$

Розрахуємо навантаження на конструкцію.

Вага субстрату: 349 кг.

Вага полиць: Кожна полиця виготовлена з нержавіючої сталі (густина 7850 кг/м³), товщина 2 мм, розміри 0,9 м × 0,5 м. Об'єм однієї полиці:

$$V_{\text{полиці}} = 0,9 \text{ м} \times 0,5 \text{ м} \times 0,002 \text{ м} = 0,0009 \text{ м}^3$$

Вага однієї полиці:

$$m_{\text{полиці}} = 0,0009 \text{ м}^3 \times 7850 \text{ кг/м}^3 = 7,07 \text{ кг}$$

Загальна вага 5 полиць:

$$m_{\text{полиць}} = 5 \times 7,07 \text{ кг} = 35,35 \text{ кг}$$

Загальне навантаження на конструкцію інкубатора:

$$m_{\text{заг}} = m_{\text{субстрату}} + m_{\text{полиць}} = 349 \text{ кг} + 35,35 \text{ кг} = 384,35 \text{ кг}$$

Сила тиску на основу:

$$F = m_{\text{заг}} \times g = 384,35 \text{ кг} \times 9,81 \text{ м/с}^2 = 3770,47 \text{ Н}$$

Площа основи (0,97 м × 0,575 м):

$$S_{\text{основа}} = 0,97 \text{ м} \times 0,575 \text{ м} = 0,55775 \text{ м}^2$$

Напруження на основу:

$$\sigma = F / S_{\text{основа}} = 3770,47 \text{ Н} / 0,55775 \text{ м}^2 = 6761,43 \text{ Па} = 6,76 \text{ кПа}$$

Це значення значно нижче межі міцності сталі (залежно від марки - для низьковуглецевих сталей, таких як Ст3пс, межа міцності зазвичай становить 380-480 МПа, а для високоміцних сталей - може досягати 3000 МПа), що підтверджує надійність конструкції.

2. Механічні розрахунки

Теплові розрахунки

Інкубатор підтримує температуру 26 ± 1 °С і вологість 60–70 %.

Теплова потужність для нагріву субстрату: $Q = mc\Delta T$, де m - маса тіла (кг), c - питома теплоємність (Дж/(кг*К)), а ΔT - зміна температури (К).

Початкова температура субстрату після охолодження (ТП 3.3) - 24–26 °С, цільова - 26 °С. Питома теплоємність субстрату (70 % води) - 2,5

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

кДж/(кг·°C). Припускаємо підвищення температури на 1 °C для 349 кг субстрату:

$$Q = m \times c \times \Delta T = 349 \text{ кг} \times 2,5 \text{ кДж/(кг·°C)} \times 1 \text{ °C} = 872,5 \text{ кДж}$$

Час нагріву: Нагрівач інкубатора має потужність 500 Вт (0,5 кВт, типове значення для Binder KB 720). Час нагріву:

$$t = Q / P = 872,5 \text{ кДж} / 0,5 \text{ кВт} = 1745 \text{ с} = 29,1 \text{ хв}$$

Втрати тепла: Припускаємо тепловтрати через стінки (коефіцієнт теплопровідності ізоляції, наприклад, пінополіуретану, = 0,03 Вт/(м·°C)), різниця температур 26 °C (всередині) і 20 °C (зовні). Площа поверхні камери:

$$S_{\text{поверхня}} = 2 \times (0,97 \times 1,25 + 0,97 \times 0,575 + 0,575 \times 1,25) = 4,55 \text{ м}^2$$

Потік тепла:

$$Q_{\text{втрати}} = k \times S \times \Delta T = 0,03 \text{ Вт/(м·°C)} \times 4,55 \text{ м}^2 \times (26 - 20) = 0,819 \text{ Вт}$$

Це значення незначне, що підтверджує ефективність ізоляції інкубатора.

Механічна міцність полиць

Навантаження на одну полицю: 349 кг субстрату розподілено на 5 полиць:

$$m_{\text{на полицю}} = 349 \text{ кг} / 5 = 69,8 \text{ кг}$$

Сила:

$$F_{\text{полиця}} = 69,8 \text{ кг} \times 9,81 \text{ м/с}^2 = 684,86 \text{ Н}$$

Полиця - балка, закріплена з двох кінців, розміром 0,9 м.

Максимальний момент згину:

$$M = F \times L / 4 = 684,86 \text{ Н} \times 0,9 \text{ м} / 4 = 154,09 \text{ Н·м}$$

Момент опору перерізу (для прямокутного перерізу полиці, ширина 0,5 м, товщина 0,002 м):

$$W = b \times h^2 / 6 = 0,5 \text{ м} \times (0,002 \text{ м})^2 / 6 = 0,000000333 \text{ м}^3$$

Напруження згину:

$$\sigma = M / W = 154,09 \text{ Н·м} / 0,000000333 \text{ м}^3 = 462,732,732 \text{ Па} = 462,73 \text{ МПа}$$

Це значення в межах норми міцності нержавіючої високоміцної сталі,

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

що забезпечує надійність.

Вентиляція

Для підтримки вологості 60–70 % і видалення CO₂ від росту міцелію потрібна вентиляція. Припускаємо, що міцелій виділяє 0,1 л CO₂/кг/год. Для 349 кг:

$$V_{\text{CO}_2} = 349 \text{ кг} \times 0,1 \text{ л/кг/год} = 34,9 \text{ л/год}$$

Повітрообмін: Для розведення CO₂ потрібен потік повітря, припускаємо концентрацію CO₂ < 1000 ppm (0,1 %). Об'єм камери 698 л, потрібний повітрообмін:

$$Q_{\text{повітря}} = V_{\text{CO}_2} / \text{концентрація CO}_2 = 34,9 \text{ л/год} / 0,001 = 34,900 \text{ л/год} = 34,9 \text{ м}^3/\text{год}$$

Це значення відповідає можливостям вентиляційної системи Binder KB 720.

Інкубатор (кліматична камера зі стабільними умовами) Binder KB 720, креслення якого наведено у додатку, здатен обробляти 349 кг субстрату за серію, вимагає 12 одиниць для 4023,65 кг. Конструкція витримує навантаження 6,76 кПа, полиці товщиною 2 мм. Теплова потужність 500 Вт забезпечує нагрів за 29,1 хв, тепловтрати мінімальні (0,819 Вт). Вентиляція 34,9 м³/год підтримує якість середовища.

3.2.2 Розрахунок часу роботи інкубатора Binder KB 720 та технологічного процесу за 1 серію

Для зниження кількості одиниць обладнання розрахуємо час який потрібен для проведення процесу не у 12 інкубаторах, а у 12 послідовних завантаженнях. Для обробки 4023,65 кг субстрату за одну серію в одному інкубаторі Binder KB 720 (місткість 349 кг) замість 12 інкубаторів процес проводитиметься в 12 послідовних завантаженнях.

1. Час роботи інкубатора Binder KB 720 для 12 завантажень

Вихідні дані:

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Місткість інкубатора: 349 кг субстрату за одне завантаження.

Маса субстрату за серію: 4023,65 кг (з матеріального балансу, стадія ТП 3.4).

Кількість завантажень:

$$n_{\text{завантажень}} = 4023,65 \text{ кг} / 349 \text{ кг} = 12 \text{ завантажень.}$$

Тривалість інкубації (ТП 3.4): 6–14 діб, беремо середнє значення 10 діб для розрахунку.

Час нагріву субстрату: 3 попередніх розрахунків, нагрів 349 кг субстрату до 26 °С займає 29,1 хв (0,485 год).

Час завантаження та вивантаження: Припускаємо, що завантаження субстрату в інкубатор та вивантаження після інкубації займає 30 хв (0,5 год) на одне завантаження, враховуючи ручну або частково автоматизовану роботу.

Розрахунок часу для одного завантаження:

Час одного циклу = Час завантаження + Час нагріву + Час інкубації + Час вивантаження:

$$t_{\text{цикл}} = 0,5 \text{ год} + 0,485 \text{ год} + (10 \text{ діб} \times 24 \text{ год}) + 0,5 \text{ год}$$

$$t_{\text{цикл}} = 0,5 \text{ год} + 0,485 \text{ год} + 240 \text{ год} + 0,5 \text{ год} = 241,485 \text{ год}$$

Час для 12 послідовних завантажень:

Припускаємо послідовний процес: після завершення інкубації одного завантаження інкубатор вивантажується, завантажується новою порцією субстрату, нагрівається і знову інкубується.

Загальний час роботи інкубатора:

$$t_{\text{інкубатор}} = t_{\text{цикл}} \times n_{\text{завантажень}} = 241,485 \text{ год} \times 12 = 2897,82 \text{ год}$$

Переведення в дні:

$$t_{\text{інкубатор}} = 2897,82 \text{ год} / 24 \text{ год/доба} \approx 120,74 \text{ діб}$$

Таким чином, для обробки 4023,65 кг субстрату в одному інкубаторі Binder KB 720 за 12 послідовних завантажень потрібно приблизно 2897,82 годин, або 120,74 діб.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Загальний час технологічного процесу за 1 серію

Вихідні дані:

Технологічний процес включає всі стадії (ДР 1.1–ДР 1.4, ТП 2.1–ТП 2.4, ТП 3.1–ТП 3.4, ТП 4.1–ТП 4.4). Для кожної стадії визначаємо тривалість на основі параметрів промислового процесу та припущень. Припускаємо, що підготовчі стадії (ДР 1.1–ДР 1.4, ТП 2.1–ТП 2.4, ТП 3.1–ТП 3.3) виконуються одноразово для всієї серії (4023,65 кг субстрату після ТП 3.4), а стадії ТП 3.4–ТП 4.4 повторюються для кожного з 12 завантажень в інкубаторі.

Тривалість кожної стадії

1. ДР 1.1 Підготовка приміщень

Вологе прибирання, дезінфекція, UVC-обробка: Припускаємо 2 год на цех.

2. ДР 1.2 Підготовка обладнання

Дезінфекція, стерилізація (Getinge HS66, 121 °C, 1,1 атм, 40 хв): 40 хв + 20 хв підготовка = 1 год.

3. ДР 1.3 Підготовка персоналу

Інструктаж, переодягання: 1 год.

4. ДР 1.4 Підготовка технологічних матеріалів

Промивання, запарювання (Satrise, 5 т/год, 100 °C, 1–2 год): Для 5 т сировини беремо 2 год.

5. ТП 2.1 Отримання робочої культури гриба

Пересів, інкубація (Memmert IN750plus, 26 °C, 7–10 діб): Середнє 8,5 діб = 204 год.

6. ТП 2.2 Підготовка середовища для посіву

Стерилізація (Tuttnauer 5075HSG, 121 °C, 40 хв), розтоплення: 40 хв + 20 хв = 1 год.

7. ТП 2.3 Інкубація міцелію

Інкубація (Binder KB 720, 26 °C, 7–10 діб): Середнє 8,5 діб = 204 год.

8. ТП 2.4 Оцінка морфології міцелію

Мікроскопія (Leica DM750, Zeiss Stemi 508): 1 год.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

9. ТП 3.1 Підготовка субстрату

Змішування, запарювання (Sattrise, 5 т/год, 100 °С, 1–2 год): 2 год.

10. ТП 3.2 Стерилізація субстрату

Стерилізація (Systec НХ-1000, 121 °С, 1,1 атм, 40 хв): 40 хв + 20 хв підготовка = 1 год.

11. ТП 3.3 Інокуляція субстрату

Інокуляція (Bühler Grain Mixer, 500 кг/год): Для 4023,65 кг: 4023,65 кг / 500 кг/год = 8,05 год.

12. ТП 3.4 Інкубація посівного міцелію

Інкубація (Binder KB 720, 24 °С, 6–14 діб): Середнє 10 діб = 240 год (для одного завантаження 349 кг).

13. ТП 4.1 Формування у форми

Розподіл, пресування (Langzauner LZT-OK): Припускаємо 1 год на завантаження 349 кг.

14. ТП 4.2 Завершальна інкубація

Структурування (Binder KB 2400, 24–26 °С, 3–5 діб): Середнє 4 діб = 96 год.

15. ТП 4.3 Термостабілізація матеріалу

Сушіння (Memmert UFP 800, 60–80 °С, 12–24 год): Середнє 18 год.

16. ТП 4.4 Охолодження та вилучення з форм

Охолодження (Liebherr GKРv 6570), перевірка: 1 год на завантаження.

Розрахунок загального часу

Підготовчі стадії (одноразові для серії): ДР 1.1–ДР 1.4, ТП 2.1–ТП 2.4, ТП 3.1–ТП 3.3

$t_{\text{підготовка}} = 2 \text{ год} + 1 \text{ год} + 1 \text{ год} + 2 \text{ год} + 204 \text{ год} + 1 \text{ год} + 204 \text{ год} + 1 \text{ год} + 2 \text{ год} + 1 \text{ год} + 8,05 \text{ год}$

$t_{\text{підготовка}} = 426,05 \text{ год}$

Стадії для кожного завантаження (повторюються 12 разів): ТП 3.4, ТП 4.1–ТП 4.4

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

$t_{\text{цикл завантаження}} = 0,5 \text{ год (завантаження)} + 0,485 \text{ год (нагрів)} + 240 \text{ год (інкубація)} + 0,5 \text{ год (вивантаження)} + 1 \text{ год (формування)} + 96 \text{ год (завершальна інкубація)} + 18 \text{ год (сушіння)} + 1 \text{ год (охолодження)}$

$T_{\text{цикл завантаження}} = 356,985 \text{ год}$

Загальний час для 12 завантажень:

$t_{\text{завантаження}} = 356,985 \text{ год} \times 12 = 4283,82 \text{ год}$

Загальний час технологічного процесу:

$t_{\text{заг}} = t_{\text{підготовка}} + t_{\text{завантаження}} = 426,05 \text{ год} + 4283,82 \text{ год} = 4709,87 \text{ год}$

Переведення в дні:

$t_{\text{заг}} = 4709,87 \text{ год} / 24 \text{ год/доба} \approx 196,24 \text{ діб}$

Таким чином, час роботи інкубатора Binder KB 720: Для 12 послідовних завантажень (4023,65 кг субстрату) потрібно 2897,82 годин, або приблизно 120,74 діб.

Загальний час технологічного процесу за 1 серію: З урахуванням підготовчих стадій та 12 завантажень процес триває 4709,87 годин, або приблизно 196,24 діб.

3.2.3 Рішення для зниження тривалості процесу однієї серії виробництва біокомпозиту

Тривалість технологічного процесу однієї серії (196,24 діб) є нерентабельною через послідовне виконання 12 завантажень в одному інкубаторі Binder KB 720. Для скорочення часу пропонуємо три рішення: 1) паралельна інкубація з використанням кількох інкубаторів, 2) оптимізація часу інкубації шляхом підбору добавок до субстрату, 3) автоматизація завантаження, вивантаження та інших операцій.

1. Паралельна інкубація з використанням кількох інкубаторів. Замість 12 послідовних завантажень в одному інкубаторі використовувати 4 інкубатори Binder KB 720 для паралельної обробки субстрату. Це зменшить кількість циклів завантаження в одному апараті та дозволить обробляти

більшу кількість субстрату одночасно.

Вихідні дані:

Маса субстрату за серію: 4023,65 кг (з матеріального балансу, ТП 3.4).

Місткість одного інкубатора: 349 кг.

Кількість завантажень: $4023,65 \text{ кг} / 349 \text{ кг} \approx 12$.

Час одного циклу в інкубаторі: 0,5 год (завантаження) + 0,485 год (нагрів) + 240 год (інкубація, 10 діб) + 0,5 год (вивантаження) = 241,485 год.

З 4 інкубаторами: Кожен обробляє $4023,65 \text{ кг} / 4 = 1005,91 \text{ кг}$, тобто $1005,91 \text{ кг} / 349 \text{ кг} = 3$ завантаження на інкубатор.

Розрахунок:

Час для 3 завантажень в одному інкубаторі:

$$t_{\text{інкубатор}} = 241,485 \text{ год} \times 3 = 724,455 \text{ год}$$

При паралельній роботі 4 інкубаторів процеси синхронізуються, тому загальний час інкубації для серії дорівнює часу одного інкубатора: 724,455 год.

Підготовчі стадії (ДР 1.1–ДР 1.4, ТП 2.1–ТП 2.4, ТП 3.1–ТП 3.3): 426,05 год (з попередніх розрахунків).

Стадії після інкубації (ТП 4.1–ТП 4.4) для одного завантаження: 1 год (формування) + 96 год (завершальна інкубація) + 18 год (сушіння) + 1 год (охолодження) = 116 год.

З 4 інкубаторами: Кожен обробляє 3 завантаження, час для ТП 4.1–ТП 4.4 = $116 \text{ год} \times 3 = 348 \text{ год}$.

Загальний час процесу:

$$t_{\text{заг}} = t_{\text{підготовка}} + t_{\text{інкубатор}} + t_{\text{після_інкубації}} = 426,05 \text{ год} + 724,455 \text{ год} + 348 \text{ год} = 1498,505 \text{ год}$$

Переведення в дні:

$$t_{\text{заг}} = 1498,505 \text{ год} / 24 \text{ год/доба} = 62,44 \text{ діб}$$

Скорочення часу: $196,24 \text{ діб} - 62,44 \text{ діб} = 133,8 \text{ діб}$ (68,2 % зменшення).

2. Оптимізація часу інкубації з добавками. Додати до субстрату

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

поживні компоненти (наприклад, глюкозу або екстракт дріжджів, 1–2 % від маси субстрату), щоб прискорити ріст міцелію *Pleurotus ostreatus*. Дослідження показують [4], що це може скоротити час інкубації (ТП 3.4) з 6–14 діб до 5–10 діб, а завершальної інкубації (ТП 4.2) з 3–5 діб до 2–4 діб. Беремо мінімальні значення: 5 діб і 2 діб.

Розрахунок:

Час одного циклу інкубації (ТП 3.4): 0,5 год (завантаження) + 0,485 год (нагрів) + 5 діб $\times$ 24 год + 0,5 год (вивантаження) = 121,485 год.

Час для 3 завантажень в одному інкубаторі: 121,485 год $\times$ 3 = 364,455 год.

3 4 інкубаторами: $t_{\text{інкубатор}} = 364,455$ год (паралельна робота).

Час для ТП 4.1–ТП 4.4: 1 год (формування) + 2 діб $\times$ 24 год (завершальна інкубація) + 18 год (сушіння) + 1 год (охолодження) = 68 год.

Для 3 завантажень: 68 год $\times$ 3 = 204 год.

Загальний час процесу:

$t_{\text{заг}} = t_{\text{підготовка}} + t_{\text{інкубатор}} + t_{\text{після інкубації}} = 426,05 \text{ год} + 364,455 \text{ год} + 204 \text{ год} = 994,505 \text{ год}$

Переведення в дні:

$t_{\text{заг}} = 994,505 \text{ год} / 24 \text{ год/доба} \approx 41,44 \text{ діб}$

Скорочення часу: 196,24 діб - 41,44 діб = 154,8 діб (78,9 % зменшення).

3. Автоматизація операцій. Автоматизувати завантаження, вивантаження, формування та охолодження за допомогою конвеєрних систем і роботизованих маніпуляторів. Це скоротить час завантаження/вивантаження з 0,5 год до 0,1 год, формування (ТП 4.1) з 1 год до 0,5 год, охолодження (ТП 4.4) з 1 год до 0,5 год.

Розрахунок:

Час одного циклу інкубації (ТП 3.4, з оптимізацією з п.2): 0,1 год (завантаження) + 0,485 год (нагрів) + 5 діб $\times$ 24 год + 0,1 год (вивантаження) = 120,685 год.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Час для 3 завантажень: $120,685 \text{ год} \times 3 = 362,055 \text{ год}$.

З 4 інкубаторами: $t_{\text{інкубатор}} = 362,055 \text{ год}$.

Час для ТП 4.1–ТП 4.4: $0,5 \text{ год (формування)} + 2 \text{ діб} \times 24 \text{ год (завершальна інкубація)} + 18 \text{ год (сушіння)} + 0,5 \text{ год (охолодження)} = 67 \text{ год}$.

Для 3 завантажень: $67 \text{ год} \times 3 = 201 \text{ год}$.

Загальний час процесу:

$t_{\text{заг}} = t_{\text{підготовка}} + t_{\text{інкубатор}} + t_{\text{після інкубації}} = 426,05 \text{ год} + 362,055 \text{ год} + 201 \text{ год} = 989,105 \text{ год}$

Переведення в дні:

$t_{\text{заг}} = 989,105 \text{ год} / 24 \text{ год/доба} \approx 41,21 \text{ діб}$

Скорочення часу: $196,24 \text{ діб} - 41,21 \text{ діб} = 155,03 \text{ діб} (79,0 \% \text{ зменшення})$.

Ми пропонуємо поєднання всіх трьох підходів: використовувати 4 інкубатори Binder KB 720 для паралельної обробки; додати 1–2 % глюкози або екстракту дріжджів до субстрату для прискорення інкубації; автоматизувати завантаження, вивантаження, формування та охолодження.

Тоді, підсумковий час:

Загальний час процесу: 41,21 діб (989,105 год).

Скорочення часу: з 196,24 діб до 41,21 діб, тобто на 155,03 діб (79,0 % зменшення).

Запропоновані рішення вплинуть на рентабельність (тривалість процесу скорочується до 41 дня, що дозволяє проводити 8 серій на рік замість 1–2); ефективність (паралельна робота інкубаторів і прискорення росту міцелію підвищують продуктивність); економію праці (автоматизація зменшує час операцій і потребу в ручній праці).

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3 Опис технологічного процесу

3.3.1 Пілотне виробництво в лабораторних умовах

На кафедрі біотехнології розроблено технологію виготовлення біокомпозитного матеріалу для тепло- та шумоізоляції на основі міцелію *Pleurotus ostreatus*, культивованого на відходах лісопереробної промисловості, підібрано умови отримання матеріалу [5, 6, 7, 8, 28]. Дослідження проводили моделюючи умови твердофазного культивування (рис. 3.1), який включав наступні етапи: отримання робочих культур штамів *P. ostreatus*, отримання посівного міцелію штамів *P. ostreatus*, твердофазне культивування штамів *P. ostreatus*.



А



Б



В



Г



Д



Є



Ж



З

Рис. 3.1 – Роботи із міцелієм грибів:

А – підготовка зерна для отримання зернового міцелію (розварювання), Б – підготовка субстратів (стерилізація), В – засівання субстратів міцелієм та формування ним прес-форм, Г – розміщення зразку у прес-формі у контейнери, Д – засівання зразків без пресування, Є - розміщення зразків без пресування у контейнери, Ж – розміщення зразків із використанням як матриці марлевого матеріалу, З – контейнери із зразками на вирощуванні

Для надання технологічних властивостей біокомпозитному матеріалу були розроблені та зроблені власноруч металеві прес-форми із перфорованими полікарбонатними пластинами (рис. 3.2).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

162.01.15.00 000 ПЗ

Арк.

56



А



Б

Рис. 3.2 – Розроблені прес-форми для отримання біокомпозитного матеріалу:

А- складові частини (перфоровані полікарбонатні пластини та металеві затискачі), Б – прес-форма у зібраному стані

Для тестування технології в реальних умовах було проведено пілотне виробництво, яке дозволило оцінити ефективність процесу та якість кінцевого продукту перед масштабуванням. Далі описано етапи процесу у лабораторних умовах.

Стадія ДР 1 Санітарна обробка приміщень

Стадія ДР 1 включає в себе такі операції:

ДР 1.1 Підготовка приміщень

ДР 1.2 Підготовка обладнання

ДР 1.3 Підготовка персоналу

ДР 1.4 Підготовка технологічних матеріалів

Операція ДР 1.1 Підготовка приміщень

Щоденно проводиться вологе прибирання виробничих та лабораторних приміщень. Особлива увага приділяється поверхням, де здійснюється підготовка середовищ, інокулювання та інкубація.

Операція ДР 1.2 Підготовка обладнання

Робота здійснюється в асептичних умовах ламінарного боксу AC2-4E1

класу 2.

Використовується наступне лабораторне обладнання:

Стерилізатор ГП-80 – для стерилізації лабораторного скла і посуду

Стерилізатор паровий ГП-20 – для автоклавування живильних середовищ.

Баня водяна лабораторна ВБ-10 – для розтоплення середовищ і нагрівання компонентів.

Термостат ТС 1/80СПУ – для культивування грибних штамів і ферментації зразків.

Ваги лабораторні SPU 402 – для точного зважування середовищ і біозразків

Мікроскоп біологічний XSP-128 ULAB – для мікроскопічного дослідження грибів і продуктів.

Мікроскоп стереоскопічний МБС-10 – для вивчення морфології колоній грибної культури.

Перед кожним використанням обладнання корпуси і відкриті поверхні протираються спочатку вологою, потім сухою стерильною серветкою та проводиться його дезінфекція.

Операція ДР 1.3 Підготовка персоналу

Проводиться інструктаж по роботі з обладнанням. Персонал забезпечується санітарним одягом: халат, шапочка, змінне взуття.

Операція ДР 1.4 Підготовка технологічних матеріалів

Скляний лабораторний посуд (колби, ємності), тара промиваються водою (мильним розчином), висушуються та стерилізуються.

Стадія ТП 2 Отримання робочих та посівних культур *P. ostreatus*

Стадія ТП 2 включає в себе такі операції:

ТП 2.1 Отримання робочої культури гриба

ТП 2.2 Підготовка середовища для посіву

ТП 2.3 Інкубація міцелію

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

ТП 2.4 Оцінка морфології міцелію

Операція ТП 2.1 Отримання робочої культури гриба

Умови роботи – асептичні, в ламінарному боксі AC2-4E1.

Проводиться пересів музейної культури штама *Pleurotus ostreatus* на скошене солодове середовище у пробірках (d=20 мм).

Інкубація відбувається в термостаті ТС 1/80СПУ за температури 26 ± 1 °С, вологості 60–70 %, протягом 7–10 діб, до повного заростання середовища міцелієм.

Операція ТП 2.2 Підготовка середовища для посіву

Компоненти середовищ зважуються на вагах SPU 402, змішуються у стерильному посуді. Живильні середовища стерилізуються в автоклаві ГП-20, потім розтоплюються у водяній бані ВБ-10 до робочої температури.

Операція ТП 2.3 Інкубація міцелію

Посіви витримуються у термостаті ТС 1/80СПУ до досягнення зрілого міцелію. Після завершення інкубації проводиться огляд культур на наявність контамінації.

Операція ТП 2.4 Оцінка морфології міцелію

Використовується мікроскоп XSP-128 ULAB для вивчення вегетативного міцелію, а також стереоскопічний мікроскоп МБС-10 – для оцінки морфології колоній. Фіксується наявність звичайного та пошукового міцелію, пряжок, анастомозів.

Стадія ТП 3 Твердофазне культивування та формування композиту

Стадія ТП 3 включає в себе такі операції:

ТП 3.1 Підготовка зернового субстрату

ТП 3.2 Стерилізація зернового субстрату

ТП 3.3 Інокуляція зернового субстрату

ТП 3.4 Інкубація посівного міцелію

Операція ТП 3.1 Підготовка субстрату

Використовується тирса листяних порід, пшеничні висівки, кавове

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

лушпиння.

Субстрат промивається, запарюється при 100 °С протягом 1–2 год, доводиться до вологості 70 %, додається 1 % CaCO_3 та 5% гіпсу.

Операція ТП 3.2 Стерилізація субстрату

Стерилізація проводиться в паровому стерилізаторі ГП-20 при 121 °С, тиск $1,1 \pm 0,1$ атм., тривалість – 30 хвилин.

Операція ТП 3.3 Інокуляція субстрату

Після охолодження субстрату до 24–26 °С, його інокують подрібненим міцелієм у кількості 3–5 % від маси субстрату.

Процес проводиться в асептичних умовах ламінарного боксу АС2-4Е1.

Операція ТП 3.4 Інкубація зразків

Пакети із субстратом поміщаються в термостат ТС 1/80СПУ та інкубують при 24 ± 1 °С, вологість 60–70 %.

Повне заростання субстрату – 6–7 діб.

Стадія ТП 4 Формування та стабілізація біокомпозиту

Стадія ТП 4 включає в себе такі операції:

ТП 4.1 Формування у форми

ТП 4.2 Завершальна інкубація

ТП 4.3 Термостабілізація

ТП 4.4 Охолодження та вилучення

Операція ТП 4.1 Формування матеріалу у форми

Після первинного проростання, масу з міцелієм розкладають у заздалегідь підготовлені прес-форми.

Форми ущільнюють вручну, залишаючи мікропори для дихання.

Операція ТП 4.2 Завершальна інкубація (структурутворення)

Форми залишають при температурі 24–25 °С у термостаті ТС 1/80СПУ на 3 дні, для повного заповнення та структурного зв'язування.

Цей етап важливий для формування щільної біокомпозитної маси.

Операція ТП 4.3 Термостабілізація матеріалу

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Після завершення інкубації, матеріал піддається сушінню при температурі 75 °С у сушильній камері протягом 5 годин.

Це зупиняє ріст міцелію, зберігає форму та знижує вологість до стабільного рівня.

Операція ТП 4.4 Охолодження та вилучення з форм

Готовий біокомпозит охолоджується до кімнатної температури, вилучається з форм та перевіряється на механічну міцність, однорідність, відсутність контамінації.

3.3.2 Технологія великомасштабного виробництва

Масштабування технології виробництва біокомпозитного матеріалу на основі міцелію грибів *Pleurotus ostreatus* із лабораторних умов до промислового рівня вимагає адаптації процесів, обладнання та контролю критичних параметрів для забезпечення ефективності, стабільності та якості кінцевого продукту. Нижче наведено детальну технологію для великомасштабного виробництва.

Стадія ДР 1. Санітарна обробка та підготовка виробничих приміщень

Ця стадія забезпечує асептичні умови для промислового виробництва, що є критично важливим для уникнення контамінації.

ДР 1.1 Підготовка приміщень

Виробничі цехи щоденно очищаються за допомогою промислових мийних систем (Kärcher IVR-L 100/24-2 Тс: потужність 7,8 кВт, тиск до 200 бар, продуктивність 1000 л/год). Поверхні обробляються дезінфікуючими засобами (70% етанол або перекис водню). Повітря фільтрується у два етапи: попередня (груба) очистка та тонка фільтрація через HEPA-фільтри (Camfil Absolute HEPA-фільтри, клас H14, ефективність 99,95%). Моніторинг чистоти повітря, включаючи вміст механічних частинок та рівень мікробної контамінації (<100 КУО/м³), проводиться за допомогою аеробіологічного тестера (Sartorius MD8 Airscan) відповідно до стандартних операційних

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

процедур (СОП). Після вологого прибирання дезінфекція повітряного середовища виконується за допомогою UVC-ламп (Philips TUV 30W).

Критичні параметри:

- Температура в цеху: 20–22 °С.
- Вологість: 50–60%.
- Рівень мікробного забруднення: <100 КУО/м³. (К 1.1.1)

ДР 1.2 Підготовка обладнання

Усі поверхні обладнання дезінфікуються перед початком роботи (70% етанол або 0,5% перекис водню). Стерилізація великогабаритного обладнання та тари проводиться у промисловому паровому стерилізаторі (Getinge HS66: об'єм 600 л, температура до 134 °С, тиск до 2,2 атм). Інокуляція виконується в асептичних умовах у ламінарній кабіні (Esco Airstream Class II, Type A2: робоча зона 1,8 м x 0,8 м, клас чистоти ISO 5). Процес відповідає СОП «Підготовка технологічного обладнання». Контроль мікробіологічної чистоти обладнання проводиться згідно з СОП «Контроль мікробіологічної чистоти технологічного обладнання та інвентарю», включаючи перевірку залишків дезінфікуючих засобів. Результати фіксуються у протоколах.

Критичні параметри:

- Умови стерилізації: 121 °С, 1,1 атм, 40 хв. (К 1.1.2)

ДР 1.3 Підготовка персоналу

Персонал проходить навчання з асептичних технік (інструктаж 1 раз на місяць) і забезпечується захисним одягом (комбінезони, маски, рукавички, бахіли з нетканого поліпропілену, клас захисту ISO 5), який зберігається у шафі (Steris AMSCO, об'єм 500 л). Вхід до чистих зон здійснюється через шлюзи з UVC-лампами (Philips TUV 30W). Підготовка та допуск персоналу регламентуються СОП «Порядок допуску та правила поведінки персоналу у виробничих приміщеннях» і «Гігієнічні вимоги до виробничого персоналу». Контроль гігієни персоналу проводиться лаборантом відділу контролю якості

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

за СОП «Контроль мікробної контамінації технологічного одягу працівників».

Критичні параметри:

- Дотримання протоколів входу до чистих зон. (К 1.1.3)

ДР 1.4 Підготовка технологічних матеріалів

Субстрати (тирса листяних порід, пшеничні висівки, кавове лушпиння) та тара готуються до використання. Промивання та запарювання тирси при 100 °С виконується у промисловій мийній установці (GEA Westfalia, продуктивність 2 т/год). Змішування субстратів (тирса, висівки, 1% CaCO₃, 5% гіпс) проводиться у змішувачі (Hobart Planetary Mixer, об'єм 500 л, потужність 5,5 кВт).

Критичні параметри:

- Вологість тирси: 70 ± 2%, рН 6,5–7,0. (К 1.1.4)

Стадія ТП 2: Отримання робочих та посівних культур *Pleurotus ostreatus*

Виробництво стерильного міцелію для інокуляції субстрату.

ТП 2.1 Отримання робочої культури гриба

Музейна культура *P. ostreatus* пересівається на живильне середовище (солодовий агар) у стерильних ємностях. Інкубація проводиться у промисловому термостаті (Mettler IN750plus: об'єм 749 л, температура 20–70 °С, точність ±0,1 °С).

Критичні параметри:

- Температура: 24 ± 1 °С, вологість: 60–70%, час: 6-7 діб. (К 2.1.1)

ТП 2.2 Підготовка середовища для посіву

Солодовий агар стерилізується в автоклаві (Tuttnauer 5075HSG [10]: об'єм 160 л, тиск до 2,5 атм) і розтоплюється у водяній бані (Julabo SW23: об'єм 20 л, температура 20–99,9 °С).

Критичні параметри:

- Стерилізація: 121 °С, 1,1 атм, 40 хв.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Температура розтоплення агару: 45–50 °С. (К 2.2.1)

ТП 2.3 Інкубація міцелію

Культури інкубуються до повного заростання середовища міцелієм у промисловому інкубаторі (Binder KB 720: об'єм 698 л, температурна стабільність $\pm 0,1$ °С).

Критичні параметри:

- Температура: 24 ± 1 °С, вологість: 60–70%, час: 6-7 діб. (К 2.3.1)

ТП 2.4 Оцінка морфології міцелію

Контроль якості міцелію проводиться за допомогою мікроскопії (Leica DM750: збільшення до 1000х; Zeiss Stemi 508: збільшення до 50х).

Критичні параметри:

- Відсутність контамінації (бактерії, цвіль).

- Наявність пошукового міцелію, пряжок, анастомозів. (К 2.4.1)

Стадія ТП 3: Твердофазне культивування та формування композиту

Інокуляція субстрату міцелієм та його культивування для створення біокомпозитної маси.

ТП 3.1 Підготовка субстрату

Тирса листяних порід (дуб, бук, береза), пшеничні висівки та кавове лушпиння змішуються і запарюються у промисловому запарювачі (Satrise Mushroom Equipment: продуктивність 5 т/год, температура до 100 °С).

Критичні параметри:

- Склад: 80% тирса, 15% висівки, 5% гіпс, 1% CaCO_3 .

- Вологість: $70 \pm 2\%$.

- Температура запарювання: 100 °С, 1–2 год. (К 3.1.1)

ТП 3.2 Стерилізація субстрату

Субстрат стерилізується в автоклаві (Systec НХ-1000: об'єм 1000 л, тиск до 3 атм).

Критичні параметри:

- Температура: 121 °С, тиск: $1,1 \pm 0,1$ атм, час: 40 хв. (К 3.2.1)

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

ТП 3.3 Інокуляція субстрату

Інокуляція проводиться в чистих кімнатах (Camfil Cleanroom: клас ISO 5, швидкість потоку 0,45 м/с, HEPA-фільтри H14) за допомогою автоматизованої системи змішування (Bühler Grain Mixer: продуктивність 500 кг/год, точність дозування $\pm 1\%$).

Критичні параметри:

- Температура субстрату: 24–25 °С.
- Кількість міцелію: 3–5% від маси субстрату.
- Рівень контамінації: <10 КУО/г. (К 3.3.1)

ТП 3.4 Інкубація посівного міцелію

Субстрат із міцелієм інкубується в камері (Binder KB 2400: об'єм 2400 л, температура 5–100 °С, вологість 10–90%, точність $\pm 0,1$ °С).

Критичні параметри:

- Температура: 24 ± 1 °С, вологість: 60–70%, час: 6–7 діб. (К 3.4.1)

Стадія ТП 4: Формування та стабілізація біокомпозиту

Ця стадія завершує формування кінцевого продукту.

ТП 4.1 Формування у форми

Інокульований субстрат розподіляється у форми за допомогою гідравлічного преса (Langzauner LZT-OK: тиск до 1000 кН, розмір платформи 2 м x 1,5 м).

Критичні параметри:

- Тиск пресування: 0,5–1 МПа.
- Залишення мікропор для дихання міцелію. (К 4.1.1)

ТП 4.2 Завершальна інкубація (структуроутворення)

Форми інкубуються в камерах для завершення структури (інкубаційна камера Binder KB 2400).

Критичні параметри:

- Температура: 24–25 °С, вологість: 60–70%, час: 3–5 діб. (К 4.2.1)

ТП 4.3 Термостабілізація матеріалу

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

Сушіння проводиться в сушильній камері (Mettler UFP 800: об'єм 800 л, температура 20–250 °С, точність $\pm 0,5$ °С).

Критичні параметри:

- Температура: 75 °С, час: 5-12 год, вологість кінцевого продукту: <10%. (К 4.3.1)

ТП 4.4 Охолодження та вилучення з форм

Біокомпозит охолоджується в камері (Liebherr GKPv 6570 [17]: об'єм 600 л, температура 0–25 °С, точність $\pm 0,5$ °С). Перевірка якості проводиться тестером міцності (ZwickRoell Z010: діапазон навантаження 0–10 кН, точність $\pm 0,5\%$).

Критичні параметри:

- Температура охолодження: 20–22 °С.
- Механічна міцність: $\geq 0,5$ МПа.
- Однорідність: відсутність тріщин, дефектів (візуальний контроль). (К 4.4.1)

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

3.4 Схеми виробництва

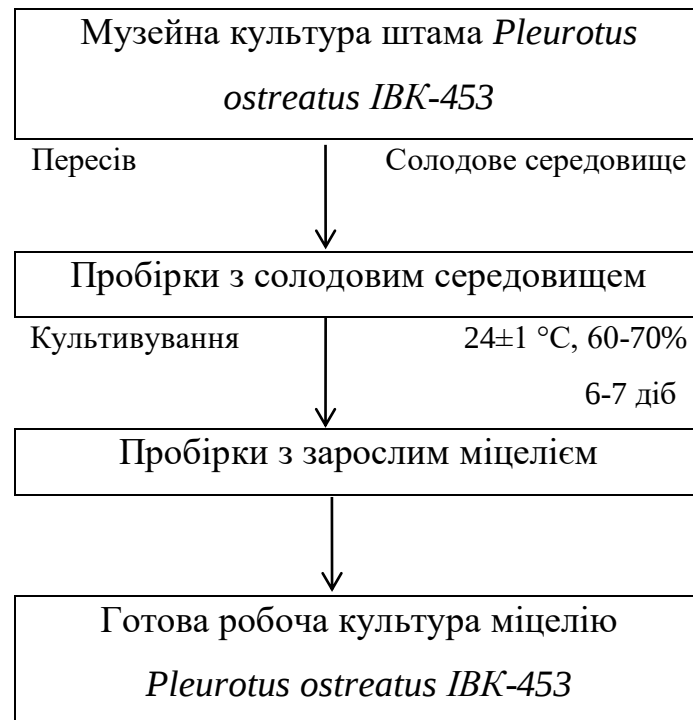


Рис. 3.3 – Біологічна схема отримання робочої культури *Pleurotus ostreatus*

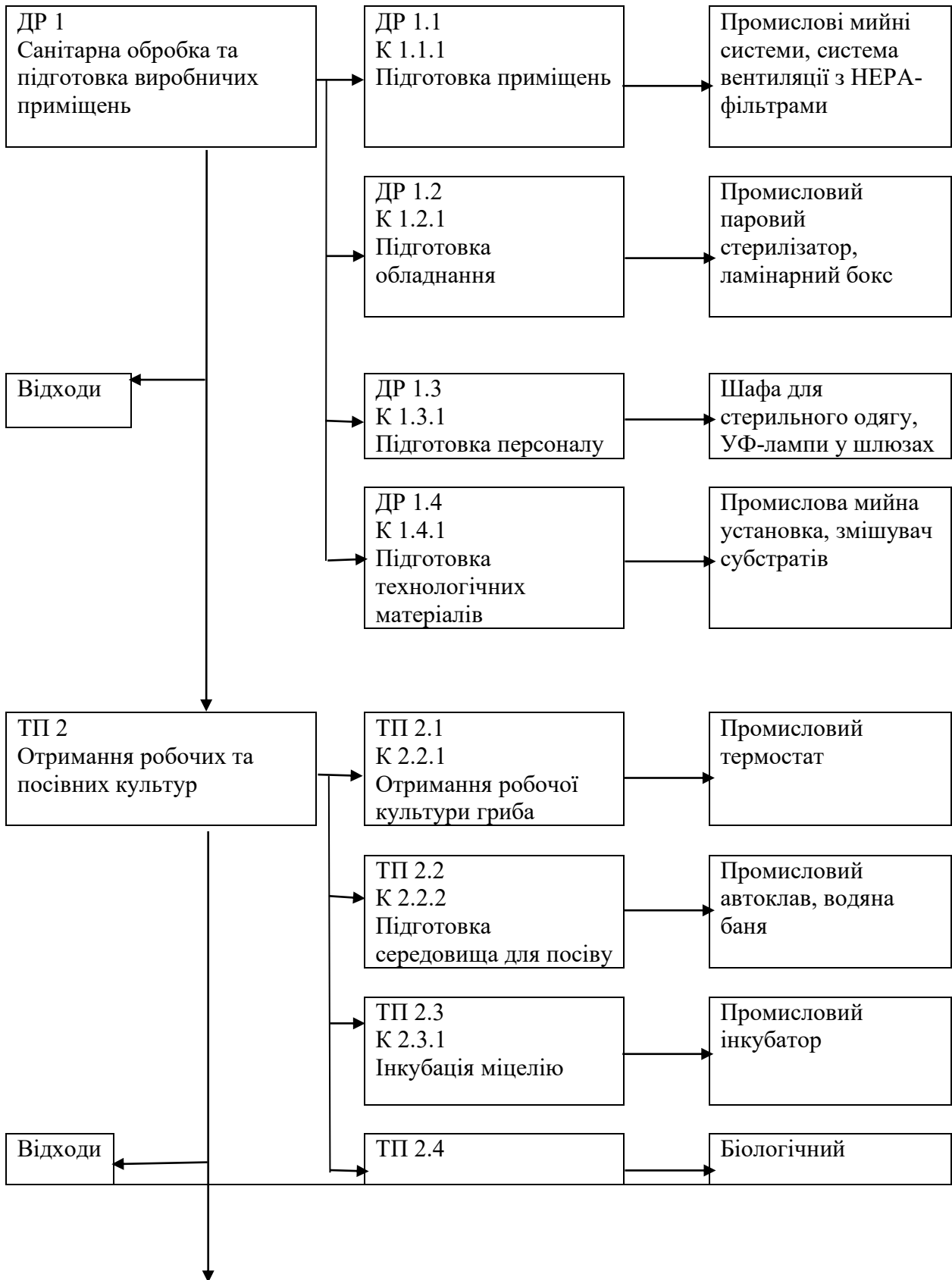




Рис. 3.4 – Технологічна схема виробництва біокомпозитного матеріалу на основі міцелію гриба *Pleurotus ostreatus*

3.5 Контроль виробництва

3.5.1 Критичні параметри виробництва

Контроль виробництва біокомпозитного матеріалу на основі міцелію *Pleurotus ostreatus* є ключовим етапом для забезпечення стабільної якості продукту при масштабуванні технології з лабораторних умов до промислового рівня. Адаптація розробленої в лабораторії технології до виробничих умов потребує чіткого визначення критичних точок на всіх стадіях процесу, моніторингу параметрів та застосування відповідних методів контролю. У цьому розділі описано критичні точки, параметри якості, одиниці виміру, критерії прийнятності та методи контролю для кожної стадії виробництва (табл. 3.1).

На всіх стадіях виробництва - від санітарної обробки приміщень до стабілізації кінцевого продукту - впроваджено контрольні точки для моніторингу асептичних умов, якості сировини, росту міцелію та характеристик біокомпозиту. Методи контролю включають візуальний огляд, мікробіологічний аналіз, мікроскопію, вимірювання температури, вологості, тиску, рН, а також тестування механічної міцності та однорідності. Контроль здійснюється відповідно до стандартних операційних процедур (СОП) з використанням промислового обладнання та лабораторних приладів.

Таблиця 3.1

Контроль критичних стадій і проміжної продукції

№	Критичні точки (стадії, операції)	Критичні параметри і характеристики якості	Одиниця виміру	Критерій прийнятності
1	ДР 1.1 Підготовка приміщень	Температура в цеху, вологість, рівень мікробного забруднення (К 1.1.1)	°C, %, КУО/м³	20–22 °C, 50–60 %, <100 КУО/м³
2	ДР 1.2 Підготовка обладнання	Умови стерилізації (К 1.1.2)	°C, атм, хв	121 °C, 1,1 атм, 40 хв
3	ДР 1.3 Підготовка персоналу	Дотримання протоколів входу до чистих зон (К 1.1.3)	-	Відсутність порушень СОП
4	ДР 1.4 Підготовка	Вологість тирси, рН	%, -	70 ± 2 %, рН

	технологічних матеріалів	(К 1.1.4)		6,5–7,0
5	ТП 2.1 Отримання робочої культури гриба	Температура, вологість, час інкубації (К 2.1.1)	°C, %, діб	24 ± 1 °C, 60–70 %, 6-7 діб
6	ТП 2.2 Підготовка середовища для посіву	Умови стерилізації, температура розтоплення агару (К 2.2.1)	°C, атм, хв, °C	121 °C, 1,1 атм, 40 хв, 45–50 °C
7	ТП 2.3 Інкубація міцелію	Температура, вологість, час (К 2.3.1)	°C, %, діб	24 ± 1 °C, 60–70 %, 6-7 діб
8	ТП 2.4 Оцінка морфології міцелію	Відсутність контамінації, наявність пошукового міцелію, пряжок, анастомозів (К 2.4.1)	-	Контамінація відсутня, морфологія відповідає нормі
9	ТП 3.1 Підготовка субстрату	Склад, вологість, температура запарювання (К 3.1.1)	%, °C, год	80 % тирса, 15 % висівки, 5 % гіпс, 1 % CaCO ₃ , 70 ± 2 %, 100 °C, 1–2 год
10	ТП 3.2 Стерилізація субстрату	Температура, тиск, час (К 3.2.1)	°C, атм, хв	121 °C, 1,1 ± 0,1 атм, 40 хв
11	ТП 3.3 Інокуляція субстрату	Температура субстрату, кількість міцелію, рівень контамінації (К 3.3.1)	°C, %, КУО/г	24–26 °C, 3–5 %, <10 КУО/г
12	ТП 3.4 Інкубація посівного міцелію	Температура, вологість, час (К 3.4.1)	°C, %, діб	24 ± 1 °C, 60–70 %, 6–7 діб
13	ТП 4.1 Формування у форми	Тиск пресування, наявність мікропор (К 4.1.1)	МПа, -	0,5–1 МПа, мікропори присутні
14	ТП 4.2 Завершальна інкубація	Температура, вологість, час (К 4.2.1)	°C, %, діб	24–25 °C, 60–70 %, 3 діб
15	ТП 4.3 Термостабілізація матеріалу	Температура, час, вологість кінцевого продукту (К 4.3.1)	°C, год, %	75 °C, 5-12 год, <10 %
16	ТП 4.4 Охолодження та вилучення з форм	Температура охолодження, механічна міцність, однорідність	°C, МПа, -	20–22 °C, ≥0,5 МПа, відсутність тріщин і дефектів

3.5.2 Методи контролю

ДР 1.1 Підготовка приміщень: Моніторинг температури та вологості за допомогою термогігрометрів (Testo 440), аналіз мікробного забруднення

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

аеробіологічним тестером (Sartorius MD8 Airscan), перевірка ефективності НЕРА-фільтрів та UVC-ламп.

ДР 1.2 Підготовка обладнання: Контроль умов стерилізації (температура, тиск, час) за протоколами автоклаву (Getinge HS66), перевірка залишків дезінфікуючих засобів ватними тампонами та мікробіологічним аналізом.

ДР 1.3 Підготовка персоналу: Візуальний контроль дотримання СОП, перевірка чистоти одягу мікробіологічним тестуванням (змиви з поверхонь одягу).

ДР 1.4 Підготовка технологічних матеріалів: Вимірювання вологості субстрату вологоміром (PCE-ММК 20), визначення рН за допомогою рН-метра (Hanna HI 2211).

ТП 2.1 Отримання робочої культури гриба: Контроль температури та вологості в термостаті (Mettmert IN750plus), фіксація часу інкубації.

ТП 2.2 Підготовка середовища для посіву: Перевірка умов стерилізації автоклавом (Tuttnauer 5075HSG), контроль температури розтоплення агару термометром.

ТП 2.3 Інкубація міцелію: Моніторинг температури та вологості в інкубаторі (Binder KB 720), візуальний огляд на контамінацію.

ТП 2.4 Оцінка морфології міцелію: Мікроскопічний аналіз (Leica DM750, Zeiss Stemi 508) для перевірки структури міцелію та відсутності контамінації.

ТП 3.1 Підготовка субстрату: Контроль складу та вологості субстрату (вологомір PCE-ММК 20), перевірка температури запарювання (термометр).

ТП 3.2 Стерилізація субстрату: Моніторинг параметрів автоклаву (Systec HX-1000) за температурою, тиском і часом.

ТП 3.3 Інокуляція субстрату: Вимірювання температури субстрату, контроль дозування міцелію (Bühler Grain Mixer), мікробіологічний аналіз на контамінацію.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ТП 3.4 Інкубація посівного міцелію: Контроль температури та вологості в камері (Binder KB 2400), фіксація часу заростання.

ТП 4.1 Формування у форми: Перевірка тиску пресування (Langzauner LZT-OK), візуальний контроль наявності мікропор.

ТП 4.2 Завершальна інкубація: Моніторинг температури та вологості в камері (Binder KB 2400), фіксація часу структуроутворення.

ТП 4.3 Термостабілізація матеріалу: Контроль температури та часу в сушильній камері (Memmert UFP 800), вимірювання вологості продукту (вологомір).

ТП 4.4 Охолодження та вилучення з форм: Вимірювання температури охолодження (Liebherr GKPy 6570), тестування механічної міцності (ZwickRoell Z010), візуальний контроль однорідності.

Таким чином, контроль виробництва охоплює всі стадії технологічного процесу, забезпечуючи відповідність параметрів заданим критеріям. Спільна робота з ТОВ «ІНЖЕНІУМ ГРУП» дозволила адаптувати лабораторну технологію до промислових умов, гарантуючи стабільність, якість та безпеку біокомпозитного матеріалу.

3.6 Аналіз екологічних аспектів

Виробництво біокомпозитного матеріалу на основі міцелію *Pleurotus ostreatus* має значний потенціал для екологічно дружнього підходу, оскільки використовує відходи лісопереробної промисловості та агропромислового комплексу. Однак певні аспекти процесу можуть впливати на довкілля.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.6.1 Аналіз екологічних аспектів виробництва біокомпозитного матеріалу та рішення щодо зменшення впливу на довкілля

ДР 1.1–ДР 1.4: Підготовчі стадії

Використання ресурсів: вологе прибирання приміщень (ДР 1.1) і промивання субстратів (ДР 1.4) потребують значної кількості води; дезінфікуючі засоби (70% етанол, перекис водню) можуть потрапляти у стічні води, створюючи хімічне навантаження.

Енергоспоживання: UVC-лампи (Philips TUV 30W) для дезінфекції повітря та промислові мийні системи (Kärcher IVR-L 100/24-2 Tc) споживають електроенергію.

Відходи: залишки мийних засобів і забруднена вода після промивання тирси.

ТП 2.1–ТП 2.4: Отримання робочих та посівних культур

Енергоспоживання: високе споживання електроенергії обладнанням - автоклав (Tuttnauer 5075HSG), водяна баня (Julabo SW23), промисловий термостат (Mettler IN750plus) - для стерилізації та інкубації.

Відходи: Потенційні залишки контамінованих культур, які потрібно утилізувати як біологічні відходи.

ТП 3.1–ТП 3.4: Твердофазне культивування

Використання ресурсів: субстрат (тирса, пшеничні висівки, кавове лушпиння) є відходами інших галузей, що позитивно, але запарювання (Satrie Mushroom Equipment) і стерилізація (Systec HX-1000) потребують води та енергії.

Емісії: виділення CO₂ під час росту міцелію (приблизно 0,1 л CO₂/кг/год, для 4023,65 кг субстрату — 402,37 л/год).

Відходи: контамінований субстрат після інокуляції (ТП 3.3) та інкубації (ТП 3.4) потребує безпечної утилізації.

ТП 4.1–ТП 4.4: Формування та стабілізація біокомпозиту

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

Енергоспоживання: високі витрати електроенергії на пресування (Langzauner LZT-OK), сушіння (Memmert UFP 800, 60–80 °C, 12–24 год) і охолодження (Liebherr GKРv 6570).

Емісії: випаровування вологи під час сушіння (з 70% до <10%) вивільняє водяну пару, а також можливі незначні органічні леткі сполуки від субстрату.

Відходи: залишки субстрату, дефекти біокомпозиту (тріщини, неоднорідності) після ТП 4.4.

Таким чином, серед позитивних екологічних аспектів виробництва можна виділити: використання відходів (тирса, висівки, кавове лушпиння) зменшує обсяги сміттєзвалищ; біокомпозит є біорозкладним, на відміну від синтетичних матеріалів; до негативних відносяться: високе енергоспоживання, водокористування, емісії CO₂, хімічне навантаження від дезінфектантів, потреба в утилізації контамінованих відходів.

3.6.2 Рішення для зменшення впливу на довкілля

1. Оптимізація водокористування через високе споживання води на стадіях ДР 1.1, ДР 1.4, ТП 3.1. Для цього можна запропонувати впровадити систему рециркуляції води: очищення стічних вод після промивання тирси та прибирання за допомогою фільтраційних систем (наприклад, мембранні фільтри зворотного осмосу, продуктивність 1 м³/год), або використовувати дощову воду для початкового промивання субстрату.

Розрахунок: припускаємо, що ДР 1.4 і ТП 3.1 потребують 10 м³ води для 5 т субстрату (2 л/кг). Рециркуляція 70% води: $V_{\text{збережено}} = 10 \text{ м}^3 \times 0,7 = 7 \text{ м}^3$ за серію. Економія складає 7 м³ води за серію, що також зменшує навантаження на каналізацію.

2. Зменшення енергоспоживання через високі витрати енергії на стерилізацію, інкубацію, сушіння. Як рішення можна запровадити: використовувати енергоефективне обладнання: замінити UVC-лампи на

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

LED-UVC (споживання 15 Вт замість 30 Вт); встановити сонячні панелі (потужність 100 кВт) для часткового живлення автоклавів, інкубаторів і сушильних камер; впровадити теплоутилізацію: тепло від сушіння (Memmert UFR 800) спрямовувати на підігрів води для запарювання (ТП 3.1).

Розрахуємо загальну економію заходів.

Споживання UVC-ламп: $30 \text{ Вт} \times 2 \text{ год} \times 1 \text{ лампа} = 0,06 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ за серію. 3 LED-UVC: $15 \text{ Вт} \times 2 \text{ год} = 0,03 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. Економія складає $0,03 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ за серію.

Сушіння (ТП 4.3): Припускаємо $10 \text{ кВт} \times 18 \text{ год} = 180 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на 349 кг. Теплоутилізація (50% ефективність): $90 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ заощаджено на завантаження, для 12 завантажень: $90 \times 12 = 1080 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ за серію.

Загальна економія: $1080 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ за серію, зниження викидів CO_2 (коефіцієнт $0,5 \text{ кг CO}_2/\text{кВт} \cdot \text{год}$) на 540 кг.

3. Управління емісіями через виділення CO_2 під час інкубації ($402,37 \text{ л/год}$, або $0,79 \text{ кг/год}$ за густиною CO_2 $1,96 \text{ г/л}$). Рішенням цієї проблеми можуть стати: встановлення системи уловлювання CO_2 (наприклад, абсорбція розчином моноетаноламіну, продуктивність 1 т/год); використання CO_2 для вирощування мікродоростей (*Chlorella spp.*) у біореакторах, які поглинають CO_2 і виробляють біомасу.

За 10 діб інкубації (ТП 3.4) для $4023,65 \text{ кг}$: $0,79 \text{ кг/год} \times 240 \text{ год} = 189,6 \text{ кг CO}_2$ за завантаження, для 12 завантажень: $189,6 \text{ кг} \times 12 = 2275,2 \text{ кг CO}_2$ за серію.

Уловлювання 80%: $2275,2 \text{ кг} \times 0,8 = 1820,16 \text{ кг CO}_2$ зменшено.

Мікродорості поглинають $1,8 \text{ кг CO}_2$ на 1 кг біомаси. Виробництво біомаси: $1820,16 \text{ кг} / 1,8 = 1011,2 \text{ кг}$ біомаси за серію, яку можна продати (біопаливо, корм).

4. Управління відходами – можна запропонувати компостування контамінованого субстрату в аеробних компостерах (продуктивність 1 т/добу) для створення добрив та переробку дефектного біокомпозиту

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

(тріщини, неоднорідності) шляхом подрібнення та повторного використання як наповнювача субстрату (до 10% маси).

Втрати субстрату (з матеріального балансу): 7482,08 кг за серію.
Контамінована частка (припускаємо 10%): 748,21 кг.

Компостування: 748,21 кг перетворюється на ~374 кг компосту (50% зменшення маси).

Повторне використання дефектів: 5% від 1239,39 кг продукту = 61,97 кг. Економія сировини: 61,97 кг за серію.

5. Екологічна сертифікація. Сертифікація процесу за стандартами ISO 14001 (екологічний менеджмент) та отримання маркування “Green Product” призведе до підтвердження сталості, підвищення ринкової привабливості, конкурентною перевагою.

Таким чином, виробництво біокомпозиту на основі міцелію має позитивний екологічний потенціал завдяки використанню відходів і біорозкладності продукту, але потребує оптимізації через високе енергоспоживання, водокористування, емісії CO₂ та відходи. Запропоновані рішення - рециркуляція води (економія 7 м³), енергоефективність і теплоутилізація (економія 1080 кВт·год, 540 кг CO₂), уловлювання CO₂ (зменшення 1820,16 кг), компостування та переробка відходів (374 кг компосту, 61,97 кг повторного використання) - значно знижують вплив на довкілля, підвищуючи екологічність і рентабельність виробництва.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

У результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблено та обґрунтовано технологічний процес виробництва біокомпозитного матеріалу на основі грибного міцелію *Pleurotus ostreatus*, адаптований до промислових умов українських підприємств. Лабораторна технологія, яка є власною розробкою кафедри біотехнології, успішно масштабована для промислового застосування за участі ТОВ «ІНЖЕНІУМ ГРУП».

1. Проведено аналіз наукових джерел та власні дослідження, які підтверджують, що міцелій *Pleurotus ostreatus* ефективно росте на органічних субстратах (тирса, висівки, гіпс, CaCO_3) за температури 24–25 °С, вологості 60–70 % і рН 6,5–7,0.

2. Міцелій *Pleurotus ostreatus* охарактеризовано як біооб'єкт із високою швидкістю росту, здатністю зв'язувати органічний субстрат і формувати міцну структуру. Фізіолого-біохімічні властивості, такі як ферментативна активність (лігнін- і целюлозорозщеплювальні ензими) та адаптивність до відходів лісопереробки, підтверджують його придатність для промислового виробництва біокомпозитів.

3. Розроблено послідовний технологічний підхід, що включає підготовку субстрату (склад: 80 % тирса, 15 % висівки, 5 % гіпс, 1 % CaCO_3), стерилізацію (121 °С, 1,1 атм, 40 хв), інокуляцію (3–5 % міцелію), інкубацію (24–25 °С, 6–7 діб), формування (тиск 0,5–1 МПа) і термостабілізацію (75 °С, 5–12 год). Цей підхід, базований на лабораторній технології кафедри біотехнології, адаптовано до промислових умов.

4. Підібрано обладнання: запарювач, автоклав, інокулятор, інкубатори, прес, сушильна камера. Розраховано, що для 4023,65 кг субстрату 4 інкубатори обробляють 3 завантаження кожен, забезпечуючи ефективність і масштабування.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Розроблено біологічну (ріст міцелію, ферментація субстрату), технологічну (послідовність стадій: підготовка, інокуляція, інкубація, формування, стабілізація) та апаратурну схеми, що відображають процес із параметрами: температура 24–25 °С, вологість 60–70 %, тиск 0,5–1 МПа, час інкубації 6-7 діб.

6. Визначено 16 критичних точок контролю (ДР 1.1–ТП 4.4), включаючи температуру (24–25 °С), вологість (60–70 %), рН (6,5–7,0), відсутність контамінації, механічну міцність ($\geq 0,5$ МПа). Розроблено заходи моніторингу: термогігрометри (Testo 440), мікроскопія (Leica DM750), тестування міцності (ZwickRoell Z010).

7. Виявлено позитивні аспекти (використання відходів, біорозкладність) і недоліки (енергоспоживання, емісії CO₂ 2275,2 кг/серію). Запропоновано рішення: рециркуляція води (економія 7 м³), теплоутилізація (економія 1080 кВт·год), уловлювання CO₂ (зменшення 1820,16 кг), компостування відходів (374 кг компосту), що знижує вплив на довкілля.

8. Запропоновано використання 4 інкубаторів для паралельної обробки, добавки (1–2 % глюкози) для скорочення інкубації до 5 діб, автоматизацію завантаження/вивантаження (з 0,5 до 0,1 год). Це скоротило час процесу з 196,24 діб до 41,21 діб (79 % зменшення), знизило витрати та підвищило рентабельність.

Таким чином, розроблена технологія, базована на власній лабораторній розробці кафедри біотехнології та адаптована до виробництва на вітчизняному підприємстві за участі ТОВ «ІНЖЕНІУМ ГРУП», забезпечує ефективне виробництво біокомпозиту (123,94 м² за серію), відповідає екологічним стандартам і підвищує конкурентоспроможність українських підприємств.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Грибівництво: навч. посібник / В. М. Кузьменко, І. М. Попович, О. В. Іванова [та ін.]; НУБіП України. Київ: НУБіП України, 2017. 250 с.
2. Мікробіологія: навч. посібник / І. П. Куліш, Л. О. Петренко, О. І. Вдовиченко [та ін.]; НМАПО ім. П. Л. Шупика. Київ: НМАПО ім. П. Л. Шупика, 2019. 280 с.
3. Мікробіологія з основами імунології та технікою мікробіологічних досліджень: підручник / О. І. Вдовиченко, О. В. Іванова, Л. О. Петренко [та ін.]; Львівська медична академія. Львів: Львівська медична академія, 2021. 312 с.
4. Переїма І. В., Іванова Т. В. Стимуляція росту видів гриба роду *Pleurotus* (Fr.) P. Kumm. на глюкозному живленні. // *Biotechnologia Acta*. – 2017. – Т. 10, № 6. – С. 45–52. – DOI: 10.15407/biotech10.06.045
5. Приходько П. С., Калюжная О. С., Хохленкова Н. В. Перспективи використання біорозкладних матеріалів як альтернативи пластику. Проблеми та досягнення сучасної біотехнології: матеріали IV міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., (22 березня 2024 р., м. Харків). Харків: НФаУ, 2024. С. 322–325.
6. Приходько П. С., Калюжная О. С. Створення біоматеріалу на основі грибного міцелію. Молодь і індустрія 4.0 в ХХІ столітті: матеріали ХХ Міжнародного форуму молоді (4–5 квітня 2024, м. Харків). Харків: Держ. біотехнол. ун-т, 2024. С. 292.
7. Приходько П. С. Виробництво текстилю з міцелію грибів. Актуальні питання створення нових лікарських засобів: мат. ХХХ міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів (17–19 квітня 2024 р., м. Харків). Харків: НФаУ, 2024. С. 170–171.
8. Приходько П. С. Перспективність організації виробництва

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

біоматеріалу на основі грибного міцелію. Youth Pharmacy Science: матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції (дата невідома, м. Харків). Харків: НФаУ, 2024. С.

9. Сидоров І. Ю., Влязло Р. І., Новіков В. П. Процеси і апарати мікробіологічних виробництв: підручник. Харків: ХНФаМ, 2020. 256 с.

10. Agaris: продукти для вирощування грибів. Електронний ресурс. URL:

<https://www.agaris.com/ukr/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82%D0%B8/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82%D0%B8-%D0%BA%D0%B0%D1%82/%D0%B3%D1%80%D0%B8%D0%B1%D0%B8>

11. Baumgartner R., Wyss T., Puchta H. DNA damage-induced cell death in bacteria: Lessons from eukaryotes. *Frontiers in Microbiology*. 2019. Т. 10. С. 3148. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2019.03148/full>.

12. Bhatnagar A., Barua A., Kothari V. K. Application of fungal mycelium as a sustainable resource for fabrication of lightweight composites: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5, Issue 1, Part A. P. 132–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.09.211>.

13. Culture process of *Pleurotus citrinopileatus*. a mycelium, b, c spawn, d compost, e, f open.... Електронний ресурс. URL: https://www.researchgate.net/figure/Culture-process-of-Pleurotus-citrinopileatus-a-mycelium-b-c-spawn-d-compost-e-f-open_fig1_364322431

14. Ecovative Design. Електронний ресурс. URL: <https://ecovative.com/>

15. Field and Forest Products. Strain Library – LE3790 Shiitake. Електронний ресурс. URL: <https://www.fieldforest.net/product/strain-library-LE3790-shiitake/FieldandForestProducts-Lentinula>

16. GBIF. *Lentinula edodes* (Berk.) Pegler. Електронний ресурс. URL: <https://www.gbif.org/species/11653314>

17. GBIF. *Pleurotus citrinopileatus* (Fr.) Singer. Електронний ресурс.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

URL: <https://www.gbif.org/species/2526530>

18. GBIF. *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. Електронний ресурс. URL: <https://www.gbif.org/species/2537743>

19. Gregori A., Pohleven M., Golic Grdadolnik Z. A pluralistic approach in the study of *Pleurotus* species, with emphasis on compatibility and physiology of the European morphotaxa. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*. 2008. Vol. 50, № 1. P. 25–34. URL: <https://www.researchgate.net/publication/223552361>

20. Kalra R., Conlan X. A., Goel M. Fungi as a Potential Source of Pigments: Harnessing Filamentous Fungi. *Frontiers in Chemistry*. 2020. Vol. 8. Article 369. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fchem.2020.00369/full> DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00369>.

21. Microscopic images of *Lentinula edodes* hypha (a) before and (b) after applying 5 kV/cm.... Електронний ресурс. URL: https://www.researchgate.net/figure/Microscopic-images-of-Lentinula-edodes-hypha-a-before-and-b-after-applying-5-kV-cm_fig14_327986144

22. Mushroom-based designs so sustainable + economical that they'll convert you into Mycelium advocates! / Yanko Design. 23.10.2021. Електронний ресурс. URL: <https://www.yankodesign.com/2021/10/23/mushroom-based-designs-so-sustainable-economical-that-theyll-convert-you-into-mycelium-advocates/>

23. Mycelium. Електронний ресурс. URL: <https://www.biohm.co.uk/mycelium?pgid=lgovcsbe-4662fbfb-f38b-4435-ade8-52828ba85c4a>

24. Oyster Mushroom – *Pleurotus ostreatus*. Електронний ресурс. URL: <https://www.first-nature.com/fungi/pleurotus-ostreatus.php>

25. *Pleurotus citrinopileatus* – Golden Oyster Mushroom. Електронний ресурс. URL: <https://www.shroomery.org/9404/Pleurotus-citrinopileatus>

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

26. *Pleurotus ostreatus* DSM 11191 v1.0. Електронний ресурс. URL: https://mycocosm.jgi.doe.gov/PleosDSM11191_1/PleosDSM11191_1.home.html?utm_source

27. *Pleurotus ostreatus*, commonly known as the oyster mushroom. *P. ostreatus* mycelial growth.... Електронний ресурс. URL: https://www.researchgate.net/figure/Pleurotus-ostreatus-commonly-known-as-the-oyster-mushroom-P-ostreatus-mycelial-growth_fig1_361056782

28. Prykhodko P., Kaliuzhnaia O., Khokhlenkova N. Biomaterials based on fungi mycelium in the concept of sustainable development. European dimensions of sustainable development: VI International conference under the support of Erasmus+ projects (15–17 травня 2024, м. Київ). Київ: [б. в.], 2024. Р. 39.

29. Rangel M. C., Anderson L. A., Steele D. A. Nutritional and Health Benefits of Shiitake Mushrooms. *Frontiers in Nutrition*. 2023. Vol. 10. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/nutrition/articles/10.3389/fnut.2023.1279208/full> DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1279208>.

30. Soto-Cruz O., Saucedo-Castañeda G., Pablos-Hach J. L., Gutiérrez-Rojas M., Favela-Torres E. Effect of substrate composition on the mycelial growth of *Pleurotus ostreatus*. An analysis by mixture and response surface methodologies // *Process Biochemistry*. 1999. Vol. 35. P. 127–133. DOI: 10.1016/S0032-9592(99)00043-6.

31. Sharma M., Manoharlal R. Mycelium-based composite materials: future sustainable biomaterials for architecture and design. *Journal of Bacteriology & Mycology: Open Access*. 2019. Т. 9, № 2. С. 37–40. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6955906/>.

32. Shiitake Mushroom Growing Guide. Електронний ресурс. URL: <https://unicornbags.com/cultivation/lentinula-edodes/>.

33. Valverde M. E., Hernández-Pérez T., Paredes-López O. Edible Mushrooms: Improving Human Health and Promoting Quality Life. *International Journal of Microbiology*. 2015. Vol. 2015, Article ID 376387. URL:

<https://www.hindawi.com/journals/ijmicro/2015/376387/>

DOI:

<https://doi.org/10.1155/2015/376387>.

34. A Ukrainian startup has developed eco-friendly packaging made from hemp and mushroom mycelium / The Odessa Journal. 28.03.2025. Електронний ресурс. URL: <https://odessa-journal.com/a-ukrainian-startup-has-developed-eco-friendly-packaging-made-from-hemp-and-mushroom-mycelium>.

					162.01.15.00 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

ДОДАТКИ



ГРАМОТА
нагороджується

**Поліна
ПРИХОДЬКО**

за участь у конкурсі
"Кращий студент НФаУ 2024"
номінація
"Студент-винахідник"

В.о. ректора НФаУ,
д. фарм. н., проф.



Алла КОТВИЦЬКА

27 червня
2024 р.
м. Харків
Україна



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ДИПЛОМ

за перемогу у Всеукраїнському конкурсі
на кращу наукову роботу за напрямком
133 "Галузеве машинобудування"
у номінації:

*"Найкращий науковий внесок у розробку та оптимізацію
енергоефективних технологій у машинобудуванні"*

НАГОРОДЖУЄТЬСЯ

Приходько П.С.

Національний фармацевтичний університет

за наукову роботу:
СТВОРЕННЯ БІОМАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ
ГРИБНОГО МІЦЕЛІЮ.

Декан факультету
мехатроніки та інжинірингу



Вадим БРЕДИХІН

Наказ
від 12.04.2024 р № 01-01/155



МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ФАРМАЦЕВТИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ДИПЛОМ I СТУПЕНЯ

нагороджується

Приходько Поліна

у секційному засіданні студентського наукового товариства кафедри
біотехнології

XXX Міжнародна науково-практична
конференція молодих вчених та студентів
**"Актуальні питання створення нових
лікарських засобів"**

В.о. ректора
Національного фармацевтичного
університету



Алла КОТВИЦЬКА

17-19 квітня 2024 р.
м. Харків



BIOMATERIALS BASED ON FUNGI MYCELIUM IN THE CONCEPT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Polina Prykhodko*, Olha Kaliuzhnaia, Natalya Khokhlenkova

National University of Pharmacy, Kharkiv, Ukraine

**Speaker: polinaprihodko30@gmail.com*

Materials based on fungi mycelium are being actively implemented today as an alternative to resource- and energy-consuming and quite often environmentally harmful production of textile, construction and other types of materials. Today, on the basis of fungi mycelium, the production of furniture and interior items, tableware, mycoleather and fabrics, accessories, building composite and polymer materials, and packaging materials is implemented. Artists and designers are adapting this new material to create a variety of eco-friendly products, such as the MarsBoot shoes designed by Liz Ciocajlo and Maurizio Montalti, the MycoComposite pot and transport boxes designed by Ecovative, the ecological lamp and the Sinewave panel by Krown led by Eric Klarenbeek. Temporary architectural installations are also realized by designers using mycelium, one such example being the Hy-Fi Tower by David Benjamin of The Living, New York Architects, which opened at the MoMA PS1 exhibition space in New York (Andrew, & Dhakal, 2022). Ukraine also has innovators in this field, for example, the Ukrainian startup S.Lab, which produces ecological materials based on technical hemp and fungi.

Biomaterials based on fungi mycelium are being developed at the Department of Biotechnology of the National University of Pharmacy, in particular as packaging materials, interior items, tableware, and building materials. Cultures of higher basidial fungi of the genera *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus citrinopileatus*, and *Lentinula edode* are used as research objects. The process of creating a biomaterial is based on solid-phase surface cultivation on the substrate, forming a mixed substrate with mycelium in the forms of the future product, growing under optimal conditions and baking the substrate in order to stop the growth of the mycelium and give the product strength (Zubkov, 2023). Cellulose-containing raw materials were used as the main substrate - oak sawdust, coffee husks, wheat seeds, which, firstly, acts as a model of the nutrient environments of mushrooms in nature, and secondly, is waste from other industries, which allows us to attribute the production of products to secondary processing industries, - also, they are cheap and available in our region. As mineral additives, gypsum and calcium carbonate were added to the substrate, which also give strength to the finished product, and wheat flour was used as an organic additive. Nowadays, this technology has been used to produce products based on fungi mycelium, and studies are being conducted to study the properties of the products.

References:

- Andrew, J. J., & Dhakal, H. N. (2022). Sustainable biobased composites for advanced applications: recent trends and future opportunities – A critical review. *Composites Part C: Open Access*, 7, 100220.
- Zubkov, O. (2023, April 19-21). Research on the development of a biomaterial based on fungal mycelium using molds. In *Current issues in the development of new pharmaceuticals*, 211-213 [in Ukrainian].



Міністерство
охорони здоров'я
України

Національний
фармацевтичний
університет

ДИПЛОМ I СТУПЕНЯ

нагороджується

**Поліна
Приходько**

секційне засідання
кафедра біотехнології

V Всеукраїнська науково-практична
конференція з міжнародною участю

YOUTH PHARMACY SCIENCE



10-11 грудня 2024 р.,
м. Харків, Україна

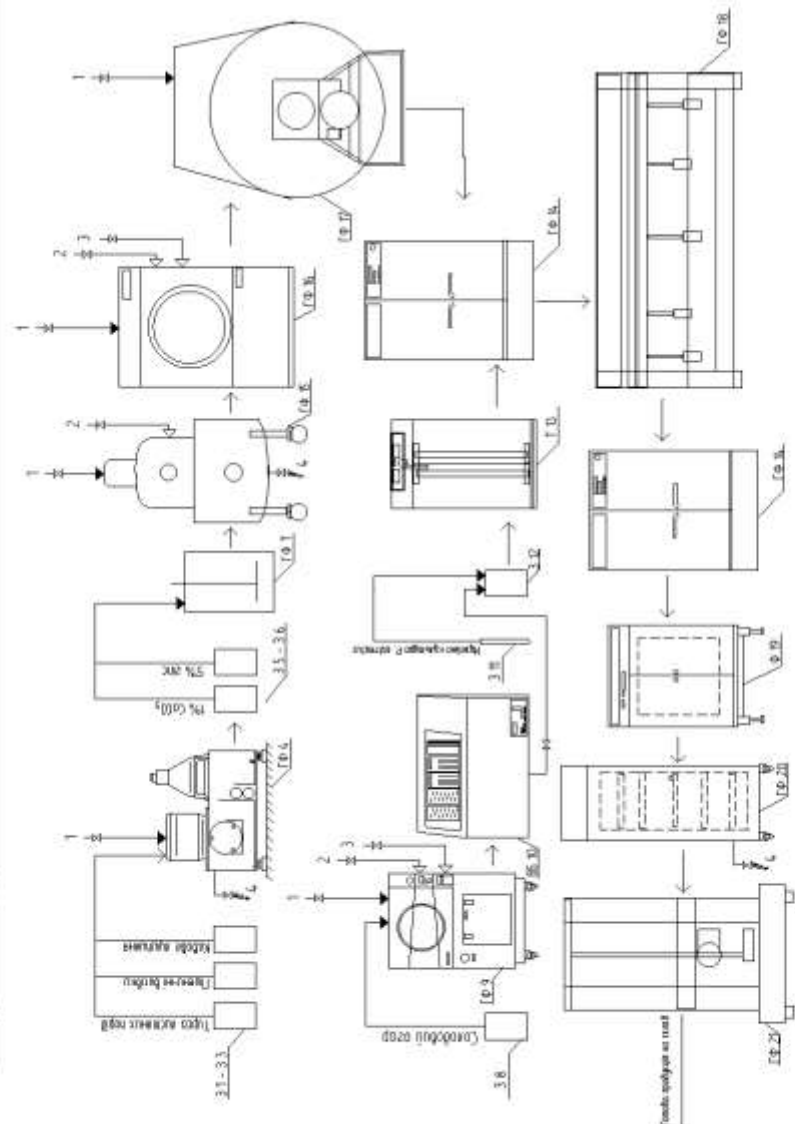


В.о. ректора НФаУ,
д. фарм. н., проф.

Алла КОТВИЦЬКА

№2.01.5.00.000.03

- 1 Вода, очищенная
- 2 Пар
- 3 Сжатый воздух



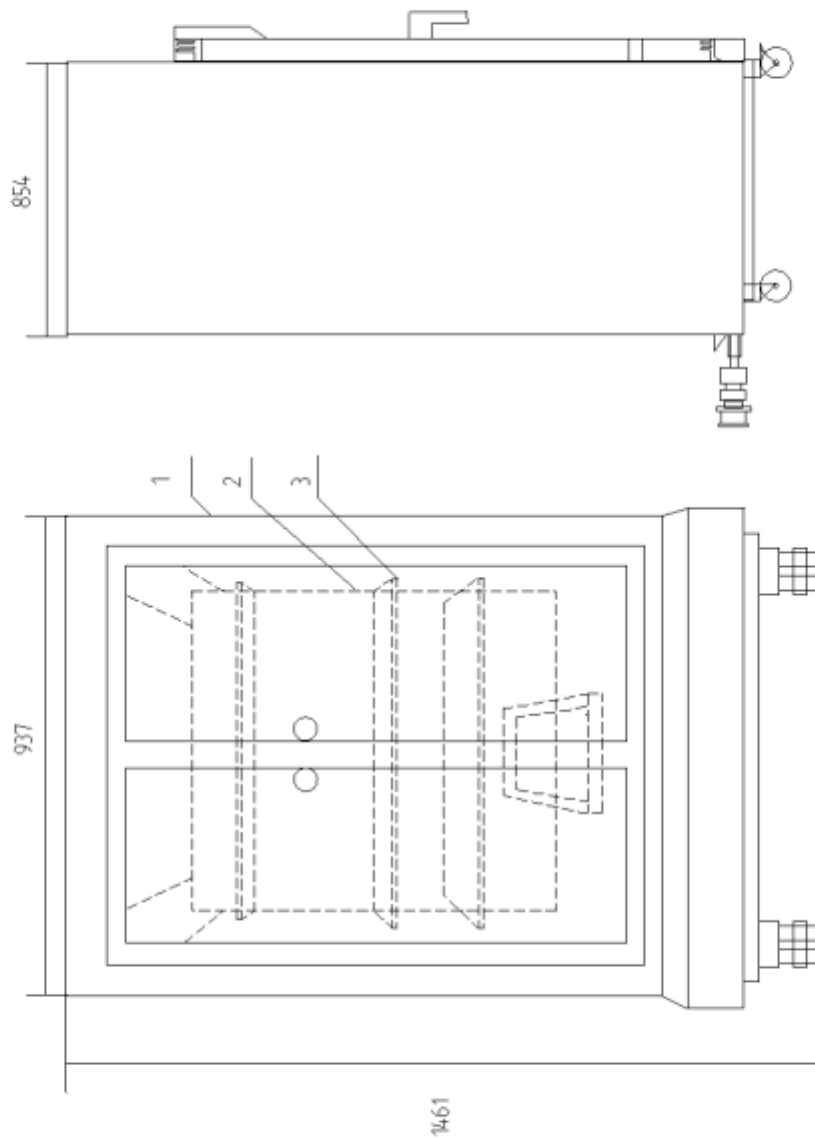
4 Канализация

Таблица параметров

Параметр	Единица измерения	Значение
1	л/с	10
2	л/с	10
3	л/с	10
4	л/с	10
5	л/с	10
6	л/с	10
7	л/с	10

Параметр	Единица измерения	Значение
1	л/с	10
2	л/с	10
3	л/с	10
4	л/с	10
5	л/с	10
6	л/с	10
7	л/с	10

№	Имя	Время
1	Имя	Время
2	Имя	Время
3	Имя	Время
4	Имя	Время
5	Имя	Время
6	Имя	Время
7	Имя	Время

Перелік складових частин

Заголовок	Пояснения	Наименования	№ строки
1		Корпус	1
2		Верхняя	2
3		Полок	3

[illegible]