

УДК 579.6:577.114:664.8
DOI: 10.15673/swonaft.v89i2.3422

БІОТЕХНОЛОГІЯ СИНБІОТИЧНИХ ДІЄТИЧНИХ ДОБАВОК

¹Капрельянц Л.В., д.т.н., професор,
²Пожіткова Л.Г., к.т.н., ³Охотська М.І., к.т.н., доцент
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

ORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0003-2136-5669>; ²<https://orcid.org/0000-0002-7652-3305>;

³<https://orcid.org/0000-0002-7305-1904>

E-mail: ¹leonid@ontu.edu.ua, ²pozhitkova@ukr.net, ³mariaoxota0214@ukr.net

Copyright © 2025 by author and the journal «Scientific Works»

This work is licensed under Vthe Creative Commons Attribution International License (CC By).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



Анотація. Синбіотичні дієтичні добавки на основі рослинної сировини є комплексними продуктами, що поєднують пробіотики (живі корисні мікроорганізми або їх метаболіти) та пребіотики – рослинні волокна, які слугують субстратом для їх розвитку та можуть використовуватися як носії при іммобілізації. Їх застосування сприяє відновленню балансу мікробіоти шлунково-кишкового тракту людини, пригніченню патогенної мікрофлори та стимулюванню росту власних корисних бактерій.

У зв'язку з цим особливо актуальним є розроблення нових препаратів синбіотичного спрямування для корекції дисбіозів. Найбільш перспективним напрямом вирішення цієї проблеми є створення препаратів з групи постбіотичних пробіотиків, які в порівнянні з клітинною формою, є більш безпечними, характеризуються тривалишим терміном придатності до застосування та зменшеною взаємодією з компонентами харчових систем.

Одним із напрямів розвитку таких технологій є використання багатотоннажних вторинних рослинних ресурсів харчової та переробної промисловості. Розроблено наукові основи отримання рослинних синбіотичних дієтичних добавок і запропоновано поетапну технологічну схему їх виробництва з використанням пшеничних та житніх висівків, що включає підготовку сировини, подрібнення, фракціонування, ферментативний гідроліз, стерилізацію, культивування пробіотичних мікроорганізмів, сушіння та оформлення готового продукту.

Ключові слова: зернові висівки, дієтичні добавки, ферментативний гідроліз, ферментація, пробіотики, пребіотики, постбіотики, синбіотики.

Вступ. Стан здоров'я людини значною мірою визначається структурою харчування, тому організація виробництва та споживання функціональних харчових продуктів є пріоритетним напрямом державної політики в Україні. Особлива увага приділяється створенню харчових продуктів і дієтичних добавок, призначених для підтримання та відновлення нормальної кишкової мікробіоти, оскільки останнім часом в Україні особливо гостро постає проблема захворювань шлунково-кишкового тракту (ШКТ) [1].

Головною причиною цього є неконтрольоване використання населенням антибіотиків та неякісних дієтичних добавок, нераціональне харчування, стресові умови життя (психоемоційне перенавантаження), шкідливі звички та надзвичайно швидкий ритм сучасного життя.

Основним напрямом профілактики і лікування захворювань ШКТ, спричинених дисбіозами, є використання пробіотиків, пребіотиків і синбіотиків. Слід підкреслити, що на ринку України пробіотичні препарати як у формі фармацевтичних засобів, так і дієтичних добавок представлені дуже широко. Однак понад 80% цих препаратів представлено продукцією іноземних виробників, і значна їх частка (близько 45%) це синбіотики.

Одним із напрямів розвитку таких технологій є використання багатотоннажних вторинних ресурсів переробки зерна. Зернопереробна промисловість є однією з найважливіших галузей в Україні, оскільки забезпечує сировиною основні підприємства для виробництва продуктів харчування. При отриманні основної продукції сировина використовується не повністю, і значна її частина залишається у вигляді вторинних продуктів, зокрема висівків. Комплексне використання багатотоннажної сировини є одним із актуальних завдань сьогодення.

Формулювання проблеми. У зв'язку із сучасним розвитком світового промислового виробництва, спрямованого на створення інноваційних продуктів, особливої значущості набувають маловідходні та

безвідходні технології, у яких як сировинну базу використовують відновлювані рослинні ресурси. До таких ресурсів належать і вторинні продукти переробки зернових культур, зокрема пшеничні та житні висівки. Вони є продуктами механічного впливу на зерно під час виробництва борошна та містять значну частину біологічно активних речовин, присутніх у вихідному зерні.

Підвищення інноваційності економіки значною мірою залежить від використання критичних технологій, серед яких важливе місце посідає біотехнологія. Розвиток біотехнологічної галузі в різних сферах виробництва важливим чинником зростання національної економіки. Відповідно до сучасних напрямів розвитку біотехнології, пріоритетним є виробництво фармацевтичних препаратів, нутрицевтиків і дієтичних добавок. Основою для отримання таких біопродуктів має стати вітчизняна сировина рослинного походження, зокрема зернова. Споживчі властивості вторинної зернової сировини для біотехнологічного виробництва відкривають нові можливості для агропромислового комплексу країни.

Глибока біотехнологічна переробка вторинної зернової сировини у високотехнологічні продукти сприятиме розширенню вітчизняного ринку зернових біологічно активних продуктів і дієтичних добавок, а також збільшенню частки продукції з доданою вартістю на ринку харчових продуктів України. Упровадження запропонованої біопереробки пшеничних і житніх висівок забезпечує синергійний ефект, який проявляється у створенні нових вітчизняних сировинних джерел, отриманні продуктів із високою біологічною цінністю, що не чинять антропогенного навантаження на довкілля, а також у підвищенні ефективності агропромислового комплексу.

Об'єкти і методи досліджень. Як сировину та компоненти для проведення експериментальних досліджень використовували пшеничні та житні висівки врожаю 2021–2024 років, отримані на підприємствах: ТОВ «Софія», Вінницький КХП №2, «Сквирський комбінат хлібопродуктів», Дніпромлин (ДМК), Кролевецький КХП та ЗАТ «Одесхарчкомбінат». Промислові ферментні комплекси Ладижинського заводу ферментних препаратів «ENZIM Biotech»: α -амілазу «Амілоризин» (ферментативна активність – 10 000 од/г АС), глюкоамілазу «Глюколад Л» (6000 од/мл ГлС), а також мультиферментний препарат Viscozyme L («Novozymes A/S», Данія). Чисті культури біфідобактерій: *Bifidobacterium bifidum* (препарат «Біфідумбактерин», виробництва компанії «Біофарма»), а також штами *Lactobacillus acidophilus* Л-3 і *Propionibacterium shermanii* з музею кафедри харчової хімії, експертизи та біотехнології Одеського національного технологічного університету (ОНТУ).

Визначення гранулометричного складу пшеничних висівок проводили методом ситового аналізу. Наважку висівок просівали через набір сит з розмірами отворів 1,64; 1,09; 0,59; 0,41; 0,25; 0,20 та 0,16 мм. Після просіювання визначали масову частку фракцій на кожному ситі у відсотках відносно маси вихідної наважки.

Якісний та кількісний аналіз моносахаридного складу ферментолізатів проводили методом низхідної паперової хроматографії з використанням системи розчинників бутанол : вода : оцтова кислота (4:5:1) [4]. Кількість життєздатних клітин біфідобактерій визначали в КУО/см³ [5, 6]. Вміст редуруючих речовин [7], харчових волокон [8], визначення КОС методом ТШХ [9] а також застосовували методики визначення сорбційної та вологоутримувальної здатності [1].

Культивування лактобактерій проводили в глибинних умовах на поживному середовищі в гетерофазній системі в колбах Ерленмейера при температурі 37°C без аерації та з перемішуванням зі швидкістю 300–400 об/хв. Культивування біфідобактерій здійснювали при температурі 37°C з перемішуванням 250–400 об/хв в атмосфері аргону.

Викладення основного матеріалу. Метою досліджень є розробка основ гнучких біотехнологій отримання дієтичних добавок синбіотичної спрямованості шляхом біотрансформації (ферментолізу) пшеничних та житніх висівок з подальшою ферментацією комплексними (багатоштамовими) пробіотичними мікроорганізмами з різних класифікаційних груп.

Пшеничні та житні висівки за хімічним складом є багатими на харчові волокна (8–40%), білки (14–16%), вітаміни групи В, Е, К та мінерали (магній, калій, фосфор). Основні компоненти пшеничних та житніх висівок наведено в табл. 1. Переважна частка харчових волокон у висівках представлена нерозчинними фракціями, що впливає на засвоюваність та біодоступність поживних і фітохімічних речовин. Зовнішні шари зерна містять целюлозу, геміцелюлози та лігнін. Пшеничні висівки характеризуються дещо вищим вмістом крохмалю, тоді як житні відрізняються більшим вмістом грубих харчових волокон і більш вираженим впливом на перистальтику кишечника.

Таблиця 1 – Основні компоненти пшеничних та житніх висівок, % (n = 5, P $\geq$ 0,05)

	Пшеничні	Житні
Сухі речовини	87–88	86–89
Білки	15–17	16–18
Клітковина (харчові волокна)	9–12	10–12
Пентозани	11–12	16–18

Крохмаль	27–28	15–16
Ліпіди	3,4–3,5	3,0–3,2
Цукри	0,4–3,9	0,3–0,5
Лігнін	11–12	10–11
Мінеральні речовини	4,8–5,2	5,0–5,5

У пшеничних висівках вміст крохмалю зазвичай коливається в межах 27–30% (іноді до 35% при грубому помолі). Загальна кількість вуглеводів становить близько 45–55%, однак значна їх частина представлена неперетравлюваними харчовими волокнами. Житні висівки містять приблизно 15–16% крохмалю.

Вміст золи (мінеральних речовин) у висівках залежить від виду зерна та ступеня його очищення. У середньому для пшеничних висівок він становить 4,4–4,9 г/100 г продукту, тоді як для житніх зазвичай у межах 3,5–4,4 г/100 г залежно від технології помелу. Основними мінеральними елементами в обох видах висівок є фосфор, калій, магній, залізо, цинк, натрій і селен, тоді як кремній, сірка та марганець містяться у менших кількостях.

Пшеничні та житні висівки є багатим джерелом харчових волокон (25–55%), вітамінів групи В (В1, В2, В6, В9), вітаміну Е, ніацину (РР), біотину, а також містять ферулову кислоту. Вміст крохмалю у висівках (як пшеничних, так і житніх) є відносно низьким і зазвичай становить близько 15–30%, оскільки основна його частина локалізована в ендоспермі, який видаляється під час помелу борошна.

У фракціях висівок міститься до 83% загальної кількості фітохімічних речовин і харчових волокон зерна пшениці. Це зумовлює їх вищу фізіологічну цінність порівняно з іншими фракціями зернівки, що утворюються під час подрібнення пшеничного та житнього зерна.

Одним із методів обробки пшеничних висівок є біотехнологічна трансформація матриксу шляхом обробки ферментними препаратами та пробіотичною мікробіотою, що дозволяє покращити технологічні, сенсорні та, особливо, поживні й функціональні властивості висівок. Біотехнологічні підходи до переробки висівок передбачають комплексну дію біологічних агентів на складний матрикс клітинних стінок оболонки зерна.

Модифікуючий вплив як екзогенних, так і ендогенних ферментів здатен частково змінювати структуру комплексу біополімерів матриксу, що призводить до підвищення біологічної активності та біодоступності поживних речовин. Подальша або сумісна з ферментолізом ферментація молочнокислими пробіотичними бактеріями дозволяє отримувати продукти з покращеними фізіологічними та функціональними (оздоровчими) властивостями, які відносяться до синбіотичних дієтичних добавок. Біотехнологічний підхід до переробки висівок забезпечує розширення можливостей їх використання у харчуванні. Таким чином, ферментовані або біомодифіковані висівки підвищують свій харчовий профіль і можуть виступати носіями коректорів мікробіоти ШКТ (пребіотиків, пробіотиків та їх метаболітів, а також фітоактивних речовин). Крім того, біотехнологічна переробка висівок передбачає комплексний вплив біологічних агентів на складний матрикс клітинних стінок зернових оболонок за рахунок дії екзогенних і ендогенних ферментів, які здатні частково модифікувати структуру багатокомпонентного комплексу біополімерів, тим самим підвищуючи біологічну активність і біодоступність поживних речовин [10–12].

З метою виділення найбільш цінних фракцій із загального об'єму висівок, отриманих із підприємств, проводили аналіз гранулометричного складу методом просіювання через сита з різним діаметром отворів. Отримані результати показали, що кількісне співвідношення фракцій у кожному зразку є індивідуальним, однак загальна тенденція виходу фракцій простежується для всіх зразків і коливається в межах 10%.

Фракції розміром від 1,64 до 0,59 мм становлять основну частину загальної маси висівок у всіх дослідних зразках, а саме 60–70%, тому для подальших досліджень було обрано саме ці фракції шляхом їх об'єднання. Високий ступінь дисперсності, значна питома поверхня та розпушена структура рослинної сировини полегшують доступ ферментів до субстрату при ферментативній обробці, що може суттєво підвищити ступінь біоконверсії висівок.

Розмір часток у зразках є приблизно однаковим, однак для подальших досліджень було обрано пшеничні та житні висівки Вінницького КХП №2, у яких спостерігається найбільший сумарний вихід цільових фракцій (70–74%).

З огляду на перспективність сучасних напрямів створення пробіотиків нового покоління, зокрема комбінованих форм з іммобілізованими бактеріями різних таксономічних груп, за умов біологічної сумісності штамів та забезпечення синергічного ефекту, нами було обрано мультиштамну композицію, що включає *Lactobacillus acidophilus* Л-3, *Bifidobacterium bifidum* та *Propionibacterium shermanii*.

Висівки перед культивуванням термічно обробляли при температурі 115°C протягом 25 хв. Гідромодуль підбирали з урахуванням ступеня клейстеризації крохмалю в суспензії та умов термообробки; який склав 1:10.

Ферментативна біомодифікація (ферментативний гідроліз) висівок була наступним етапом і передбачала перетворення біополімерів пшеничних висівок, зокрема крохмалю, геміцелюлоз, глюканів і білкових речовин, у моно- та олігомерні сполуки з різним ступенем полімеризації. Це сприяє підвищенню їх засвоюваності та дозволяє використовувати їх в якості поживного вуглеводовмісного компонента середовища, що потенційно проявляє пребіотичні властивості відповідно до робочої гіпотези дослідження [13].

Дослідження здійснювали із застосуванням ферментних препаратів з амілолітичною, геміцелюлазною, пектиназною, пектиностеразною та ферулоестеразною активностями, які забезпечують перетворення біополімерних комплексів висівок у низькомолекулярні сполуки різної хімічної природи з певними фізіологічними властивостями. Отримані продукти, як окремо, так і в сукупності, формують поживне середовище для пробіотичних культур та можуть чинити позитивний вплив на організм людини. З цією метою були відібрані такі ферментні препарати: α -амілаза продуцент – *Bacillus subtilis* (Амілосубтилін Г10х, 2000 од. АС/г); глюкоамілаза – продуцент *Aspergillus awamori* (Глюкаваморин Г10х, 6000 од./г); Viscozyme L – мультиферментний препарат продуценту *Aspergillus aculeatus*. L-амілаза та глюкоамілаза характеризуються амілолітичною активністю 2000 та 6000 од./г відповідно, тоді як мультиферментний препарат Viscozyme L проявляє β -глюканазну активність (100 од./г), ксиланазну (50 од./г), целюлазну (70 од./г) та пектиназну (40 од./г).

Високий вміст крохмалю у висівках підтверджує доцільність використання ферментів амілолітичної дії для попередньої обробки висівкових фракцій з метою подальшого отримання препаратів біологічно активних речовин із підвищеним вмістом цільових компонентів без застосування додаткових технологічних операцій очищення. У результаті обробки висівок α -амілазою та глюкоамілазою відбувається часткове звільнення клітинних стінок висівкових частинок від крохмалю внаслідок його гідролітичного розщеплення до глюкози та мальтодекстринів. Глибина гідролітичних змін полімерних компонентів клітинних стінок висівок визначається їх хімічним складом. Каталітичний процес біотрансформації полімерних сполук (зокрема крохмалю та інших біополімерів) пшеничних висівок залежить від температури та рН реакційного середовища, що пов'язано з властивостями використовуваних ферментних препаратів.

Вибір ферментів для гідролізу висівок зумовлений необхідністю зниження молекулярної маси компонентів сировини, передусім крохмалю, та переходу нерозчинних форм у розчинний стан, а також структурними змінами матриксу висівок.

Дослідження кінетики ферментативної біомодифікації пшеничних висівок показало, що інтенсивність накопичення редуруючих речовин (РР) безпосередньо залежить від масової концентрації ферментного препарату α -амілази. Як свідчать дані (рис. 1), початкова швидкість гідролітичного процесу визначається як концентрацією ферменту, так і доступністю крохмального субстрату в матриксі висівок. Збільшення дозування препарату сприяє інтенсифікації процесів деполімеризації, що підтверджується зростанням кількості РР у гідролізатах.

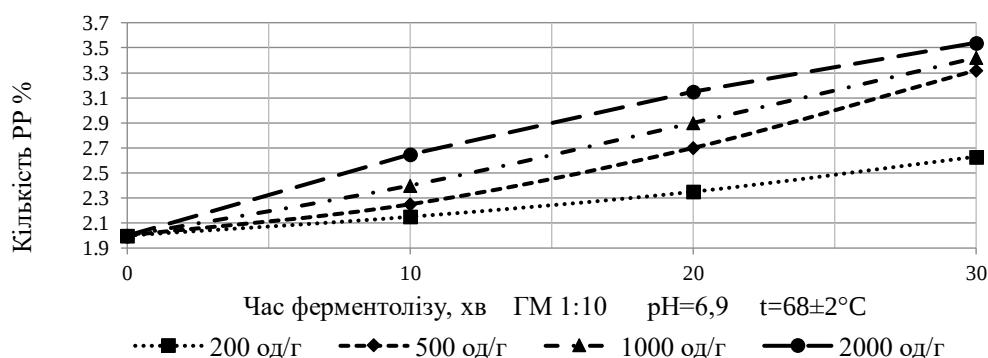


Рис.1 – Залежність накопичення редуруючих речовин (РР) від масової концентрації ферментного препарату α -амілаза на прикладі пшеничних висівок

Fig. 1 – Dependence of reducing substances (RS) accumulation on the mass concentration of the α -amylase enzyme preparation using the example of wheat bran

З огляду на багатокомпонентність фракції інтактних висівок, а також відмінності у складі та вмісті структурних полісахаридів геміцелюлоз і целюлози, а також білкової складової обґрунтовується доцільність використання композиції ферментних препаратів з метою гідролітичного розщеплення та розпушення природного біополімерного зернового матриксу.

Про технологічну ефективність використання ферментної композиції можна судити за збільшенням вмісту поліфенолів та редуруючих речовин у гідролізатах. Значне підвищення вмісту поліфенолів і РР у ферментолізатах свідчить про перехід компонентів висівкової фракції у деполімеризований стан, а також про вивільнення зв'язаних поліфенолів із структурними елементами рослинного матриксу, зокрема арабіноксиланового комплексу.

Таким чином, ефективність біокаталізу загалом проявляється в інтенсифікації процесів деполімеризації крохмалю і як наслідок у збільшенні вмісту РР.

Електронною мікроскопією встановлено, що мікроструктура фракцій як пшеничних, так і житніх висівок визначається їх хімічним складом, який, у свою чергу, залежить від частини зернівки, з якої вони утворені. Показано, що мікроструктура являє собою складний полімерний комплекс, що складається з частково пластинчастого полісахаридного матриксу, у прошарках якого локалізовані зерна крохмалю (рис. 2).

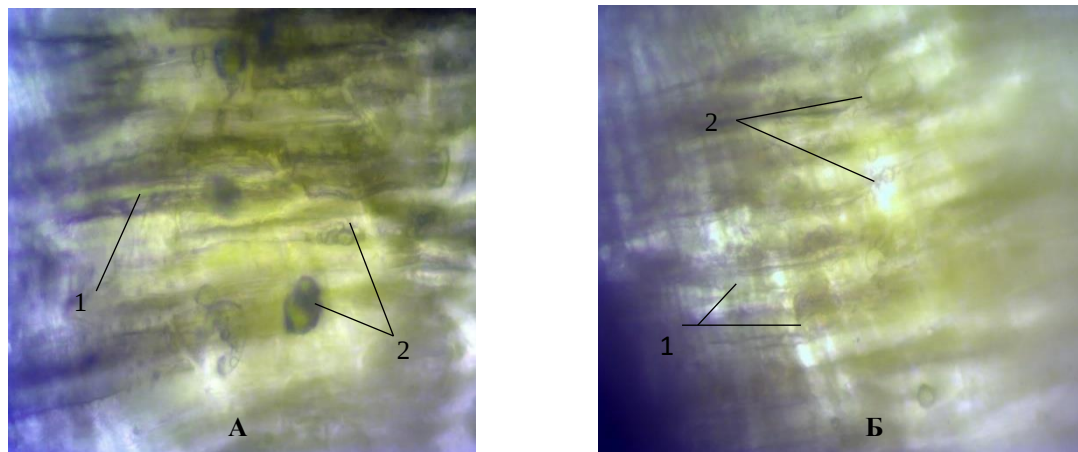


Рис. 2 – Електронні мікрофотографії пшеничних (А) і житніх(Б) висівок при 60-кратному збільшенні, де 1 – матрикс висівок; 2 – крохмальні зерна.

Fig. 2 – Electron micrographs of wheat (A) and rye (B) bran at 60x magnification: 1 – bran matrix; 2 – starch granules.

Структура поверхневих шарів фракцій висівок являє собою фактично деформовані клітинні стінки рослин із включеннями крохмальних зерен ендосперму. Зовнішній перикарпій складається з прозорого шару, який щільно зростається з пігментованим шаром, що містить барвні речовини. Нижче розташований неструктурований блискучий гіаліновий шар, який формує фракції висівок із залишками ендосперму, що не були відокремлені під час помелу зерна в борошно та характеризуються підвищеним вмістом білків і крохмалю. Як видно з фотографій, пшеничні та житні висівки відрізняються мікроструктурою, що зумовлено різними шарами зернівки, які є джерелом утворення відповідних фракцій.

У подальших дослідженнях крохмаль висівок піддавали клейстеризації у розчині при гідромодулі ГМ 1:10 при температурі 68 °С, після чого вивчали процес його гідролітичного розщеплення під дією двох ферментних препаратів: ендопрепарату α -амілази *Bacillus subtilis* з активністю 2000 од./г (температурний діапазон дії 30–70 °С, оптимальний рН 6,0–6,5) та екзопрепарату глюкоамілази *Aspergillus awamori* з активністю 6000 од./г (температурний діапазон дії 40–60 °С, оптимальний рН 6,0–6,5). Ферментні препарати вносили за умов: температура 50±2 °С, рН 6,2–6,4, масова концентрація 0,001% від маси сухих речовин висівок, із забезпеченою активністю 1000 од./г. (рис.3)

Після обробки амілазами на наступному етапі проводили обробку мультиферментним препаратом Viscozyme L, який характеризується наявністю комплексу ферментативних активностей, спрямованих на руйнування рослинної клітинної стінки. Зокрема, целюлолітична активність каталізує розщеплення целюлози до целоолігосахаридів і глюкозних залишків шляхом розриву β -1,4-глікозидних зв'язків.

У результаті послідовної ферментативної дії трьох зазначених ферментних препаратів було отримано ферментолізати висівок та нерозчинний у воді залишок харчові волокна (ХВ). Загальну схему ферментативної обробки висівок наведено на (рис. 4).

Обробку препаратом Viscozyme L після попередньої дії амілаз здійснювали за таких умов: масова концентрація ферменту 0,0005–0,002%, рН 3,7–4,5.

Згідно з робочою гіпотезою, перспективність ферментативного гідролізу геміцелюлоз (ГМЦ), які представлені переважно ксиланами та арабіноксиланами, полягає у розробці умов отримання ксилоарабіноолігосахаридів (АКОС) та ксилоолігосахаридів (КОС). Відомо, що КОС і АКОС є

ефективними пребіотиками, які забезпечують інтенсивний ріст пробіотичних культур на рівні модельного пребіотика фруктоолігосахаридів (ФОС). Тому на наступному етапі досліджували умови гідролітичного розщеплення геміцелюлоз висівків.

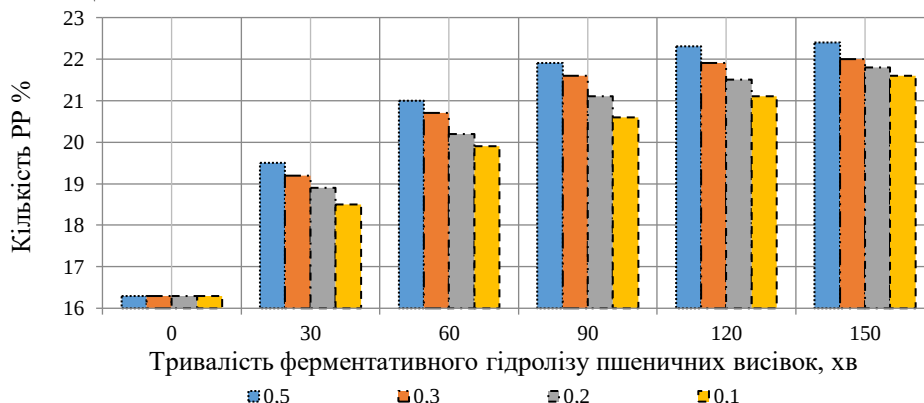


Рис. 3 – Залежність виходу РР від концентрації ферментного препарату
Fig. 3 – Dependence of RS yield on enzyme preparation concentration

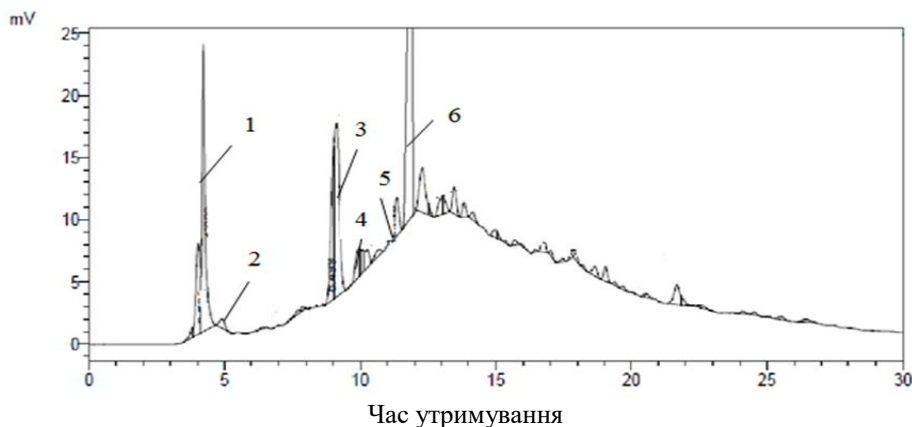


Рис. 4. – Загальна схема ферменталізу пшеничних та житніх висівків
Fig. 4 – General scheme of enzymatic hydrolysis of wheat and rye bran

Враховуючи, що Viscozyme L є комплексним ферментним препаратом і характеризується ферулоестеразною активністю у процесі ферментативного гідролізу висівків було встановлено вивільнення поліфенольних сполук, які зв'язані в матриці клітинних стінок ефірними зв'язками з ксиланами через ферулову кислоту. Таким чином, ферментолізат збагачується біоактивними сполуками, зокрема феруловою кислотою та іншими поліфенолами.

Згідно з отриманими даними, максимальний вихід поліфенолів становив 3,45–3,79 мг/г сухої маси сировини для пшеничних висівків та 3,55–4,34 мг/г для житніх при значеннях рН у діапазоні 4,6–4,8.

Ідентифікацію та кількісне визначення фенольних сполук у спиртовому розчині ферментолізату проводили методом високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ) на хроматографі Shimadzu (Японія) з використанням обернено-фазової колонки Microsorb-MV C18. На (рис. 5) наведено хроматограму спиртового розчину поліфенолів пшеничних висівків, з якої видно, що найбільший пік відповідає феруловій кислоті, а також ідентифіковано галову та гідроксибензойну кислоти.



1 – галлова, 2 – протокатехова, 3 – 4-гідроксибензойна, 4 – хлорогенова,
5 – *p*-кумарова, 6 – ферулова кислота.

Рис. 5 – ВЕРХ фенольних кислот поліфенолів з пшеничних висівок

Fig. 5 – HPLC of phenolic acids and polyphenols from wheat bran

Як видно з рис. 3, вихід РР залежить від концентрації ферменту та тривалості гідролізу. При концентрації ферментного препарату 0,5% від сухої маси пшеничних висівок досягнуто максимальний вміст РР, який становив 22,3%.

Під дією препарату Viscozyme L розчинні ГМЦ гідролізуються до моносахаридів, зокрема глюкози, арабінози та ксилози. У результаті такого ферментолізу додатково утворюється 6,2% редукуючих речовин (глюкоза, ксилоза, рибоза, рамноза, арабіноза) за рахунок комплексу ферментативних активностей препарату. Хімічний склад висівок після ферментативної обробки наведено в табл. 2.

Таким чином, використання амілолітичної та ксиланолітичної активностей ферментів дозволяє отримати субстрат для культивування пробіотичних мікроорганізмів, у якому співвідношення глюкози до ксилози становить приблизно 2:1. Це узгоджується з особливостями метаболізму гексоз і пентоз у процесах лакто-, біфідо- та пропіоновокислого бродіння.

Важливо враховувати різний механізм ферментації моносахаридів — пентоз і гексоз, зокрема можливість реалізації гомо- або гетероферментативного типу бродіння, що необхідно враховувати при підборі консорціуму пробіотичних мікроорганізмів.

На наш погляд, здійснення повного гідролізу геміцелюлоз до моносахаридів є недоцільним. Відомо, що за умов обмеженого ферментативного гідролізу можливе отримання олігосахаридів ксилозного ряду зі ступенем полімеризації 2–7, які проявляють виражені пребіотичні властивості.

Таким чином, подальші дослідження були спрямовані на розробку умов ферментативного гідролізу декрохмалізованих висівок із застосуванням препарату Viscozyme L з метою отримання КОС із заданим ступенем полімеризації.

Таблиця 2 – Хімічний склад висівок після ферментативної обробки, ($n = 3$, $P \geq 0,95$)

		Вихідні висівки %	Кількість речовин що перейшла у буфер	Висівки після ферментативної обробки %	Кількість речовин, що перейшла у ферментолізат
Крохмаль		22	3,5	-	22
Білок		13,7	4,5	9,2	4,5
Харчові Волокна	Целюлоза	16,3	-	16,3	-
	Геміцелюлоза	35	4,0	4,6	30,4
	Лігнін	5	-	5	-
Ліпіди		3,5	-	3,5	-
Зола		4,5	-	4,5	-
Всього		100	12	43,1	56,9

Регулювання фракційного складу КОС, що забезпечує підвищений вміст олігомерів, які визначають пребіотичні властивості готових препаратів, досягається шляхом обмеження тривалості ферментолізу. Було визначено залежність ступеня деполімеризації КОС від тривалості процесу (рис. 6).

Аналізуючи отримані данні на рис. 6, можна зробити висновок, що ступінь полімеризації КОС від 3 до 5 була отримана при концентрації ксиланолітичної активності ферменту Viscozim L 0,5 % від сухої маси ПВ

та тривалості ферментолізу 210 хв. Подальша тривалість ферментолізу призводило до повного розщеплення КОС до моносахариду ксилози (рис.7)

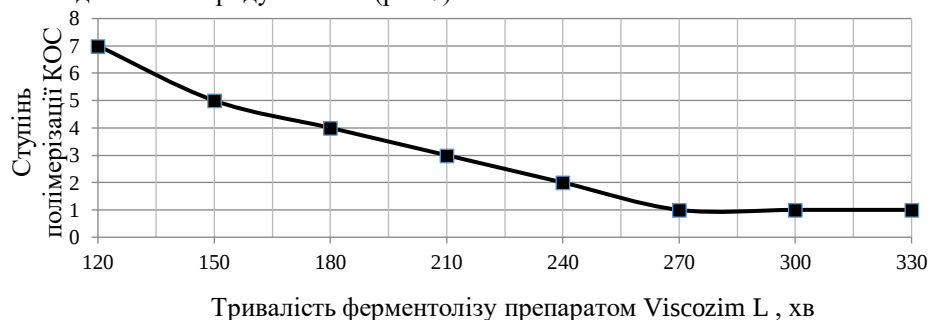
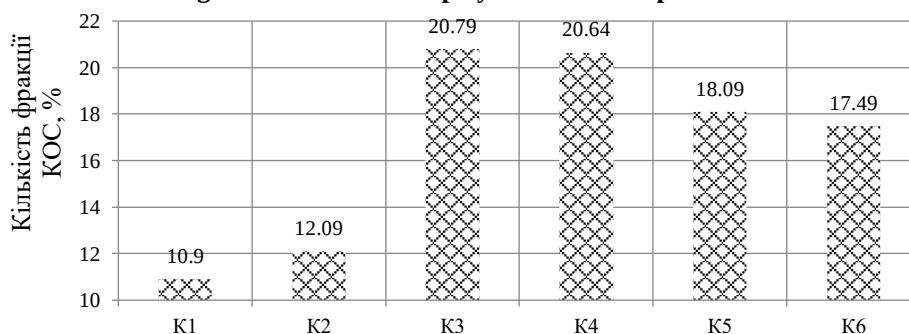


Рис. 6 – Швидкість деполімерізації КОС від тривалості процесу
Fig. 6 – Rate of COS depolymerization vs. process duration



K1 - ксилоза, K2 - ксілобіоза, K3 - ксілотріоза, K4 - ксілотетроза, K5 - ксілопентоза, K6 - вищі КОС.

Рис. 7 – Діаграма фракційного складу КОС з ПВ отриманий ТШХ

Fig. 7 – TLC-based fractional composition of XOS from wheat bran

У складі КОС отриманих із пшеничних висівок, переважають ксілотріози та ксілотетрози, частка яких становить 41,43% від загальної кількості, тоді як у житніх висівках цей показник досягає 44,6%. Вихід КОС із геміцелюлоз висівок становить 70–80% зі ступенем чистоти 70–75%.

На наступному етапі досліджень, на основі отриманих гідролізатів, з метою досягнення максимальної продуктивності ферментації за вмістом біфідо-, лакто- та пропіоновокислих бактерій було вивчено особливості їх росту за різних умов культивування. Як було зазначено при обґрунтуванні вибору пробіотичних культур для отримання нової дієтичної добавки на основі пшеничних висівок, перспективним є створення консорціуму мікроорганізмів, що включає *Lactobacillus acidophilus*, *Bifidobacterium bifidum* та *Propionibacterium shermanii*.

Використання методу сумісного культивування пробіотичних мікроорганізмів при формуванні асоціації штамів трьох видів (мультивидової культури) потребує аналізу взаємодії мікроорганізмів в умовах їх спільного культивування. Придатними для сумісного культивування вважають штами, що взаємодіють симбіотично. Відомо багато прикладів успішного сумісного культивування різних комбінацій пробіотичних мікроорганізмів [14].

Нами обрано періодичний метод культивування, який передбачає внесення інокуляту у поживне середовище на початку процесу та отримання біомаси після досягнення заданої фази розвитку популяції.

За таких умов концентрація мікроорганізмів спочатку зростає, однак надалі її приріст припиняється внаслідок лімітування субстрату та інгібування продуктами метаболізму. У зв'язку з цим для підтримання стабільного фізіологічного стану клітин доцільним є безперервний режим культивування, параметри якого забезпечують контроль умов росту та їх зміну відповідно до потреб культури. Звідси випливає, що періодична система може підтримувати ріст клітин лише протягом обмеженого часу.

Практично системи періодичного культивування є закритими, оскільки мікроорганізми в них проходять усі фази росту без підживлення свіжим поживним середовищем і без відведення культуральної рідини.

Дослідження розвитку культур лакто-, біфідо- та пропіоновокислих бактерій, відібраних до складу консорціуму пробіотичних мікроорганізмів, показало, що вони активно розвиваються на ферментолізатах пшеничних висівок як за умов роздільного, так і сумісного культивування. Накопичення біомаси консорціуму мікроорганізмів при роздільному та сумісному культивуванні наведено в таблиці 3.

Таблиця 3. – Накопичення біомаси консорціуму мікроорганізмів при роздільному і сумісному культивуванні, ($n = 3$, $P \geq 0,95$)

Показники	Культура мікроорганізмів				
	<i>B.bifidum</i>	<i>L.acidophilus</i>	<i>Pr.shermani</i>	Співвідношення	
				1:1:1	2:0,5:0,5
Log KVO	9,8	9,3	9,1	10,45	9,9
Біомаса, мг/мл	1,23	1,3	1,13	1,53	1,83
pH	4,5	4,2	4,3	4,4	4,83
Титрована кислотність, °T	164	120	130	175	169

Таким чином, встановлено збільшення біомаси при культивуванні змішаних культур відібраних штамів біфідо-, лакто- та пропіоновокислих бактерій, а також скорочення часу їх культивування за рахунок додаткової стимуляції росту клітин вітамінами та неуглеводними пребіотиками – біфідогенні ростові стимулятори: 2-аміно-3-карбокси-1,4-нафтохінони та 1,4-дігідро- 2-нафтенова кислота ACNQ DHNA (біля 10-15 мг/л у ферментолізаті висівок), які синтезуються власне клітинами пропіоновокислих бактерій, що має важливе значення для розробки і удосконалення технологій отримання пробіотичних препаратів (дієтичних добавок).

Досліджені матрикси ПВ є макропористими і мають високу адсорбційну здатність. Таким чином, при іммобілізації пробіотичних бактерій на полісахаридному комплексі висівок як сорбентах, їх гідрофобні частини вступають у контакт з поверхнею клітин, а карбоксильні групи пектинових речовин матриксу приймають участь у хемосорбційних процесах. Розглядаючи природу іммобілізації лактобацил на матриксах висівок, слід відзначити, що захоплення молочнокислих бактерій у пористій структурі матриці, а також їх адсорбція на поверхні твердого носія відбуваються за рахунок фізичної адсорбції під дією електростатичних сил, можливого утворення ковалентних зв'язків між клітинною мембраною і носієм, а також механічного утримання клітин у порах носія [15].

Для оцінки стабілізуючого ефекту іммобілізованих клітин іммобілізувати, що містили консорціум (асоціат) пробіотичних культур, були закладені на зберігання при температурі 5 °C протягом 6 місяців. Контрольним зразком слугувала суміш пшеничних і житніх висівок та інокуляту. Встановлено, що іммобілізовані на матриксах висівок лактобактерії зберігали життєздатність на рівні 98% порівняно з контрольним зразком (44%). Біотехнологічно отримані модифіковані висівки є одночасно активними носіями пробіотичних культур, оскільки під дією ферментів гідролаз кількість відкритих пор зростає внаслідок часткового гідролізу полісахаридів геміцелюлоз і крохмалю та переходу їх у розчинний стан. Таким чином, модифіковані висівки є макропористим сорбентом для іммобілізації лактобацил.

Розроблена технологія дозволяє отримати функціональну дієтичну добавку Biofiber PBL. Сушіння готової продукції здійснювали методом сублимаційного висушування при температурі 34 °C протягом 20 годин. Після цього продукт направляли на стадії таблетування, фасування та реалізації. Отриманий симбіотик, який містить пробіотичні мікроорганізми, пропонується використовувати як самостійну дієтичну добавку, а також у складі функціональних харчових продуктів.

Висновки. Створена біотехнологія отримання функціональних синбіотичних дієтичних добавок (інгредієнтів), що дозволяє підвищити біодоступність компонентів пшеничних і житніх висівок. Зокрема, вміст розчинних харчових волокон (арабіноксиланів) зростає більш ніж у 10 разів порівняно з вихідною сировиною. Нові синбіотичні дієтичні добавки за рахунок вивільнення поліфенолів і ферулової кислоти характеризуються підвищеною антиоксидантною активністю.

Пребіотичний ефект забезпечується олігомерами з низьким ступенем полімеризації – ксилоолігосахаридами, які є ефективним джерелом живлення для корисної мікробіоти кишечника. Крім того, пробіотичний комплекс на основі висівок є іммобілізованим у матриксі модифікованих висівок, що забезпечує захист клітин від негативного впливу зовнішнього середовища.

Модифіковані висівки, отримані шляхом ферментативної обробки та подальшої ферментації, можуть використовуватися як самостійні дієтичні добавки, а також як інгредієнти у функціональних продуктах харчування.

Список використаної літератури

1. Buzhylov N., Kaprelyants L. V., Pozhitkova L. H., Soboleva A., Kishenya A. Enzymatic modification of wheat bran // Food Science and Technology. 2020. Vol. 14, No. 1. P. 13–21. DOI: <https://doi.org/10.15673/fst.v14i1.1643>

2. Патент України на корисну модель № 140252. Спосіб одержання харчових волокон / Капрельянц Л. В., Бужилов М. Г., Пожиткова Л. Г. Бюл. № 3. 10.02.2020. URL: https://card-file.ontu.edu.ua/bitstream/123456789/17001/1/Pat_kor_140252.pdf
3. Kaprelyants L., Buzhylov N., Pozhitkova L. Application of co-bioprocessing techniques (enzymatic hydrolysis and fermentation) for improving the nutritional value of wheat bran as a functional food ingredient // EUREKA: Life Sciences. 2019. No. 2. P. 31–45. DOI: <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2019.00992>
4. Skurikhina I. M., Tutelian V. A. Rukovodstvo po metodam analiza kachestva i bezopasnosti pishchevykh produktov. Brandes, 1998. P. 117–122.
5. ДСТУ 7355:2013. Молоко, молочні продукти та закваски. Метод визначення кількості біфідобактерій. Київ, 2013. 28 с.
6. Капрельянц Л. В., Труфкаті Л. В., Крупицька Л. О. Поживне середовище для підрахунку кількості життєздатних клітин біфідобактерій у продуктах харчування та препаратах пробіотичного призначення // Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. 2016. Т. 18, № 1–4. С. 70–75. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvlnu_2016_18_1\(4\)_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvlnu_2016_18_1(4)_14)
7. Arasimovich V. V., Baltaga N. P., Ponomareva N. P. Metody analiza pektinovykh veshchestv, gemitsellyuloz i nektoliticheskikh fermentov. Kishinev: AN MSSR, 1970. 52 p.
8. AOAC International. Official Method 985.29: Total Dietary Fiber in Foods: Enzymatic–Gravimetric Method // Official Methods of Analysis of AOAC International. 22nd ed. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1093/9780197610145.003.3808>
9. Mezzetti T., Lato M., Rufini S., Ciufini G. Thin-layer chromatography of oligosaccharides with tungstic or molybdic acid as impregnant // Journal of Chromatography. 1971. Vol. 63, No. 2. P. 329–342. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)85646-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)85646-6)
10. Al Kharousi Z. S. Highlighting lactic acid bacteria in beverages: diversity, fermentation, challenges, and future perspectives // Foods. 2025. Vol. 14. P. 2043. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14122043>
11. Sridhar K., Bouhallab S., Croguennec T., Renard D., Lechevalier V. Recent trends in the design of healthier plant-based alternatives: the nutritional profile, gastrointestinal digestion, and consumer perception // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2081666>
12. Tachie C. Y. E., Onuh J. O., Aryee A. N. A. Nutritional and potential health benefits of fermented food proteins // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2024. Vol. 104. P. 1223–1233. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.13001>
13. Mukherjee A., Breselge S., Dimidi E., Marco M. L., Cotter P. D. Fermented foods and gastrointestinal health: underlying mechanisms // Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology. 2024. Vol. 21, No. 4. P. 248–266. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41575-023-00869-x>
14. Martirosyan D. M., Lampert T., Lee M. A comprehensive review on the role of food bioactive compounds in functional food science // Functional Food Science. 2022. Vol. 3, No. 2. P. 64–79. DOI: <https://doi.org/10.31989/ffs.v2i3.906>
15. Buchilina A., Gunkova P., Trofimov A. Biomodification of a plant base from cereal flour to produce an alternative fermented drink // Bioactive Compounds in Health and Disease. 2025. Vol. 8, No. 2. P. 41–55. DOI: <https://doi.org/10.31989/bchd.v8i2.1554>

BIOTECHNOLOGY OF SYNBIOTIC DIETARY SUPPLEMENTS

Kaprelyants L.V., DSc, Professor, Pozhitkova L.H., PhD, Okhotska M.I., PhD, Associate Professor
Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

Abstract. Synbiotic dietary supplements based on plant raw materials are complex products that combine probiotics (live beneficial microorganisms or their metabolites) and prebiotics – plant fibers that serve as a substrate for their growth and can also be used as carriers during immobilization. Their application contributes to the restoration of the balance of the human gastrointestinal microbiota, suppresses pathogenic microflora, and stimulates the growth of beneficial indigenous bacteria.

In this regard, the development of new synbiotic preparations for the correction of dysbiosis is particularly relevant. One of the most promising approaches to solving this problem is the development of postbiotic-based preparations, which, in comparison with cellular probiotic forms, are characterized by higher safety, longer shelf life, and reduced interaction with components of food systems.

The aim of this study is to develop biotechnological approaches for obtaining synbiotic dietary supplements based on secondary plant raw materials, in particular wheat and rye bran. The study is focused on the application of enzymatic biotransformation and subsequent fermentation using a complex of probiotic microorganisms.

One of the key directions in the development of such technologies is the utilization of large-tonnage secondary plant resources from the food and processing industries. Scientific foundations for obtaining plant-based synbiotic

dietary supplements have been developed, and a step-by-step technological scheme for their production has been proposed. This scheme includes raw material preparation, grinding, fractionation, enzymatic hydrolysis using amylolytic and cellulolytic enzyme systems, sterilization, cultivation of probiotic microorganisms, drying, and final product formulation.

The results obtained demonstrate the effectiveness of enzymatic hydrolysis of bran, which leads to the formation of low-molecular-weight compounds, including oligosaccharides with prebiotic properties, and increases the bioavailability of biologically active substances. The use of multistrain probiotic cultures ensures the formation of synbiotic compositions with enhanced functional properties.

The practical significance of the work lies in the possibility of using secondary grain processing products as a raw material for the production of functional foods and dietary supplements with improved physiological effects.

Keywords: cereal bran, dietary supplements, enzymatic hydrolysis, fermentation, probiotics, prebiotics, postbiotics, synbiotics.

References

1. Buzhylov, N., Kaprelyants, L. V., Pozhitkova, L. H., Soboleva, A., & Kishenya, A. (2020). Enzymatic modification of wheat bran. *Food Science and Technology*, 14(1), 13–21. <https://doi.org/10.15673/fst.v14i1.1643>
2. Kaprelyants, L. V., Buzhylov, M. H., & Pozhitkova, L. H. (2020). *Sposib oderzhannia kharchovykh volokon* [Method for obtaining dietary fibers] (Ukrainian Utility Model Patent No. 140252). https://card-file.ontu.edu.ua/bitstream/123456789/17001/1/Pat_kor_140252.pdf
3. Kaprelyants, L., Buzhylov, N., & Pozhitkova, L. (2019). Application of co-bioprocessing techniques (enzymatic hydrolysis and fermentation) for improving the nutritional value of wheat bran as a functional food ingredient. *EUREKA: Life Sciences*, (2), 31–45. <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2019.00992>
4. Skurikhina, I. M., & Tutelian, V. A. (Eds.). (1998). *Rukovodstvo po metodam analiza kachestva i bezopasnosti pishchevykh produktov* [Guide to methods for quality and safety analysis of food products]. Brandes. pp. 117–122.
5. State Standard of Ukraine. (2013). DSTU 7355:2013 Milk, dairy products and starter cultures. Method for determination of bifidobacteria count. Kyiv, Ukraine.
6. Kaprelyants, L. V., Trufkati, L. V., & Krupyska, L. O. (2015). Nutrient medium for enumeration of viable bifidobacteria in food products and probiotic preparations. *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies*, 18(1–4), 70–75. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvlnu_2016_18_1\(4\)_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvlnu_2016_18_1(4)_14).
7. Arasimovich, V. V., Baltaga, N. P., & Ponomareva, N. P. (1970). *Metody analiza pektinovykh veshchestv, gemitsellyuloz i pektoliticheskikh fermentov* [Methods for analysis of pectic substances, hemicelluloses and pectolytic enzymes]. AN MSSR.
8. AOAC International. (2023). Official Method 985.29: Total dietary fiber in foods: Enzymatic–gravimetric method. In *Official methods of analysis of AOAC International* (22nd ed.). <https://doi.org/10.1093/9780197610145.003.3808>
9. Mezzetti, T., Lato, M., Rufini, S., & Ciufini, G. (1971). Thin-layer chromatography of oligosaccharides with tungstic or molybdic acid as impregnant. *Journal of Chromatography*, 63(2), 329–342. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)85646-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)85646-6)
10. Al Kharousi, Z. S. (2025). Highlighting lactic acid bacteria in beverages: Diversity, fermentation, challenges, and future perspectives. *Foods*, 14, 2043. <https://doi.org/10.3390/foods14122043>
11. Sridhar, K., Bouhallab, S., Croguennec, T., Renard, D., & Lechevalier, V. (2022). Recent trends in the design of healthier plant-based alternatives: The nutritional profile, gastrointestinal digestion, and consumer perception. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2081666>
12. Tachie, C. Y. E., Onuh, J. O., & Aryee, A. N. A. (2024). Nutritional and potential health benefits of fermented food proteins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104, 1223–1233. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13001>
13. Mukherjee, A., Breselge, S., Dimidi, E., Marco, M. L., & Cotter, P. D. (2024). Fermented foods and gastrointestinal health: Underlying mechanisms. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 21(4), 248–266. <https://doi.org/10.1038/s41575-023-00869-x>
14. Martirosyan, D. M., Lampert, T., & Lee, M. (2022). A comprehensive review on the role of food bioactive compounds in functional food science. *Functional Food Science*, 3(2), 64–79. <https://doi.org/10.31989/ffs.v2i3.906>
15. Buchilina, A., Gunkova, P., & Trofimov, A. (2025). Biomodification of a plant base from cereal flour to produce an alternative fermented drink. *Bioactive Compounds in Health and Disease*, 8(2), 41–55. <https://doi.org/10.31989/bchd.v8i2.1554>

Отримано в редакцію 22.07.2025

Прийнято до

Розміщено в інтернеті 29.12.2025

Received 22.07.2025

Approved 02.09.2025

Available in Internet 29.12.2025