

UDC 579.222:582.284:577.152.3

DOI: 10.58407/bht.2.26.19



Copyright (c) 2026 Pavlo Zubyk, Inna Klechak

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Павло Зубик, Інна Клечак

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УМОВ КУЛЬТИВУВАННЯ
TRAMETES HIRSUTA IBK 1569 ДЛЯ ОТРИМАННЯ ПЕКТИНЕСТЕРАЗИ
ЯК ЧАСТИНИ ПЕКТИНОЛІТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ



Pavlo Zubyk, Inna Klechak

STUDY OF THE INFLUENCE OF CULTIVATION CONDITIONS OF
TRAMETES HIRSUTA IBK 1569 FOR OBTAINING PECTINESTERASE
AS PART OF THE PECTINOLYTIC COMPLEX

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Дослідити умови біосинтезу пектинестерази штамом *Trametes hirsuta* IBK 1569 за умов глибинного культивування.

Методологія. Досліджували вплив тривалості культивування, лігноцелюлозних відходів як джерел вуглецю, їх концентрації та розміру частинок, джерела і концентрації азоту, початкового значення pH середовища, швидкості перемішування та кількості посівного матеріалу на пектинестеразну активність у культуральній рідині *T. hirsuta* IBK 1569. Активність ферменту визначали титриметрично.

Наукова новизна. Встановлено особливості впливу основних параметрів глибинного культивування на синтез пектинестерази *Trametes hirsuta* IBK 1569. Найвище числове значення ПЕА зафіксовано на 9 добу культивування, після чого спостерігалася тенденція до її зниження. Серед досліджених лігноцелюлозних відходів найбільш ефективним джерелом вуглецю був буряковий жом, тоді як мандаринові шкірки забезпечували статистично подібний рівень активності. Найбільш сприятлива концентрація бурякового жому становила 10 г/дм³. Максимальне числове значення ПЕА отримано для частинок бурякового жому розміром 3–5 мм, однак у діапазоні 1–7 мм статистично достовірних відмінностей не встановлено. Високі значення активності забезпечували сечовина, солі амонію, калій нітрат та пептон; для амоній сульфату найбільш сприятливою була концентрація 1,5 г/дм³. Найсприятливішим початковим значенням pH було 6,0. Числове зниження ПЕА спостерігалася вже при 140 об/хв, тоді як за швидкості 160 об/хв і вище активність була статистично достовірно нижчою. Кількість посівного матеріалу в діапазоні 2,5–10 % істотно не впливала на ПЕА.

Висновки. Отримані результати свідчать про доцільність використання бурякового жому для біосинтезу пектинестерази *T. hirsuta* IBK 1569 та можуть бути використані для оптимізації біотехнологічних процесів одержання пектинолітичних ферментів.

Ключові слова: естераза, глибинне культивування, активність ферменту, лігноцелюлозні відходи, параметри культивування

ABSTRACT

Aim of the study. To investigate the conditions for the biosynthesis of pectinesterase by the *Trametes hirsuta* strain IBK 1569 under submerged culture conditions.

Methodology. The effects of cultivation duration, lignocellulosic waste as a carbon source, its concentration and particle size, nitrogen source and concentration, initial medium pH, stirring rate and inoculum quantity on pectinesterase activity in the culture broth of *T. hirsuta* IBK 1569 were investigated. Enzyme activity was determined titrimetrically.

Scientific novelty. The peculiarities of the influence of the main parameters of deep cultivation on the synthesis of pectinesterase *Trametes hirsuta* IBK 1569 were established. The highest numerical value of PEA was recorded on the 9th day of cultivation, after which a tendency to its decrease was observed. Among the studied lignocellulosic wastes, the most effective source of carbon was beet pulp, while tangerine peels provided a statistically similar level of activity. The most favorable concentration of beet pulp was 10 g/dm³. The maximum numerical value of PEA was obtained for beet

pulp particles with a size of 3–5 mm, however, no statistically significant differences were established in the range of 1–7 mm. High activity values were provided by urea, ammonium salts, potassium nitrate and peptone; for ammonium sulfate, the most favorable concentration was 1.5 g/dm³. The most favorable initial pH value was 6.0. A numerical decrease in PEA was observed already at 140 rpm, while at speeds of 160 rpm and above the activity was statistically significantly lower. The amount of seed material in the range of 2.5–10 % did not significantly affect PEA.

Conclusions. The results obtained demonstrate the feasibility of using beet pulp for the biosynthesis of pectinesterase by *T. hirsuta* IBK 1569 and may be utilised to optimise biotechnological processes for the production of pectinolytic enzymes.

Keywords: esterase, submerged cultivation, enzyme activity, lignocellulosic waste, cultivation parameters

Вступ

Пектинестераза, або пектинметилестераза (ЕС 3.1.1.11), належить до ферментів пектинолітичного комплексу та каталізує деестерифікацію пектинових речовин клітинної стінки рослин. Основним субстратом ферменту є пектин – складний полісахарид, основу якого становлять залишки D-галактуранової кислоти, частина карбоксильних груп яких естерифікована метанолом.

Пектинметилестераза гідролізує метилові естери пектину з утворенням деметоксильованого пектину та метанолу, змінюючи ступінь естерифікації полімеру, його заряд, розчинність і здатність до подальшого ферментативного розщеплення (Jayani et al., 2005; Manmohit Kalia, 2015).

Для пектинметилестерази є важливою для функціонування всього пектинолітичного комплексу, оскільки деметильований пектин стає більш доступним для полігалактуронази і пектатліази. Завдяки цьому фермент бере участь у деструкції пектинових речовин рослинної сировини та має практичне значення для харчової і переробної промисловості (Garg et al., 2016). Пектинолітичні ферменти, в тому числі естерази, широко застосовують для освітлення фруктових і овочевих соків, зниження в'язкості пектинвмісних розчинів, підвищення виходу соку, покращення фільтрації та переробки рослинної сировини (Sharma et al., 2017).

До синтезу пектинметилестераз здатні рослини, бактерії, дріжджі та гриби, однак саме грибні продуценти становлять значний інтерес для біотехнології завдяки здатності синтезувати позаклітинні пектинолітичні ферменти (Thakur et al., 2021). Найбільш дослідженими продуцентами пектинази є мікроміцети родів *Aspergillus* і *Penicillium*.

Для них показано, що рівень синтезу пектинметилестерази істотно залежить від складу поживного середовища, джерел вуглецю й азоту, початкового pH, температури та тривалості культивування (Mandhania et al., 2009; Pili et al., 2018).

Використання пектинвмісних рослинних субстратів, зокрема агропромислових відходів, є перспективним підходом до здешевлення поживних середовищ і підвищення економічної доцільності отримання ферментних препаратів. Зокрема, цитрусові вичавки та інші рослинні відходи можуть виконувати роль як джерела вуглецю, так і індукторів синтезу пектинолітичних ферментів (Embaby et al., 2014; Kaissar et al., 2025; Mandhania et al., 2009; Pili et al., 2018; Shrestha et al., 2021).

Порівняно з мікроміцетами, базидієві макроміцети як продуценти пектинестерази вивчені значно менше, що було встановлено в нашому попередньому дослідженні (Zubyk et al., 2026c). Водночас результати геномних, транскриптомних і протеомних досліджень свідчать про наявність у представників *Basidiomycota* розвинених ферментних систем, залучених до деструкції пектинової складової рослинної клітинної стінки. Так, у секретах дереворуйнівних базидіоміцетів *Ceriporiopsis subvermispora*, *Gloeophyllum trabeum*, *Phanerochaete chrysosporium* та *Schizophyllum commune* були ідентифіковані пектинметилестерази родини CE8 поряд з іншими пектинолітичними ферментами (Zhu et al., 2016). Дослідження, присвячені синтезу пектинестерази базидієвими макроміцетами, є поодинокими. Деякі наявні роботи стосуються дослідження отримання пектинестерази *Fomitopsis cytisina* (Miyairi et al., 2001), *Schizophyllum commune* (Mehmood et al., 2019) і *Stereum purpureum* (Miyairi et al., 2002).

Особливий інтерес становлять представники роду *Trametes*, які відомі як активні продуценти ферментів деструкції рослинної біомаси та можуть бути перспективними об'єктами для отримання пектинолітичних ферментів (Iandolo et al., 2011; Shakhova et al., 2011; Vršanská et al., 2017). Для *Trametes trogii* показано, що склад джерел вуглецю й азоту, концентрація пектину, початковий рН та інші параметри культивування істотно впливають на продукцію позаклітинних пектинолітичних ферментів (Levin & Forchiassin, 1998). Для *T. versicolor* сучасні секретомні дослідження також підтверджують синтез ферментів, залучених до деградації пектинових речовин, хоча склад пектинолітичної системи та профіль секреції істотно залежать від виду гриба і стадії освоєння рослинного субстрату (Presley et al., 2018).

Для *T. hirsuta* IBK 1569 раніше була підтверджена здатність до синтезу пектинестерази та інших пектинолітичних ферментів за умов глибинного культивування, що стало підставою для подальшого дослідження цього штаму як потенційного продуцента пектинолітичного комплексу (Zubyk et al., 2026b). Однак систематичних даних щодо впливу умов культивування на синтез пектинестерази *T. hirsuta* IBK 1569 досі не було представлено. Це визначає наукову новизну й актуальність цього дослідження.

Мета роботи: дослідити вплив основних параметрів культивування на синтез пектинестерази грибом *Trametes hirsuta* 1569 у глибинній культурі.

Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження. У роботі використано штам *Trametes hirsuta* 1569, отриманий з Колекції шапинкових грибів Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України (ІБК) (Bisko et al., 2024). Культуру підтримували на агаризованому ячмінно-солодовому екстракті (8° за Баллінгом) за температури 4 °C.

Підготовка посівного матеріалу. Посівний матеріал вирощували у колбах об'ємом 250 см³ у 50 см³ глюкозо-пептоно-дріжджового середовища згідно з (Bondaruk et al., 2025) за температури (28 ± 2) °C упродовж 7 діб.

Базові умови культивування. Базове поживне середовище складалося з (г/дм³): пектин (10,0), NH₄NO₃ (1,0), KH₂PO₄ (1,0), MgSO₄×7H₂O (0,5), FeSO₄×7H₂O (0,005), ZnSO₄×7H₂O (0,0044), CaCl₂ (0,0055), вихідне рН – 6,5. Середовище автоклаували за 121 °C протягом 15 хв (Danylyak et al., 1989). Глибинне культивування здійснювали у колбах Ерленмейера об'ємом 250 см³ з 50 см³ середовища без перемішування за температури 28 °C.

Підбір умов культивування. Умови культивування підбирали послідовно методом «один фактор за раз» (one-factor-at-a-time, OFAT) для максимізації виходу пектинестерази (Oumer & Abate, 2017). Дослідження було спрямоване на встановлення впливу окремих факторів та визначення сприятливих умов синтезу пектинестерази як складової пектинолітичного комплексу *T. hirsuta* IBK 1569, а не на визначення оптимальної комбінації параметрів виключно за пектинестеразною активністю. На кожному етапі змінювали лише один параметр, тоді як інші фактори підтримували на рівнях, визначених як оптимальні на попередніх етапах цього дослідження. Концентрацію солей KH₂PO₄, MgSO₄×7H₂O, FeSO₄×7H₂O, ZnSO₄×7H₂O, CaCl₂ і температуру культивування встановлювали на вихідному рівні. Параметри змінювали в наступному порядку: тривалість культивування, джерело вуглецю, його концентрація та розмір, джерело азоту, його концентрація, вихідний рівень рН, швидкість перемішування та кількість внесення посівного матеріалу.

За відсутності статистично достовірних відмінностей між декількома рівнями фактора (р > 0,05) для наступних серій використовували один із рівнів статистично однорідної групи. В окремих випадках, коли рівень фактора, що забезпечував максимальне значення пектинестеразної активності, не збігався з умовами, сприятливими для синтезу інших складових пектинолітичного комплексу цього штаму, для наступних скринінгових серій використовували компромісний робочий рівень з урахуванням раніше встановлених і опублікованих результатів (Zubyk et al., 2026a; Zubyk & Klechak, 2026). Тому максимальні значення, встановлені для окремих факторів, розглядали як фермент-специфічні, тоді як

рівні, використані на наступних етапах, - як робочі умови скринінгу комплексного пектинолітичного препарату.

Тривалість культивування. Для визначення оптимальної тривалості культивування колби інкубували у базовому поживному середовищі за початкових умов протягом 1–21 діб з кроком 2 доби. Подальші культивування проводили протягом оптимальної тривалості, визначеної в цьому досліді.

Джерело вуглецю, його розмір та концентрація. Сільськогосподарські та промислові відходи оцінювали як альтернативні джерела вуглецю за концентрації 1 % (мас./об. сухої маси): буряковий жом, виноградні вичавки, гранатові шкірки, дробина ячмінно-житня, дробина ячмінно-пшенична, мандаринові шкірки, шкірки помело, яблучні вичавки. Відходи сушили за температури 60 °С, подрібнювали до розміру 0–1 мм. Визначене оптимальне джерело вуглецю використовували для подальших досліджень. Концентрацію обраного джерела вуглецю визначали шляхом культивування базидієвого макроміцета на поживному середовищі з різним вмістом цього компонента: від 5 г/дм³ до 35 г/дм³ з кроком 5 г/дм³. Оптимальну концентрацію джерела вуглецю використовували у подальших дослідженнях. Розмір частинок обраного джерела вуглецю підбирали, використовуючи такі фракції: 0–1 мм, 1–3 мм, 3–5 мм, 5–7 мм та 7–10 мм. Визначений оптимальний розмір частинок джерела вуглецю використовували у подальших дослідженнях.

Джерело та концентрація азоту. Якісний склад джерела азоту перевіряли за концентрації 1 % (мас./об.). В цьому дослідженні використовували наступні речовини: KNO₃, (NH₄)₂SO₄, NH₄NO₃, Ca(NO₃)₂, казеїн, сечовина, дріжджовий екстракт, пептон. Концентрацію обраного джерела азоту визначали шляхом культивування базидієвого макроміцета на поживному середовищі з різним вмістом цього компонента: від 0,5 г/дм³ до 3,0 г/дм³ з кроком 0,5 г/дм³. Оптимальну концентрацію джерела азоту використовували у подальших дослідженнях.

pH середовища. Вихідне значення pH поживного середовища після автоклавування складало 5,8–6,1. Перед початком

культивування його встановлювали на рівні від 3,0 до 9,0 з кроком 1,0 на оптимальному складі середовища. Визначене оптимальне значення pH використовували у подальших дослідженнях.

Швидкість перемішування. Швидкість перемішування змінювали від 100 до 200 об/хв з кроком 20 об/хв на орбітальному шейкері. Визначене оптимальне значення швидкості перемішування використовували у подальших дослідженнях.

Кількість внесеного посівного матеріалу. Посівний матеріал вносили в кількості 1 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 % та 10 % (об./об.). Встановлювали оптимальне значення кількості посівного матеріалу.

Визначення активності ферменту. Для визначення активності пектинестерази в культуральній рідині використовували 1 % розчин пектину. За одиницю пектинестеразної активності (ПМЕ, од) приймали таку кількість ферменту, що каталізує утворення 1 мкЕк кислоти за хвилину (Dudka et al., 1982).

Після цього розраховували відносну активність пектинестерази за формулою (Oumer & Abate, 2018):

$$вПЕА = \frac{ПЕА}{\max(ПЕА)} \cdot 100\%$$

Статистична обробка. Статистичну обробку даних проводили, використовуючи критерій Дункана. Усі експерименти виконувалися в трьох повторностях, результати представлені у вигляді $M \pm m$ (середнє значення $\pm$ стандартне відхилення), отриманих за трьома вимірюваннями ($n = 3$). Результати вважалися статистично відмінними при значенні $p\text{-value} < 0,05$. Літери a, b, c, d... вказують на відмінності між даними: $p < 0,05$ за критерієм Дункана.

Обробку даних і побудову графіків здійснювали за допомогою програмного забезпечення Excel (США).

Результати дослідження та обговорення

Динаміку синтезу пектинестерази штамом *Trametes hirsuta* 1569 досліджували упродовж 21 доби культивування у базовому поживному середовищі (рис. 1).

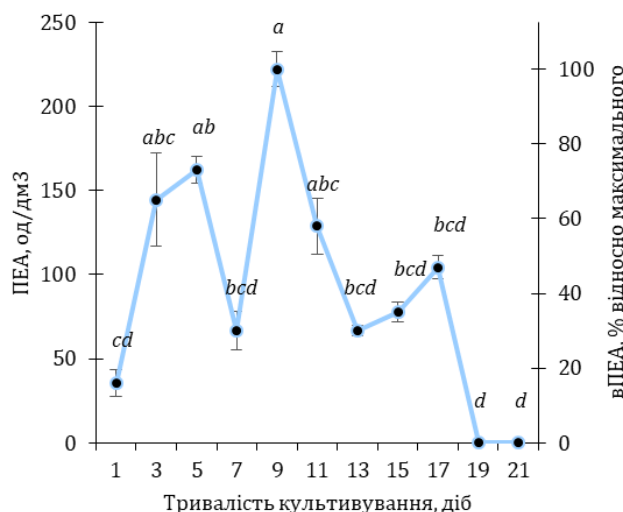


Рис. 1. Динаміка синтезу пектинестерази *Trametes hirsuta* 1569.

Примітка: Різні літери позначають статистично достовірні відмінності між середніми значеннями за критерієм Дункана при $p < 0,05$

Активність ферменту значно коливалася в процесі росту міцелію та досягала максимуму на 9 добу культивування ($222,2 \pm 10,1$ од./дм³). Подальше культивування супроводжувалося зниженням значень ПЕА. З огляду на отримані

результати, у подальших дослідженнях тривалість культивування складала 9 діб.

Вплив лігноцелюлозних відходів як джерел вуглецю, їх концентрації та розміру на синтез ПЕ *Trametes hirsuta* 1569 наведено на рис. 2.

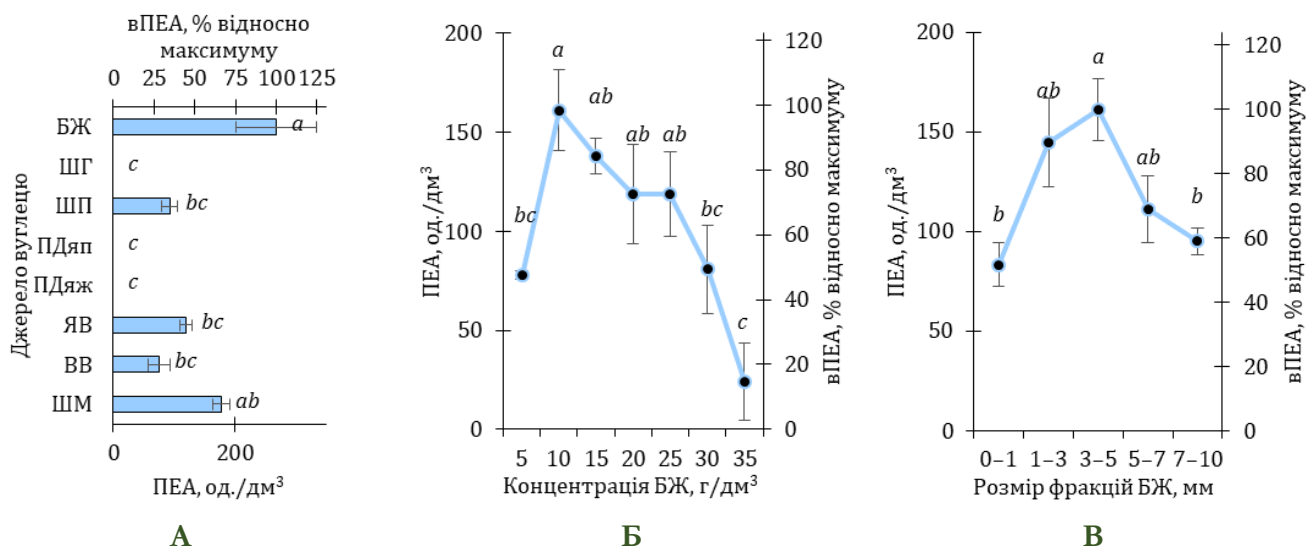


Рис. 2. Вплив параметрів джерела вуглецю на синтез пектинестерази *Trametes hirsuta* ІВК 1569. А – тип джерела вуглецю; Б – концентрація джерела вуглецю; В – розмір частинок субстрату

Примітка: БЖ – буряковий жом, ШГ – шкірки гранату, ШП – шкірки помело, ПДяп – пивна дробина (ячмінно-пшенична), ПДяж – пивна дробина (ячмінно-житня), КЛ – кукурудзяне лушпиння, ЯВ – яблучні вичавки, ВВ – виноградні вичавки, ШМ – шкірки мандарину. Різні літери позначають статистично достовірні відмінності між середніми значеннями за критерієм Дункана при $p < 0,05$

Найвищу активність ПЕ було зафіксовано при використанні бурякового жому ($268,5 \pm 66,4$ од./дм³). Статистично однакові значення ($p > 0,05$) до зафіксованих при культивуванні на середовищі з додаванням бурякового жому спостерігалися для середовищ, що містили мандаринові шкірки ($177,8 \pm 14,7$ од./дм³); тоді як активність на шкірках помело, виноградних та яблучних вичавках, кукурудзяному лушпинні була більш, ніж вдвічі нижчою (рис. 2. А). Інші, досліджувані в цій роботі джерела вуглецю не індукували синтез пектинестерази. Отже, для подальших експериментів як джерело вуглецю було обрано буряковий жом. Підвищення концентрації субстрату від 5 г/дм³ до 10 г/дм³ супроводжувалося зростанням ферментативної активності ПЕ вдвічі (рис. 2. Б). Подальше підвищення концентрації субстрату понад 10 г/дм³ призводило до суттєвого спадання активності ферменту. Водночас, активність за концентрацій 10–25 г/дм³ статистично не відрізнялася за критерієм Дункана ($p > 0,05$). Таким чином, концентрацію джерела вуглецю 10 г/дм³ було обрано оптимальною для подальших досліджень.

Ферментативна активність *T. hirsuta* 1569 також залежала від розміру частинок

бурякового жому (рис. 2. В). Максимальне числове значення ПЕА зафіксовано для частинок бурякового жому розміром 3–5 мм ($161,1 \pm 15,6$ од./дм³). Водночас у діапазоні 1–7 мм статистично достовірних відмінностей між значеннями ПЕА не встановлено ($p > 0,05$), тому однозначний оптимум розміру частинок у цьому інтервалі не визначався. Для наступних дослідів як робочу фракцію використовували частинки розміром 1–3 мм, що входили до статистично однорідної групи.

Крім джерела вуглецю, значну роль у синтезі ПЕ відігравало джерело азоту (рис. 3. А). Найвище числове значення активності досліджуваного ферменту в культуральній рідині спостерігалось після культивування *T. hirsuta* 1569 на середовищі з додаванням сечовини як джерела азоту – $184,3 \pm 18,3$ од./дм³. Водночас амоній нітрат, амоній сульфат, пептон і калій нітрат забезпечували статистично подібні значення ПЕА ($p > 0,05$), тому однозначної переваги сечовини серед цих джерел азоту не встановлено. Інші досліджені джерела знижували активність ферменту на близько 60 %.

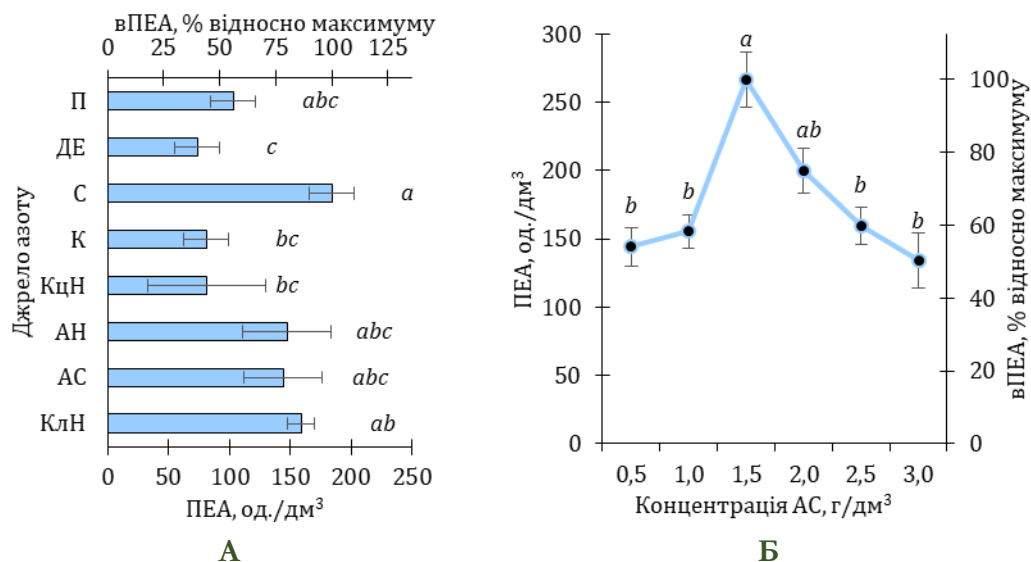


Рис. 3. Вплив параметрів джерела азоту на синтез пектинестерази *Trametes hirsuta* IBK 1569. А – тип джерела азоту; Б – концентрація амонію сульфату

Примітка: П – пептон, ДЕ – дріжджовий екстракт, С – сечовина, К – казеїн, КцН – кальцію нітрат, АН – амоній нітрат, АС – амоній сульфат, КлН – калію нітрат.

Різні літери позначають статистично достовірні відмінності між середніми значеннями за критерієм Дункана при $p < 0,05$

Оскільки амоній сульфат забезпечував значення ПЕА, статистично подібне до максимального рівня, одержаного при використанні сечовини ($p > 0,05$), його було обрано як робоче джерело азоту для подальших досліджень. Такий вибір також враховував технологічну зручність використання амоній сульфату як компонента поживного середовища. Максимальну активність ПЕ (рис. 3. Б) було зафіксовано за концентрації амонію сульфату $1,5 \text{ г/дм}^3$ – $266,7 \pm 20,2 \text{ од./дм}^3$, що перевищувало показники за інших концентрацій на 25–50 % ($p < 0,05$). Таким чином, цю концентрацію можна вважати найбільш сприятливою саме для синтезу ПЕ за досліджених умов. Водночас раніше для цього самого штаму *T. hirsuta* IBK 1569 було встановлено, що максимальна ендополігалактуроназна активність досягалася за

концентрації амонію сульфату $1,0 \text{ г/дм}^3$ (Zubyk & Klechak, 2026), тоді як для пектинліази найбільш сприятливим був діапазон $0,5\text{--}1,0 \text{ г/дм}^3$ (Zubyk et al., 2026a). Тому з урахуванням спрямованості подальших досліджень на одержання комплексного пектинолітичного препарату концентрацію $1,0 \text{ г/дм}^3$ використовували як компромісний робочий рівень у наступних серіях дослідів, а не як специфічний оптимум для пектинестерази.

Відзначається незначний вплив рН поживного середовища на синтез ПЕ *T. hirsuta* 1569 (рис. 4. А). Найвищі значення ПЕА спостерігалися в кисло-нейтральному діапазоні: $127,8\text{--}187,4 \text{ од./дм}^3$. Більш лужне середовище вдвічі зменшувало активність ПЕ. Таким чином, для подальших досліджень було обрано вихідне значення рН поживного середовища на рівні 6,0.

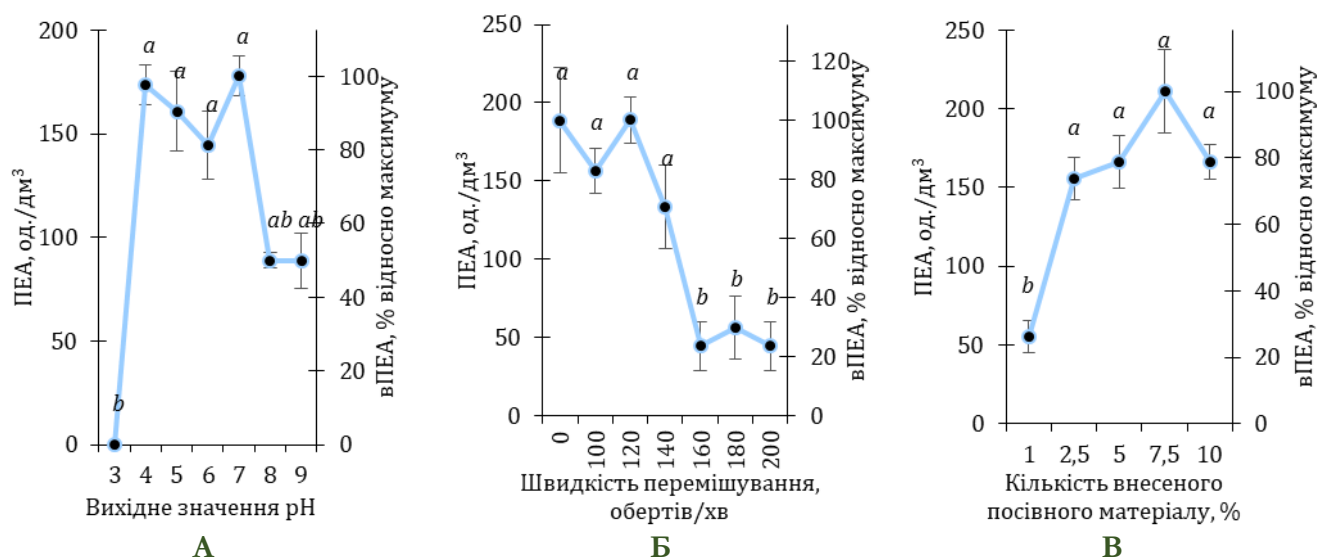


Рис. 4. Вплив умов культивування на синтез пектинестерази *Trametes hirsuta* IBK 1569. А – початкове значення рН середовища; Б – швидкість перемішування; В – кількість посівного матеріалу

Примітка: Різні літери позначають статистично достовірні відмінності між середніми значеннями за критерієм Дункана при $p < 0,05$.

Також досліджено вплив перемішування для інтенсифікації виходу ПЕ. Згідно рис. 4. Б спостерігається різний ефект перемішування, який значно залежав від швидкості обертання шейкера. Максимальне значення ферментативної активності спостерігалось за відсутності та повільного перемішування ($106,7\text{--}$

$222,2 \text{ од./дм}^3$). Активність ПЕ зменшувалася на понад 70 % при понад 160 об/хв. Зважаючи на неопубліковані дані щодо ендополігалактуроназної та пектинліазної активності, подальші дослідження проводили за швидкості перемішування 120 об/хв.

Кількість посівного матеріалу в діапазоні 2,5–10 % істотно не впливала на синтез пектинестерази ($p > 0,05$), тоді як за найменшої дослідженої кількості інокуляту (1 %) ПЕА була статистично нижчою та більш ніж утричі поступалася значенням, отриманим за вищих рівнів внесення посівного матеріалу (рис. 4. В). Таким чином, однозначного оптимуму в межах 2,5–10 % за критерієм ПЕА не встановлено. Для подальших досліджень як робочий рівень було обрано 5 % інокуляту, що входив до статистично однорідного діапазону та узгоджувався з раніше опублікованими результатами щодо інших складових пектинолітичного комплексу *T. hirsuta* IBK 1569 (Zubyk et al., 2026a; Zubyk & Klechak, 2026). Отже, 5 % інокуляту розглядали як спільний робочий параметр для подальшого дослідження пектинолітичного комплексу, а не як специфічний оптимум синтезу пектинестерази.

Пектинестераза є одним із ключових ферментів пектинолітичного комплексу, оскільки каталізує деестерифікацію метоксильованих залишків галактуронової кислоти у складі пектину та формує субстрат для подальшої дії полігалактуронази і пектатліаз (Manmohit Kalia, 2015). Тому особливості біосинтезу пектинестерази *T. hirsuta* IBK 1569 доцільно розглядати в контексті здатності цього макроміцета синтезувати комплекс позаклітинних ферментів, зокрема пектинолітичних, залучених до деградації компонентів рослинної клітинної стінки.

Відносно пізнє накопичення ПЕ може бути пов'язане з послідовним залученням позаклітинних ферментів у процесі освоєння грибом рослинного субстрату. Для *T. hirsuta* показана здатність формувати складний секретом, до якого входять ферменти деградації полісахаридів рослинної клітинної стінки, а його склад змінюється залежно від субстрату та стадії культивування (Vasina et al., 2016). Зниження активності після її максимального накопичення може бути наслідком виснаження доступних індукуючих компонентів, зміни фізіологічного стану культури або часткової інактивації секретованих ферментів. Подібна динаміка накопичення позаклітинних ферментів характерна для міцеліальних грибів за тривалого культивування (El Enshasy et al., 2018).

Виражений вплив природи джерела вуглецю, ймовірно, пов'язаний не лише з його поживною цінністю, але й зі здатністю окремих компонентів рослинної сировини індукувати синтез ферментів, необхідних для її деградації. Буряковий жом містить поряд із целюлозою та геміцелюлозами значну частку пектинових речовин, що робить його придатним субстратом для індукції пектинолітичної системи грибів (Marzo-Gago et al., 2023). Синтез ферментів у відповідь на присутність відповідних індукторів, наявних у складі лігноцелюлозної сировини, показано для грибних секретів (Filiatrault-Chastel et al., 2021). Аналогічно, транскриптомні дослідження базидієвих макроміцетів родів *Lentinus*, *Phlebia*, *Schizophyllum* тощо вказують на індукцію пектинестераз у відповідь на присутність пектинвмісних субстратів (Kuuskeri et al., 2016; Ravichandran et al., 2020; Zhu et al., 2016).

Зокрема, при культивуванні *Penicillium purpurogenum* на буряковому жомі індукувався комплекс ферментів, пов'язаних із деградацією пектинової фракції, включаючи естерази (Mardones et al., 2019). Висока індукційна здатність бурякового жому також узгоджується з результатами Heerd et al., які показали ефективність пектин-багатих агропромислових субстратів, зокрема бурякового жому, для отримання пектинолітичних ферментів (Heerd et al., 2014). Це може пояснювати вищу ПЕА *T. hirsuta* IBK 1569 саме на буряковому жомі порівняно з іншими лігноцелюлозними відходами.

Подібна реакція культури на мандаринові шкірки також може пояснюватися значним вмістом пектинових речовин у цитрусових відходах. Цитрусові шкірки розглядають як перспективну сировину для одержання пектину та індукції синтезу пектинолітичних ферментів (Ravindran et al., 2018). Водночас ефективність різних агропромислових відходів визначається не лише загальним вмістом пектину, але й його структурою, ступенем метоксильовання та ацетилювання, а також доступністю полісахариду у складі клітинної стінки. Такі відмінності можуть пояснювати нижчу індукційну здатність яблучних і виноградних вичавок (Xu et al., 2022).

Залежність ПЕА від кількості бурякового жому в середовищі може відображати баланс між індукцією ферментного синтезу та

фізичними обмеженнями, що виникають при збільшенні вмісту твердої фази. Підвищення концентрації пектиновмісного субстрату збільшує кількість потенційного індуктора, однак його надлишок у глибинній культурі може ускладнювати перемішування й масообмін, збільшувати неоднорідність середовища та обмежувати перенесення кисню до міцелію. Подібні ефекти описані при культивуванні міцеліальних грибів на рослинних субстратах (El Enshasy et al., 2018). Це може пояснювати відсутність подальшого посилення синтезу ПЕ при збільшенні вмісту бурякового жому понад найбільш сприятливий рівень.

Відсутність виражених відмінностей ПЕА в широкому діапазоні розміру частинок свідчить, що в досліджених умовах хімічний склад бурякового жому, ймовірно, мав більше значення для індукції ферменту, ніж ступінь його подрібнення. Водночас розмір частинок може впливати на площу доступної поверхні, дифузії компонентів середовища, аерацію та характер колонізації субстрату міцелієм. Подібний вплив цього параметра показано для базидієвого макроміцета *Daedalea flavida*, причому сприятливий розмір частинок залежав від досліджуваної ферментативної системи (Meehnian et al., 2016). Вибір розміру фракції бурякового жому також обґрунтовується на раніше опублікованих результатах дослідження інших складових пектинолітичного комплексу *T. hirsuta* IBK 1569. Зокрема, для ендополігалактуронази максимальну активність було встановлено при використанні бурякового жому з розміром частинок 1–3 мм, тоді як для пектинліази активність у межах фракцій 0–3 мм статистично не відрізнялася (Zubyk et al., 2026a; Zubyk & Klechak, 2026). Це підтверджує доцільність розгляду розміру частинок як технологічного параметра комплексного синтезу ферментів, а не лише як специфічного фактора синтезу ПЕ.

Вплив природи джерела азоту на синтез ферментів може бути пов'язаний із відмінностями в шляхах його асиміляції та регуляції вторинного метаболізму. Здатність *T. hirsuta* IBK 1569 підтримувати високий рівень ПЕА за використання як органічних, так і деяких неорганічних форм азоту свідчить про достатньо широку метаболічну пластичність штаму. Для

грибних продуцентів пектиназ характер джерела азоту є штамоспецифічним, а його вплив може відрізнятися навіть для окремих ферментів одного пектинолітичного комплексу (Mat Jalil et al., 2023). Це також узгоджується з раніше встановленими для *T. hirsuta* IBK 1569 відмінностями у відповідях окремих пектинолітичних активностей на склад азотного живлення (Zubyk et al., 2026a; Zubyk & Klechak, 2026).

Залежність ПЕА від концентрації амоній сульфату свідчить про необхідність збалансованого забезпечення культури доступним азотом. За його дефіциту може обмежуватися синтез клітинного та секретованого білка, тоді як надлишкове азотне живлення здатне спрямовувати метаболічні ресурси на накопичення біомаси або змінювати регуляцію синтезу позаклітинних гідролаз (Amin et al., 2019). Водночас відмінність найбільш сприятливої концентрації для ПЕ від раніше встановлених рівнів для інших компонентів пектинолітичного комплексу *T. hirsuta* IBK 1569 вказує на те, що окремі ферменти комплексу можуть по-різному реагувати на азотне живлення (Zubyk et al., 2026a; Zubyk & Klechak, 2026). Саме тому при формуванні комплексного препарату доцільним є використання компромісних умов, а не незалежна максимізація лише однієї активності.

Відносно слабкий вплив вихідного рН на синтез ПЕ *T. hirsuta* 1569 відрізняє цей фермент від полігалактуроназ і пектинліаз, які часто демонструють чіткіший рН-залежний характер біосинтезу (Zubyk et al., 2026a; Zubyk & Klechak, 2026). Максимальні значення ПЕА у кисло-нейтральному діапазоні відповідають загальним властивостям грибних пектинолітичних ферментів, для яких слабкокислі умови є найбільш сприятливими для росту продуцента, секреції білків та стабільності ферментів (Owusu Boakye & Domakyaara Zakraa, 2025). Подібні значення рН описані і для синтезу пектинметилестерази макроміцетом *Schizophyllum commune*, що свідчить про подібність фізіології деяких представників відділу *Basidiomycota* до синтезу цього ферменту (Mehmood et al., 2019).

Чутливість синтезу ПЕ до інтенсивності перемішування, ймовірно, пов'язана зі специфічною морфологією

міцеліальної культури. З одного боку, перемішування покращує перенесення кисню та поживних компонентів, а з іншого – надмірні гідродинамічні навантаження можуть спричиняти фрагментацію гіфів, зміну розміру та структури міцеліальних агрегатів і, відповідно, впливати на секрецію позаклітинних ферментів. Морфологія міцелію розглядається як один із ключових чинників продуктивності глибинних культур грибів (Lu et al., 2024). Аналогічний зв'язок між інтенсивністю перемішування, морфологією міцелію та синтезом ферментів описаний для інших міцеліальних грибів (Kheirkhah et al., 2023).

Відсутність суттєвого впливу кількості інокулюму в діапазоні понад 2,5–10 % вказує, що після досягнення мінімальної стартової біомаси синтез ПЕ визначається переважно складом середовища та умовами культивування, а не кількістю внесеного міцелію. Подібні результати описані для грибної продукції пектиназ, де інокулюм впливає насамперед на тривалість лаг-фази та швидкість колонізації субстрату, але не завжди забезпечує пропорційне підвищення ферментативної активності (van Kuijk et al., 2016).

Загалом отримані результати демонструють, що окремі параметри культивування неоднаково впливають на синтез ПЕ *T. hirsuta* IBK 1569. Найбільш виражений ефект був пов'язаний із природою поживних компонентів та гідродинамічними умовами, тоді як для частини факторів спостерігали широкі діапазони статистично подібної активності. Порівняння з раніше встановленими закономірностями синтезу інших пектинолітичних ферментів цього штаму свідчить, що їх індивідуальні сприятливі умови не завжди збігаються. Тому при розробленні технології одержання комплексного пектинолітичного препарату доцільним є подальше багатофакторне

оцінювання та пошук компромісної комбінації параметрів, яка забезпечуватиме збалансований рівень декількох ферментативних активностей.

Висновки

Проведений підбір умов культивування показав, що *Trametes hirsuta* IBK 1569 є перспективним продуцентом пектинестерази при глибинному культивуванні на середовищах із лігноцелюлозними агропромисловими відходами. Найбільш придатним серед досліджених джерел вуглецю виявився буряковий жом, тоді як характер азотного живлення та інтенсивність перемішування також суттєво впливали на накопичення ферменту. Водночас у певних діапазонах розміру частинок субстрату, початкового рН та кількості інокуляту пектинестеразна активність залишалася відносно стабільною, що свідчить про можливість вибору робочих параметрів у межах статистично еквівалентних умов.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на багатофакторну оптимізацію умов культивування з одночасним урахуванням активності основних компонентів пектинолітичного комплексу, а також на перевірку встановлених робочих параметрів у ферментері. При масштабуванні особливої уваги потребуватимуть умови аерації та перемішування, оскільки одержані результати засвідчили чутливість синтезу пектинестерази до інтенсивності гідродинамічного впливу.

Перспективним напрямом є також формування комплексного ферментного препарату *T. hirsuta* IBK 1569 із збалансованими пектинестеразною, полігалактуроазною та пектинліазною активностями та подальше дослідження можливостей його практичного застосування.

Фінансування / Funding

Дослідження виконано без залучення зовнішнього фінансування / This research received no external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Усі дані представлені безпосередньо в статті. За додатковою інформацією звертайтеся до авторів / All data are presented directly in the article. For additional information, please contact the authors.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Дослідження не потребувало розгляду інституційною ревізійною радою, оскільки не передбачало участі людей або використання тварин / Institutional review board approval was not required for this study, as it did not involve human participants or the use of animals.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується, оскільки дослідження не передбачало участі людей / Not applicable, as the study did not involve human participants.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів / The authors declare no conflict of interest.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

Під час підготовки цього рукопису автори використовували GPT-5.5 Thinking, для мовного редагування та перекладу окремих фрагментів тексту англійською мовою. Після використання цього інструменту автори ретельно переглянули і відредагували вміст за потреби та несуть повну відповідальність за остаточну опубліковану версію / During the preparation of this manuscript, the authors used GPT-5.5 Thinking, for language editing and translation of selected text fragments into English. After using this tool, the authors carefully reviewed and edited the content as needed and takes full responsibility for the final published version.

References

- Amin, F., Bhatti, H. N., & Bilal, M. (2019). Recent advances in the production strategies of microbial pectinases – A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 122, 1017–1026. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.09.048>
- Bisko, N., Lomberg, M., Mykchaylova, O., & Mytropolska, N. (2024). *IBK Mushroom Culture Collection. Version 1.8*. The IBK Mushroom Culture Collection of the M.G. Kholodny Institute of Botany. <https://doi.org/10.15468/dzdsqu>
- Bondaruk, S. V., Bulava, S. O., Korzh, R. A., Lesyk, D. S., Polovynko, V. V., Fedyk, A. V., & Al-Maali, G. A. (2025). Biotransformation of 2,6-dichloroaniline and 3,5-dichloroaniline by the mycelium of basidiomycetes. *Ukrainian Botanical Journal*, 82(6), 594–603. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj82.06.594>
- Danylyak, N. I., Semichaevsky, V. D., Dudchenko, L. G., & Trutneva, I. A. (1989). *Enzyme systems of higher basidiomycetes*. Naukova Dumka. 280 p. (in Russian)
Ферментные системы высших базидиомицетов / Н. И. Даниляк и др. Наукова Думка. 1989. 280 с.
- Dudka, I. A., Wasser, S. P., Ellanskaia, I. A., Koval, E. Z., Gorbik, L. T., Nikolskaya, E. A., Bilay, V. I., Bilay, T. I., Borisova, V. N., Sivers, V. S., Musich, E. G., Lizak, Y. V., Stryzhevskaya, A. Y., Aizenberg, V. L., Kirillova, L. M., Bezbrodova, S. I., Zaichenko, A. M., Zakordonets, L. A., Meteiko, T. Y., ... Redchits, T. I. (1982). *Metody eksperymentalnoy mykologii*. Naukova Dumka. 551 p. (in Russian)
Методы экспериментальной микологии / И. А. Дудка и др. Наукова Думка. 1982. 551 с.
- El Enshasy, H. A., Elsayed, E. A., Suhaimi, N., Malek, R. A., & Esawy, M. (2018). Bioprocess optimization for pectinase production using *Aspergillus niger* in a submerged cultivation system. *BMC Biotechnology*, 18(1), 71. <https://doi.org/10.1186/s12896-018-0481-7>

- Embaby, A. M., Masoud, A. A., Marey, H. S., Shaban, N. Z., & Ghonaim, T. M. (2014). Raw agro-industrial orange peel waste as a low cost effective inducer for alkaline polygalacturonase production from *Bacillus licheniformis* SHG10. *SpringerPlus*, 3(1), 327. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-327>
- Filiatrault-Chastel, C., Heiss-Blanquet, S., Margeot, A., & Berrin, J.-G. (2021). From fungal secretomes to enzymes cocktails: The path forward to bioeconomy. *Biotechnology Advances*, 52, 107833. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107833>
- Garg, G., Singh, A., Kaur, A., Singh, R., Kaur, J., & Mahajan, R. (2016). Microbial pectinases: An ecofriendly tool of nature for industries. *3 Biotech*, 6(1), 47. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0371-4>
- Iandolo, D., Piscitelli, A., Sannia, G., & Faraco, V. (2011). Enzyme production by solid substrate fermentation of *Pleurotus ostreatus* and *Trametes versicolor* on tomato pomace. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 163(1), 40–51. <https://doi.org/10.1007/s12010-010-9014-0>
- Heerd, D., Diercks-Horn, S., & Fernández-Lahore, M. (2014). Efficient polygalacturonase production from agricultural and agro-industrial residues by solid-state culture of *Aspergillus sojae* under optimized conditions. *SpringerPlus*, 3(1), 742. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-742>
- Jayani, R. S., Saxena, S., & Gupta, R. (2005). Microbial pectinolytic enzymes: A review. *Process Biochemistry*, 40(9), 2931–2944. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.03.026>
- Kaissar, F. Z., Bouacem, K., Benine, M. L., Mechri, S., Sharma, S. R., Singh, V. K., Bakli, M., Lebouachera, S. E. I., & Emiliani, G. (2025). *Bacillus* pectinases as key biocatalysts for a circular bioeconomy: From green extraction to process optimization and industrial scale-up. *BioTech*, 14(3), 74. <https://doi.org/10.3390/biotech14030074>
- Kheirkhah, T., Neubauer, P., & Junne, S. (2023). Controlling *Aspergillus niger* morphology in a low shear-force environment in a rocking-motion bioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, 195, 108905. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.108905>
- Kuuskeri, J., Häkkinen, M., Laine, P., Smolander, O.-P., Tamene, F., Miettinen, S., Nousiainen, P., Kemell, M., Auvinen, P., & Lundell, T. (2016). Time-scale dynamics of proteome and transcriptome of the white-rot fungus *Phlebia radiata*: growth on spruce wood and decay effect on lignocellulose. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1), 192. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0608-9>
- Levin, L., & Forchiassin, F. (1998). Culture conditions for the production of pectinolytic enzymes by the white-rot fungus *Trametes troglia* on a laboratory scale. *Acta Biotechnologica*, 18(2), 157–166. <https://doi.org/10.1002/abio.370180213>
- Lu, Z., Chen, Z., Liu, Y., Hua, X., Gao, C., & Liu, J. (2024). Morphological engineering of filamentous fungi: Research progress and perspectives. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 34(6), 1197–1205. <https://doi.org/10.4014/jmb.2402.02007>
- Mandhania, S., Jain, V., & Malhotra, S. P. (2009). Culture optimization for enhanced production of microbial pectin methylesterase under submerged conditions. *Asian Journal of Biochemistry*, 5(1), 12–22. <https://doi.org/10.3923/ajb.2010.12.22>
- Manmohit Kalia, P. K. (2015). Pectin methylesterases: A review. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, 05(05). <https://doi.org/10.4172/2155-9821.1000227>

- Mardones, W., Callegari, E., & Eyzaguirre, J. (2019). Corncob and sugar beet pulp induce specific sets of lignocellulolytic enzymes in *Penicillium purpurogenum*. *Mycology*, 10(2), 118–125. <https://doi.org/10.1080/21501203.2018.1517830>
- Marzo-Gago, C., Díaz, A. B., & Blandino, A. (2023). Sugar beet pulp as raw material for the production of bioplastics. *Fermentation*, 9(7), 655. <https://doi.org/10.3390/fermentation9070655>
- Mat Jalil, M. T., Zakaria, N. A., Salikin, N. H., & Ibrahim, D. (2023). Assessment of cultivation parameters influencing pectinase production by *Aspergillus niger* LFP-1 in submerged fermentation. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 21(1), 45. <https://doi.org/10.1186/s43141-023-00510-z>
- Meehnian, H., Jana, A. K., & Jana, M. M. (2016). Effect of particle size, moisture content, and supplements on selective pretreatment of cotton stalks by *Daedalea flavida* and enzymatic saccharification. *3 Biotech*, 6(2), 235. <https://doi.org/10.1007/s13205-016-0548-x>
- Mehmood, T., Saman, T., Asgher, M., Irfan, M., Anwar, Z., Nadeem, F., & Siddiqua, A. (2019). Optimization of cultural parameters for pectin methylestrase and polygalacturonase production from *Schizophyllum commune* in solid state fermentation. *Bangladesh Journal of Botany*, 48(1), 65–74. <https://doi.org/10.3329/bjb.v48i1.47417>
- Miyairi, K., Nishida, K., Takarae, M., Shikanai, Y., & Okuno, T. (2002). Purification and characterization of pectate lyase I and II from fungus *Stereum purpureum*. *Journal of Applied Glycoscience*, 49(2), 99–106.
- Miyairi, K., Toyoda, M., & Okuno, T. (2001). Purification and characterization of endo- and exopolygalacturonases from *Fomitopsis cytisina*. *Journal of Applied Glycoscience*, 48(2), 105–114.
- Oumer, O. J., & Abate, D. (2017). Characterization of pectinase from *Bacillus subtilis* strain Btk 27 and its potential application in removal of mucilage from coffee beans. *Enzyme Research*, 2017, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2017/7686904>
- Oumer, O. J., & Abate, D. (2018). Comparative studies of pectinase production by *Bacillus subtilis* strain Btk 27 in submerged and solid-state fermentations. *BioMed Research International*, 2018, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2018/1514795>
- Owusu Boakye, S., & Domakyaara Zakpaa, H. (2025). *Bioprocess optimization for pectinase enzymes synthesized from fungal species under solid-state fermentation conditions*. <https://doi.org/10.20944/preprints202501.1905.v2>
- Pili, J., Vargas, C. E. B., Oro, C. E. D., Toniazzi Backes, G., Valduga, E., & Zeni, J. (2018). Synthesis of pectin methylesterase from *Aspergillus niger* in submerged fermentation using citrus pectin and orange peel as inducers. *Industrial Biotechnology*, 14(4), 212–221. <https://doi.org/10.1089/ind.2018.0013>
- Presley, G. N., Panisko, E., Purvine, S. O., & Schilling, J. S. (2018). Coupling secretomics with enzyme activities to compare the temporal processes of wood metabolism among white and brown rot fungi. *Applied and Environmental Microbiology*, 84(16). <https://doi.org/10.1128/AEM.00159-18>
- Ravichandran, A., Kolte, A. P., Dhali, A., Gopinath, S. M., & Sridhar, M. (2020). *Transcriptomic analysis of *Lentinus squarrosulus* provide insights into its biodegradation ability*. <https://doi.org/10.1101/2020.09.28.316471>

- Ravindran, R., Hassan, S. S., Williams, G. A., & Jaiswal, A. K. (2018). A review on bioconversion of agro-industrial wastes to industrially important enzymes. *Bioengineering*, 5(4), 93. <https://doi.org/10.3390/bioengineering5040093>
- Shakhova, N. V., Golenkina, S. A., Stepanova, E. V., Loginov, D. S., Psurtseva, N. V., Fedorova, T. V., & Koroleva, O. V. (2011). Effect of submerged cultivation conditions and inducers on biosynthesis of extracellular laccase by a *Trametes versicolor* 1666 strain. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 47(9), 808–816. <https://doi.org/10.1134/S0003683811090055>
- Sharma, H. P., Patel, H., & Sugandha. (2017). Enzymatic aided extraction and clarification of fruit juices: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(6), 1215–1227. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.977434>
- Shrestha, S., Rahman, M. S., & Qin, W. (2021). New insights in pectinase production development and industrial applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(24), 9069–9087. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11705-0>
- Thakur, P., Singh, A. K., Singh, M., & Mukherjee, G. (2021). Extracellular alkaline pectinases production: A review. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, e3745. <https://doi.org/10.55251/jmbfs.3745>
- van Kuijk, S. J. A., Sonnenberg, A. S. M., Baars, J. J. P., Hendriks, W. H., & Cone, J. W. (2016). The effect of particle size and amount of inoculum on fungal treatment of wheat straw and wood chips. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 7(1), 39. <https://doi.org/10.1186/s40104-016-0098-4>
- Vasina, D. V., Pavlov, A. R., & Koroleva, O. V. (2016). Extracellular proteins of *Trametes hirsuta* st. 072 induced by copper ions and a lignocellulose substrate. *BMC Microbiology*, 16(1), 106. <https://doi.org/10.1186/s12866-016-0729-0>
- Vršanská, M., Voběrková, S., Jiménez Jiménez, A., Strmiska, V., & Adam, V. (2017). Preparation and optimisation of cross-linked enzyme aggregates using native isolate white rot fungi *Trametes versicolor* and *Fomes fomentarius* for the decolourisation of synthetic dyes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(1), 23. <https://doi.org/10.3390/ijerph15010023>
- Xu, F., Zhang, S., Waterhouse, G. I. N., Zhou, T., Du, Y., Sun-Waterhouse, D., & Wu, P. (2022). Yeast fermentation of apple and grape pomaces affects subsequent aqueous pectin extraction: Composition, structure, functional and antioxidant properties of pectins. *Food Hydrocolloids*, 133, 107945. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107945>
- Zhu, N., Liu, J., Yang, J., Lin, Y., Yang, Y., Ji, L., Li, M., & Yuan, H. (2016). Comparative analysis of the secretomes of *Schizophyllum commune* and other wood-decay basidiomycetes during solid-state fermentation reveals its unique lignocellulose-degrading enzyme system. *Biotechnology for Biofuels*, 9(1), 42. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0461-x>
- Zubyk, P., & Klechak, I. (2026). Screening of cultivation conditions for *Trametes hirsuta* IBK 1569 for endopolygalacturonase production. *Scientific Herald of Chernivtsy University. Biology (Biological Systems)*, 18(1), 19–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.31861/biosystems2026.01.019>
- Zubyk, P., Nesterenko, O., & Klechak, I. (2026a). Screening of *Trametes hirsuta* IBK 1569 culture conditions for the production of pectin lyase as a component of the pectinolytic complex. *Journal of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University. Biology*, 13, 40–51. <https://doi.org/10.15330/jpnbio.13.40-51>

Zubyk, P. R., Dzygun, L. P., & Klechak, I. R. (2026b). Pectinolytic activity of the macromycete *Trametes hirsuta* (Wulfen) Lloyd under surface and submerged cultivation. *Biotechnologia Acta*, 19(2), 53–63. <https://doi.org/10.15407/biotech19.02.053>

Zubyk, P. R., Klechak, I. R., Linovytska, V. M., Titova, L. O., & Dzyhun, L. P. (2026c). Pectinolytic enzymes of Basidiomycota: Genetic basis, culture conditions, biochemical properties, and industrial applications. *Mikrobiolohichni Zhurnal*, 88(1), 83–103. <https://doi.org/10.15407/microbiolj88.01.083>

Received: 19.06.2026. **Accepted:** 12.08.2026. **Published:** 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Зубик П., Клецак І. Дослідження впливу умов культивування *Trametes hirsuta* IBK 1569 для отримання пектинестерази як частини пектинолітичного комплексу. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 264–278. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht2.26.19>

Cite this article in APA style as:

Zubyk, P., & Klechak, I. (2026). Doslidzhennia vplyvu umov kultivuvannia *Trametes hirsuta* IBK 1569 dlia otrymannia pektynesterazy yak chastyny pektynolitichnoho kompleksu [Study of the influence of cultivation conditions of *Trametes hirsuta* IBK 1569 for obtaining pectinesterase as part of the pectinolytic complex]. *Biota. Human. Technology*. (2), 264–278. <https://doi.org/10.58407/bht2.26.19> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Zubyk P. [in Ukrainian: **Зубик П.**] ¹, PhD student, e-mail: pv.zubyk@i.ua

ORCID: 0000-0003-0435-0254

Department of Industrial Biotechnology and Biopharmacy, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

3 Academician Yangel'ya Street, Kyiv, Ukraine

Klechak I. [in Ukrainian: **Клецак І.**] ², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof., e-mail: klechak.inna@lil.kpi.ua

ORCID: 0000-0002-7382-0259

Department of Industrial Biotechnology and Biopharmacy, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

3 Academician Yangel'ya Street, Kyiv, Ukraine

¹ Study design, data collection, statistical analysis, manuscript preparation.

² Writing-reviewing, editing, management.