



2025

НАУКОВІ ПРАЦІ

НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Том 31 № 6

*Журнал
«Наукові праці Національного університету харчових технологій»
видається з 1938 року*

КИЇВ ✧ НУХТ ✧ 2025

Articles with the results of fundamental theoretical developments and applied research in the field of technical and economic sciences are published in this journal. The scripts of articles are reviewed beforehand by leading specialists of corresponding branch.

The journal was designed for professors, tutors, scientists, post-graduates, students of higher education establishments and executives of the food industry.

Journal "Scientific Works of National University of Food Technologies" is included into the list of professional editions of Ukraine of technical (specialties — 121, 126, 133, 141, 144, 151, 162, 181) and economic sciences (specialties — 051, 073, 075), category "B" (Decree of MES of Ukraine #975 from July 11, 2019), where the results of dissertations for scientific degrees of PhD and candidate of science can be published.

The Journal "Scientific Works of National University of Food Technologies" is indexed by the following scientometric databases:

- Index Copernicus
- EBSCOhost
- Google Scholar

The Journal is recommended for publication of research results by the Ministry of Science and Higher Education of Poland.

Editorial office address:

National University of
Food Technologies
Volodymyrska str., 68,
building B, room 412
01601 Kyiv, Ukraine

Recommended for publication by the Academic
Council of the National University of Food
Technologies. Protocol No. 5
from 23th of December, 2025

© NUFT, 2025

У журналі публікуються статті за результатами фундаментальних теоретичних розробок і прикладних досліджень у галузі технічних та економічних наук. Рукописи статей попередньо рецензуються провідними спеціалістами відповідної галузі.

Для викладачів, наукових працівників, аспірантів, докторантів і студентів вищих навчальних закладів, керівників підприємств харчової промисловості.

Журнал «Наукові праці Національного університету харчових технологій» включено в перелік наукових фахових видань України з технічних (спеціальності — 121, 126, 133, 141, 144, 151, 162, 181) та економічних наук (спеціальності — 051, 073, 075), категорія «Б» (Наказ МОН України № 975 від 11.07.2019), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук.

Журнал «Наукові праці Національного університету харчових технологій» індексується такими наукометричними базами:

- Index Copernicus
- EBSCOhost
- Google Scholar

Журнал рекомендовано Міністерством науки і вищої освіти Польщі для публікації результатів наукових досліджень.

Адреса редакції:

Національний університет
харчових технологій
вул. Володимирська, 68,
корпус Б, к. 412,
м. Київ, 01601

Рекомендовано вченою радою
Національного університету харчових
технологій. Протокол № 5
від 23 грудня 2025 року

© НУХТ, 2025

Редакційна колегія

Склад редакційної колегії журналу

«Наукові праці Національного університету харчових технологій»

Головний редактор

Editor-in-Chief

Олександр Шевченко

Oleksandr Shevchenko

д-р техн. наук, проф., Україна

Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Відповідальний секретар

Managing secretary

Анастасія Шевченко

Anastasiia Shevchenko

д-р техн. наук, доц., Україна

Dr. Sc., As. Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Члени редакційної колегії:

Агота Гедре Райшене

Agota Giedre Raisiene

д-р екон. наук, Литва

Dr. Sc., Lithuanian Institute of Agrarian Economics,
Lithuania

Андрій Маринін

Andrii Marynin

канд. техн. наук, ст. наук. сп., Україна

Ph. D., As. Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Валерій Мирончук

Valerii Myronchuk

д-р техн. наук, проф., Україна

Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Василь Кишенько

Vasyl Kyshenko

канд. техн. наук, доц., Україна

Ph. D., As. Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Василь Пасічний

Vasyl Pasichnyi

д-р техн. наук, проф., Україна

Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

В'ячеслав Івашук

Vyacheslav Ivaschuk

д-р техн. наук, проф., Україна

Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Віктор Стабніков

Viktor Stabnikov

д-р техн. наук, проф., Україна

Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Володимир Зав'ялов

Volodymyr Zavialov

д-р техн. наук, проф., Україна

Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Галина Поліщук

Halyna Polishchuk

д-р техн. наук, проф., Україна

Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Герхард Шльонінг

Gerhard Schleining

д-р техн. наук, Австрія

Dr. Sc., Prof., University of Natural Resources, Austria

Дайва Лескаускайте

Daiva Leskauskaite

д-р техн. наук, проф., Литва

Dr. Sc., Prof., Kaunas University of Technology, Lithuania

Кристина Сильва

Cristina L. M. Silva

д-р техн. наук, проф., Португалія

Dr.Sc., Prof., University de Catolica, Portuguesa

Лада Шірінян

Lada Shirinyan

д-р екон. наук, проф., Україна

Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies,
Ukraine

Лариса Арсеньєва Larisa Arsenyeva	д-р техн. наук, проф., Україна Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Микола Костіков Mykola Kostikov	канд. техн. наук, доц., Україна Ph. D., As. Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Наталія Луцька Nataliia Lutska	канд. техн. наук, доц., Україна Ph. D., As. Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Оксана Скроцька Oksana Skrotska	канд. б. наук, доц., Україна Ph. D., As. Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Олександр Бутнік-Сіверський Oleksandr Butnik-Siverskyi	д-р екон. наук, проф., Україна Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Олександр Гавва Oleksandr Gavva	д-р техн. наук, проф., Україна Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Олена Драган Olena Dragan	д-р екон. наук, проф., Україна Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Олена Стабнікова Olena Stabnikova	канд. техн. наук, доц., Україна Ph. D. As., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Ольга Петухова Olga Pietukhova	д-р екон. наук, проф., Україна Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Паола Піттія Paola Pittia	д-р техн. наук, проф., Італія Dr. Sc., Prof., University of Teramo, Italy
Світлана Бондаренко Svitlana Bondarenko	д-р хім. наук, проф., Україна Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Світлана Літвинчук Svitlana Litvynchuk	канд. техн. наук, доц., Україна Ph. D., As. Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Сергій Чумаченко Serhii Chumachenko	д-р техн. наук, ст. наук. сп., Україна Dr. Sc., As. Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Сергій Балута Sergii Baluta	д-р техн. наук, проф., Україна Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Сергій Грибков Sergii Hrybkov	д-р техн. наук, проф., Україна Dr. Sc., Prof., National University of Food Technologies, Ukraine
Хууб Лелієвельд Huub Lelieveld	д-р наук, проф., Нідерланди Dr. Sc., Prof., Founder of the Global Harmonization Initiatives, the Netherlands

Автоматизація та інформаційні технології

Мельник В. С., Смітюх Я. В. Імітаційне моделювання конвективної сушарки періодичної дії як об'єкта керування

Безпека харчових продуктів і виробництв

Євтушенко О. В., Сірик А. О., Литвинчук С. І., Маринін А. І., Святненко Р. С. Забезпечення якості та безпечності продуктів бджільництва в умовах євроінтеграції

Біотехнології

Воронцов О. О., Стабніков В. П. Інтенсифікація метаногенезу шляхом попередньої обробки сировини

Скροцька О. І., Жолобка О. В. Наночастинки селену в харчовій промисловості та сільському господарстві: сучасний стан досліджень, перспективи та нормативна база ЄС

Гіріна А. С., Грегірчак Н. М. Розвиток ресурсозберігаючих технологій валоризації яблучних відходів у виробництві ферментованих напоїв: перспективи сталого розвитку в Україні

Механічна та електрична інженерія

Булій Ю. В. Моделювання фазової рівноваги в системі етиловий спирт—вода для оптимізації роботи брагоректифікаційних установок

Балиута С. М., Копилова Л. О., Жуков М. Ю. Автоматизоване керування зарядкою електромобілів з оптимізацією оплати за електричну енергію

Мусійчук В. М., Гавва О. М., Чепелик О. М., Чепелик О. О. Багатокритеріальне оцінювання технічного рівня обладнання для наповнення оболонок в'язко-пластичними харчовими масами

Чубенко В. В., Іващенко Н. В., Бондар В. І. Перспективи вдосконалення батарей Карно для довготривалого зберігання відновлюваної енергії

Запорожець Ю. В., Зав'ялов В. Л., Санига В. Я., Шпак В. В. Вплив електроіскрових розрядів на властивості сокоотружкової суміші при віброекстрагуванні з некондиційної бурякової маси

Automation and information technologies

8 *Melnyk V., Smityukh Y.* Simulation modeling of a batch convective dryer as a control object

Food Products and Manufacturing Safety

23 *Yevtushenko O., Siryk A., Litvynchuk S., Marynin A., Svyatnenko R.* Ensuring the quality and safety of beekeeping products in the conditions of european integration

Biotechnologies

41 *Vorontsov O., Stabnikov V.* Intensification of methanogenesis through pre-treatment of raw material

60 *Skrotska O., Zholobko O.* Selenium nanoparticles in the food industry and agriculture: current status of research, prospects and EU regulatory framework

77 *Hirina A., Hrehirchak N.* Development of resource-saving technologies for the valorization of apple waste in the production of fermented beverages: prospects for sustainable development in Ukraine

Mechanical and Electrical Engineering

88 *Bulii Yu.* Modelling of phase equilibrium in the ethyl alcohol-water system for optimising the operation of distillation plants

99 *Baliuta S., Kopylova L., Zhukov M.* Automated control of electric vehicle charging with optimization of electricity payment

115 *Musiichuk V., Gavva O., Chepeliuk O., Chepeliuk O.* The multi-criterion evaluation of the technical level of equipment for filling shells with viscoplastic food mass

126 *Chubenko V., Ivashchenko N., Bondar V.* Advancing Carnot batteries for long-duration renewable energy storage

147 *Zaporozhets Yu., Zavialov V., Sapiga V., Shpak V.* The effect of electric spark discharges on the properties of the juice-pulp mixture during vibroextraction from substandard beet mass

- 161 *Туфєкчі В. І., Токарчук С. В., Гавва О. О., Мйрончук В. Г.* Інтелектуальні методи локалізації об'єктів у робототехнічних системах
- 175 *Запорожець О. В., Володін С. О., Савчук О. С., Марценкевич Л. В.* Системний аналіз та оптимізація динамічних характеристик безклапанних дозаторів напірного типу

Харчові технології

- 189 *Шевченко А. О., Загорулко А. М.* Вплив способів внесення порошку топінамбура в тісто з фруктозою для хлібобулочних виробів на показники їхньої якості
- 201 *Ощипок І. М.* Порівняльний аналіз цінності свинячих туш на основі сучасних методів та інструментів оцінювання якості
- 216 *Юкало В. Г., Дацишин К. Є., Левін Д. С.* Комбінація декстранових гелів для виділення лактоферину з сироватки молока гел'фільтрацією в нативних умовах
- 226 *Котляр Є. О., Єгоров Б. В.* Натуральні харчові добавки з виноградного насіння та ядер кісточкових фруктів
- 247 *Карапєтян А. А., Поварова Н. М.* Інноваційна білкова добавка як елемент оптимізації рецептури рубаних м'ясних напівфабрикатів
- 268 *Сімахіна Г. О., Науменко Н. В.* Ягоди шовковиці: оздоровчі ефекти біокомпонентів та мінімізація їх втрат при зберіганні
- 285 *Носенко Т. Т., Клименко О. С.* Синергічна дія антиоксидантів бутилгідрокситолуолу та бутилгідроксисанізолу на окиснювальну стабільність соєвої олії
- 295 *Луканін О. С., Мельник Н. Б.* Формування ароматичного комплексу плодових дистилатів (на прикладі Вінницької обл.)
- 307 *Махінко В. М., Грищенко А. М., Махінко Л. В., Костюк А. І.* Оцінювання структури хліба: огляд основних методик та їх застосування
- 326 *Страшинський І. М., Пергат О. А.* Дослідження впливу пшеничної клітковини на властивості м'ясних і м'ясомістких котлет-бургерів
- 335 *Білик О. А., Бурченко Л. М., Бондаренко Ю. В., Краєвська С. П.* Застосування Muntions maltichoc dried regular як натурального барвника та смако-ароматуютьуючого інгредієнта в технології тостового хліба

Food Technologies

- 189 *Shevchenko A., Zahorulko A.* Influence of methods of adding artichoke powder into dough with fructose for bakery products on their quality indicators
- 201 *Oshchypok I.* Comparative analysis of the value of pork carcasses based on modern methods and quality assessment tools
- 216 *Yukalo V., Datsyshyn K., Levin D.* Combination of dextran gels for the obtaining of lactoferrin from milk whey by gel filtration in native conditions
- 226 *Kotliar Ye., Iegorov B.* Natural food supplements from grape seeds and stone fruit kernels
- 247 *Karapetian A., Povarova N.* Innovative protein additive as a component for optimizing the formulation of minced meat semi-finished products
- 268 *Simakhina G., Naumenko N.* Mulberries: the healthy effects of biocomponents and minimizing their losses during storage
- 285 *Nosenko T., Klymenko O.* Synergic effect of antioxidant butylhydroxytoluene and butylhydroxyanisole on the soybean oil oxidation stability
- 295 *Lukanin O., Melnyk N.* Formation of the aromatic complex of fruit distillates (based on the example of Vinnytsia region)
- 307 *Makhynko V., Hryshchenko A., Makhynko L., Kostyuk A.* Evaluation of bread structure: a review of principal methods and their applications
- 326 *Strashynskyi I., Perhat O.* Influence of wheat fiber on the properties of meat and meat-containing burger patties
- 335 *Bilyk O., Burchenko L., Bondarenko Yu., Kraievskaya S.* Application of Muntions maltichoc dried regular as a natural colorant and flavor-forming ingredient in toast bread technology

- Шидакова-Каменюка О. Г., Шкляєв О. М., Загорулько О. Є., Черевко О. І., Касабова К. Р. Оцінка якості кремово-збивних цукерок з насінням чіа в процесі зберігання 353 *Shydakova-Kamieniuka O., Shklyaiiev O., Zagorulko O., Cherevko O., Kasabova K. Evaluation of the quality of cream-whipped candies with chia seeds during storage*

SIMULATION MODELING OF A BATCH CONVECTIVE DRYER AS A CONTROL OBJECT

V. Melnyk, <https://orcid.org/0009-0005-3477-9344>

Y. Smityukh, <https://orcid.org/0000-0002-5411-3284>

National University of Food Technologies

Key words:

*Drying
Batch convective dryer
Modeling
Simulation model
Automatic control*

Article history:

Received 07.11.2025

Received in revised form
18.11.2025

Accepted 10.12.2025

Corresponding author:

V. Melnyk

E-mail:

melnikvs@ukr.net

Citation: Мельник В. С.,
Смітюх Я. В. (2025). Імі-
таційне моделювання кон-
вективної сушарки періо-
дичної дії як об'єкта ке-
рування. *Наукові праці*
НУХТ, 31(6), 8—22.
DOI: 10.24263/2225-
2924-2025-31-6-3

ABSTRACT

The problem of modeling convective drying processes of food products in batch dryers is shown in the article. Traditional mathematical models of physical drying processes are excessively complex and require substantial computational resources, while neural network approaches are limited by interpretability and stability beyond the training data, with inherent risks of overfitting and unpredictable behavior outside training modes. In this context, simulation models serve as a balanced compromise, as they are based on experimental data, relatively simple to implement, and provide sufficient accuracy for automation tasks.

The aim of the study was to develop and investigate a simulation model of a batch convective dryer capable of reproducing the dynamics of temperature in the drying chamber and the change in the mass of the loaded material during the drying process. For this purpose, data obtained from a custom-designed experimental setup were used. In the experiments, the control input was the variation of the heater power, while automatic synchronous measurements of the drying chamber temperature and the mass of the loaded material were carried out. The model was implemented in MATLAB/Simulink and structurally consisted of two subsystems: a temperature modeling subsystem and a mass modeling subsystem. The simulation model was constructed using standard mathematical functions according to the principle of maximum similarity between its input and output signals and the experimental data.

The model demonstrated sufficient accuracy compared to the experimental data — the average error did not exceed 7% of the parameter variation range and adequately reproduced all stages of the drying process. The proposed model can be applied for research and testing of automatic control algorithms for batch dryers.

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНВЕКТИВНОЇ СУШАРКИ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

В. С. Мельник, <https://orcid.org/0009-0005-3477-9344>

Я. В. Смітюх, <https://orcid.org/0000-0002-5411-3284>

Національний університет харчових технологій

У статті розглянуто проблему моделювання процесів конвективного сушіння харчових продуктів у сушарках періодичної дії. Традиційні математичні моделі фізичних процесів сушіння є надмірно складними й вимагають значних обчислювальних ресурсів, нейромережеві підходи обмежені інтерпретованістю та стабільністю за межами навчальних даних, мають ризики перенавчання та непередбачуваної поведінки моделі поза навчальними режимами. У цьому контексті імітаційні моделі виступають збалансованим компромісом, оскільки базуються на експериментальних даних, є відносно простими в реалізації та забезпечують достатню адекватність для завдань автоматизації.

Метою дослідження є побудова і аналіз імітаційної моделі конвективної сушарки періодичної дії, здатної відтворювати динаміку температури в сушильній камері та зміну маси завантаженої сировини під час процесу сушіння. Для цього було використано дані, отримані на побудованій експериментальній установці. Керуючим впливом у ході експериментів була зміна потужності нагрівального елемента, проводились автоматичні синхронні вимірювання температури в камері сушарки та ваги завантаженої сировини. Модель реалізована у середовищі MATLAB/Simulink та структурно складається з двох підсистем: підсистеми моделювання температури та підсистеми моделювання маси завантаження. Побудова імітаційної моделі здійснювалася на основі типових математичних функцій за принципом максимальної подібності її вхідних і вихідних сигналів експериментальним даним.

Модель показала достатню точність порівняно з експериментальними даними — середня похибка не перевищує 7% діапазону зміни параметрів та адекватно відтворює всі етапи процесу сушіння. Запропонована модель може застосовуватись для дослідження та відпрацювання алгоритмів автоматичного керування сушарками періодичної дії.

Ключові слова: сушіння, конвективна сушарка періодичної дії, моделювання, імітаційна модель, автоматичне керування.

Постановка проблеми. Сушіння є однією з найпоширеніших і найенергоємніших операцій у харчовій промисловості. Для багатьох харчових продуктів (овочі, фрукти, м'яси та рибні вироби) сушіння є операцією, що визначає їх термін зберігання й органолептичні характеристики. Витрати енергії на сушіння в харчовій промисловості можуть становити від 10 до 25% від загального енергоспоживання (Defraeye, 2014; Mujumdar, 2014; da Silva et al., 2025). У деяких сегментах харчової галузі, наприклад, при виробництві снеків, ця частка є ще більшою і може перевищувати 50% від загальних витрат (Akgün, & Konaş, 2024).

У промисловості широко застосовуються конвективні сушарки періодичної

дії, які мають низьку вартість і є доступними для малопотужних виробництв, відносно простоті у конструкції й експлуатації, працюють з різною сировиною. Для харчової промисловості, зокрема для сушених продуктів, готових до вживання, а також продукції з високою доданою вартістю (трави, спеції, чаї), такі сушарки є основними (Kumar et al., 2014; Yu, Li, & Gao, 2025). Проте цей тип обладнання характеризується низьким коефіцієнтом корисної дії: значна частина теплоти втрачається з відпрацьованим повітрям, а середній коефіцієнт корисної дії часто не перевищує 30—40%. Це зумовлює актуальність досліджень, спрямованих на підвищення енергоефективності та керованості таких сушарок.

Одним із основних інструментів підвищення ефективності процесів є їх автоматизація. Автоматизація процесу сушіння дасть змогу покращити й стабілізувати якість кінцевої продукції, знизити витрати енергії та мінімізувати людський фактор. Важливим етапом у розробці та дослідженні систем автоматичного керування є моделювання — створення моделей, які відтворюють технологічний процес і дають змогу проводити дослідження алгоритмів керування в багаторазових модельних експериментах.

Створення адекватних математичних моделей процесу сушіння на основі аналізу фізичних процесів є складним завданням (Chen, 2023). Теоретичні моделі сушіння базуються на рівняннях тепломасообміну, дифузії, конвекції, капілярних ефектах, враховують зміну фізичних властивостей сировини в процесі дегідратації. Деякі з цих рівнянь є громіздкими, складними, нелінійними, потребують значних обчислювальних ресурсів для розв'язання, мають багато параметрів, які важко точно визначити експериментально. Значне спрощення математичної моделі може привести до втрати її адекватності та точності. Альтернативою фізико-математичним можуть бути нейромережеві моделі. Нейронні мережі можуть мати хорошу точність у відтворенні експериментальних даних, особливо неперервних процесів, проте вони мають деякі складнощі для моделювання конвективних сушарок періодичної дії. Особливістю процесу сушіння в сушарках періодичної дії є наявність різних етапів з нелінійними переходами. Для нейромережевих моделей це створює труднощі, вони часто погано узагальнюють поведінку на межах режимів, можуть мати «артефакти» при перемиканні (He, Xu, & Liao, 2023; Poli, Massaroli, Yamashita, & Asama, 2021; Záhonyi, Fekete, Szabó, Nagy, & Nagy, 2025). Також є ризики перенавчання та непередбачуваної поведінки моделі поза навчальними режимами.

Імітаційні моделі для процесу сушіння є компромісом між складними математичними моделями та нейромережевими моделями, які мають обмежену інтерпретованість і труднощі у знаходженні балансу між складністю їх структур і практичною ефективністю, особливо для нелінійних процесів. Імітаційні моделі будуються на основі експериментальних даних і тому дають змогу відтворювати поведінку реального об'єкта. Імітаційні моделі, на відміну від аналітичних, не вимагають обов'язкового відтворення фізичних процесів об'єкта, а орієнтовані на максимальну подібність результатів моделювання до експериментальних даних. Їхні переваги: відносна простота побудови, як правило, низькі обчислювальні вимоги, можливість просто поєднувати неперервні і нелінійні частини з логікою перемикання. Недолік імітаційних моделей у тому, що вони менш універсальні — точність залежить від набору експериментальних даних, а для інших типів суша-

рок, продуктів чи умов потрібна повторна ідентифікація параметрів чи взагалі перебудова структури моделі. Для конвективних сушарок періодичної дії, які не належать до небезпечних об'єктів, є можливість отримання експериментальних даних практично в усьому діапазоні можливих режимів роботи, що дає змогу будувати імітаційні моделі з достатньою адекватністю й точністю. Для розробки систем автоматичного керування такі моделі є достатніми, оскільки вони містять інформацію про режими функціонування сушарки й забезпечують можливість відпрацювання реакцій системи керування. Висока точність не є критичною вимогою, оскільки модель застосовується не для розрахунку конструкції сушарки чи оптимізації технологічних режимів, а для перевірки та налаштування алгоритмів керування в різних режимах роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток підходів до моделювання процесів сушіння відображає загальну тенденцію в інженерних науках — від класичних фізико-математичних моделей до напівемпіричних, емпіричних, імітаційних методів і до сучасних підходів, орієнтованих на експериментальні дані (Akter, Muhury, Sultana, & Deb, 2022).

Залежно від масштабу розрізняють три види моделей процесів сушіння: мікромасштабні (*microscale*), які описують перенесення вологи та тепла на рівні пор і клітин, макромасштабні (*macroscale*), що враховують інтегральні характеристики продукту або сушарки, а також багатомасштабні (*multiscale*), які поєднують обидва підходи для більш точного відображення фізичних процесів (Akter et al., 2022).

Традиційно моделювання сушарок ґрунтується на просторових фізико-математичних моделях, де процеси описуються рівняннями теплопереносу, масопереносу, рівняннями Нав'є-Стокса та іншими рівняннями, що описують всю складність процесів у сушарках (Wang, Chen, & Mujumdar, 2007; Szpicer et al., 2025). Такі моделі забезпечують високу точність, але вимагають значних обчислювальних ресурсів для їх розв'язання. Прикладом такого підходу в прикладній інженерії є обчислювальна гідродинаміка (*CFD models*), що використовує чисельні методи скінченних елементів і скінченних об'ємів для аналізу процесів сушіння (Ahmad et al., 2023). CFD активно застосовують для проєктування промислових зерносушарок, сушарок для фармацевтичних матеріалів тощо (Defraeye, 2014; Norton, & Sun, 2006).

Оскільки просторові моделі виявилися інформаційно надлишковими і занадто складними для практичного використання, широке застосування отримали моделі із зосередженими параметрами (*lumped models*). Вони розглядають сушарку як однорідний, зосереджений в просторі об'єкт і описують зміну температури чи вологості через звичайні диференціальні рівняння (Cai et al., 2023). У напрямку моделювання в харчовій промисловості та сільському господарстві набули поширення так звані тонкошарові моделі сушіння (*thin-layer drying models*), наприклад, моделі Page, Henderson-Pabis, Midilli-Kucuk. Вони зручні для апроксимації експериментальних даних і широко використовуються для оцінки кінетики сушіння зерна та овочів (Ertekin, & Firat, 2015; Kaleemullah, & Kailappan, 2005).

Поширені також суто емпіричні та статистичні підходи до моделювання, де експериментальні криві вологості апроксимуються поліноміальними чи іншими функціями. Такі моделі не мають фізичної інтерпретації, але ефективні для швидкої оцінки процесів у промислових умовах. Прикладами є моделі Wang-Singh та

інші регресійні залежності, що дають змогу відтворювати інформацію про хід сушіння без урахування внутрішніх фізичних процесів (Sacilik, Keskin, & Elicin, 2006; Ertekin, & Firat, 2015).

Окремий напрямок представляють імітаційні моделі (*simulation models*), які будуються на основі експериментальних даних і логіки функціонування об'єкта без обов'язкового опису всіх фізичних процесів (Li, 2023). Такі моделі придатні для задач системної ідентифікації та проєктування систем автоматичного керування (Ljung, 1999). Сюди можна віднести і так звані моделі типу «сірий ящик» (*grey-box models*), які поєднують відомі фізичні співвідношення з емпірично оціненими параметрами (Pitarch, Sala, & de Prada, 2019).

Наступним етапом стали моделі, побудовані на експериментальних даних (*data-driven models*), що базуються на сучасних методах машинного навчання та штучних нейронних мережах (Chen, 2023; Francik et al., 2024). Вони виявилися ефективними для опису залежностей по великих масивах експериментальних даних. Такі підходи використовуються для прогнозування кінетики сушіння фруктів, овочів і зернових культур, проте вони втрачають інтерпретованість з ростом складності мереж, є чутливими до якості даних і «перенавчання», можуть вимагати спеціальних методів їх побудови у випадку складних нелінійних процесів (Poli, Massaroli, Yamashita, & Asama, 2021; Záhonyi, Szabo, Hegyháti, & Abonyi, 2025; Wang, 2025).

Незважаючи на широкий спектр наукових досліджень процесів сушіння, у цій сфері залишаються невирішеними багато питань. В напрямку автоматизації сушарок, особливо періодичної дії, потребує уваги питання побудови моделей процесу придатних для дослідження саме систем керування. Теоретичні CFD-моделі не є ефективними для задач автоматизації через їх складність, інформаційну надлишковість і високі вимоги до обчислювальних ресурсів, а також непристосованість середовищ їх розробки для дослідження систем керування. Тонкошарові моделі не відображають фазових переходів і перемикань у реальних сушарках періодичної дії. Нейромережеві методи, хоча і можуть мати високу точність у межах навчальних даних, залишаються нестабільними за їх межами та можуть погано працювати в нелінійних перехідних процесах. Grey-box моделі та імітаційні моделі дають змогу описати поведінку об'єкта достатньо точно, але не є універсальними та потребують подальшого розвитку і досліджень, особливо для сушарок періодичної дії.

Мета дослідження: синтез і дослідження імітаційної моделі конвективної сушарки періодичної дії, яка повинна адекватно відтворювати динаміку основних змінних процесу — температури середовища в сушарці та маси завантаженої сировини. Модель повинна забезпечувати достатню відповідність експериментальним даним і відтворювати всі характерні етапи процесу сушіння та в подальшому легко інтегруватися із розроблюваними моделями систем керування.

Матеріали і методи. Імітаційна модель конвективної сушарки періодичної дії розроблена на основі експериментальних даних, отриманих із побудованої експериментальної установки (Мельник, & Смітюх, 2024). Установка являє собою конвективну сушарку періодичної дії камерного типу, обладнану електричним нагрівачем і системою примусової циркуляції повітря. Сушильна камера має конструкцію, що дає змогу розміщувати сировину на багаторушних сітках із вільним доступом гарячого повітря з усіх боків. Єдиним керуючим впливом у ході експери-

ментів була зміна потужності нагрівального елемента, що здійснювалася з сенсорної панелі оператора згідно з планом експерименту. Інші можливі впливи під час досліджень не використовувалися, оскільки потрібно було отримати ізольований вплив саме змін потужності нагрівача на динаміку температури та маси завантаження. Як сировину для експериментів використовувалися яблука сорту «Golden Delicious», які нарізалися кільцями однакової товщини та укладалися на сітки в один шар.

З метою отримання даних про перехідні процеси було проведено серію експериментів із стрибкоподібними змінами потужності нагрівача. У процесі дослідів проводилися автоматичні вимірювання основних параметрів: температури повітря в камері (з точністю 0,1 °C), маси сировини (з точністю 1 г), а також інших додаткових параметрів (Мельник, & Смітюх, 2024). Усі дані записувалися автоматично, синхронно з періодом 20 секунд у SQL-базі даних. Паралельно параметри процесу відображалися на сенсорній панелі оператора у текстовому й графічному вигляді, що дало змогу здійснювати моніторинг експерименту в реальному часі.

Після завершення експериментів дані експортувалися із SQL-базу у формат, сумісний із Microsoft Excel. У цьому середовищі здійснювалася візуалізація кривих зміни температури та маси, попередній аналіз і виділення характерних ділянок процесу. Це дало змогу сформулювати базу для подальшої ідентифікації параметрів моделі. Частина емпіричних коефіцієнтів (коефіцієнти передачі, постійні часу) обчислювалась у середовищі MATLAB з використанням написаного скрипта. Для простіших показників, таких як коефіцієнти нахилу лінійних частин графіків, застосовувався інструментарій Microsoft Excel.

Імітаційна модель була реалізована в середовищі MATLAB/Simulink. Вибір цього середовища обумовлений його широким використанням для моделювання динамічних систем і систем автоматичного керування. MATLAB/Simulink надає розвинені і зручні для використання засоби для побудови моделей та аналізу отриманих даних. Використання цього середовища у подальшому надасть можливість інтегрувати розроблену модель сушарки з моделями систем автоматичного керування, відпрацьовувати різні стратегії керування та проводити багаторазові обчислювальні експерименти для оцінки й оптимізації якості їх роботи.

Адекватність побудованої імітаційної моделі оцінювалась шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними даними. На вхід моделі подавалися такі ж зміни потужності нагрівача, що використовувалися в експериментах, а також різні варіації впливів для перевірки адекватності її реакції. Для оцінки відповідності застосовувалися загальноприйняті критерії: середня абсолютна похибка (MAE), середньоквадратична похибка (RMSE), середня абсолютна відносна похибка (MAPE), коефіцієнт детермінації (R^2). Обчислення цих показників проводилося у MATLAB, де було реалізовано спеціальний скрипт для автоматизації розрахунків із використанням вбудованих функцій MATLAB.

Викладення основних результатів дослідження. Імітаційна модель конвективної сушарки періодичної дії реалізована в середовищі MATLAB/Simulink (рис. 1). Блок імітаційної моделі сушарки періодичної дії (блок Dryer) має такі входи і виходи:

- вхід P — потужність нагрівача (%);
- вихід T — температура повітря у камері (°C);
- вихід m — маса завантаженої сировини (г).

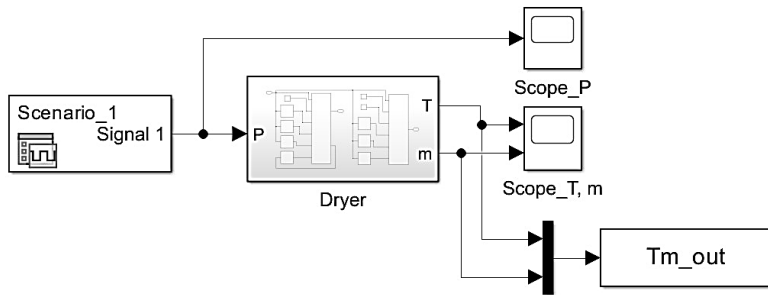


Рис. 1. Імітаційна модель сушарки (блок Dryer) в MATLAB/Simulink

Блок Signal 1 (*Signal Editor*) призначений для подачі різноманітних сценаріїв керуючого впливу на блок моделі сушарки при проведенні модельних експериментів. Блок Tm_out (*To Workspace*) призначений для передачі результатів моделювання з підсистеми Simulink в середовище Matlab для порівняння з експериментальними даними. Блоки Scope_P, Scope_T, m відображають графіки зміни завдання потужності нагрівача та вихідних сигналів моделі відповідно. Внутрішня структура блока Dryer показана на рис. 2. Блок складається з двох підсистем: підсистеми моделювання температури в сушильній камері T_Subsystem (рис. 3) та підсистеми моделювання маси завантаження в сушарці m_Subsystem (рис. 4).

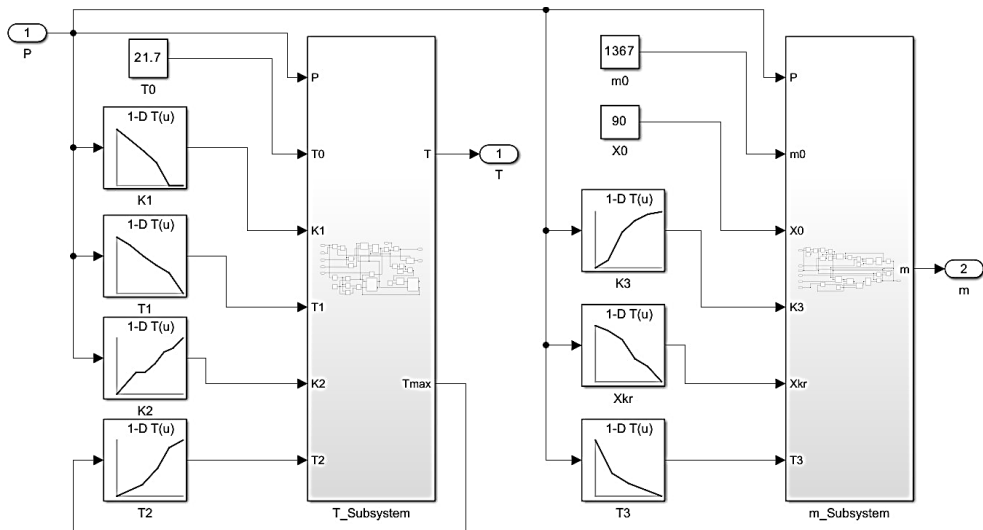


Рис. 2. Внутрішня структура блока моделі сушарки Dryer

Підсистема моделювання температури T_Subsystem має такі входи і виходи:

- вхід P — потужність нагрівача;
- вхід T0 — початкове значення температури на початку моделювання;
- входи K1, T1 — коефіцієнти настроювання динаміки зростання температури, яка моделюється аперіодичною ланкою першого порядку;

- вхід K2 — коефіцієнт настрювання темпу поступового зростання температури під час сушіння, яка моделюється лінійною функцією;

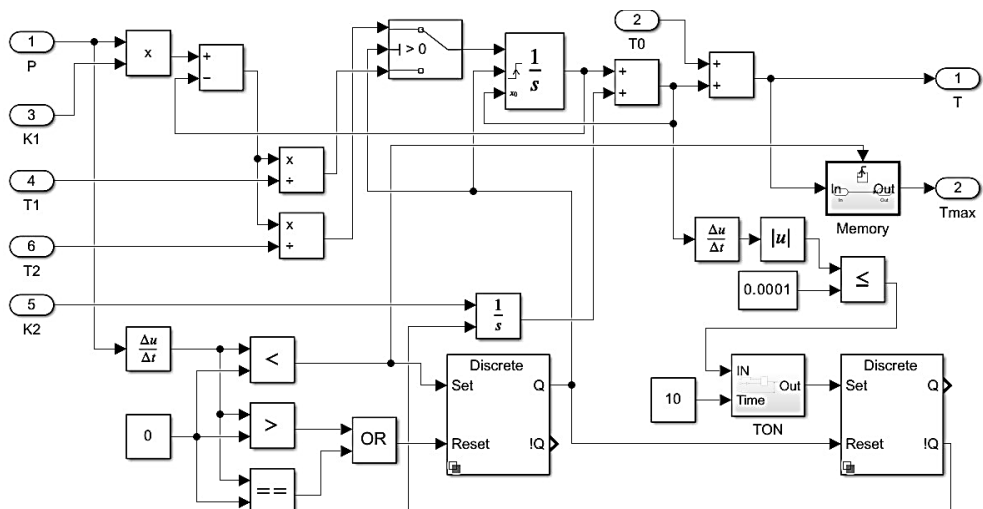


Рис. 3. Підсистема моделювання температури T_Subsystem

- вхід T2 — постійна часу динаміки спадання температури, яка моделюється аперіодичною ланкою першого порядку, коефіцієнт передачі обчислюється автоматично;

- вихід T — поточна температура в сушарці;

- вихід Tmax — температура, яка була зафіксована на початку її зниження.

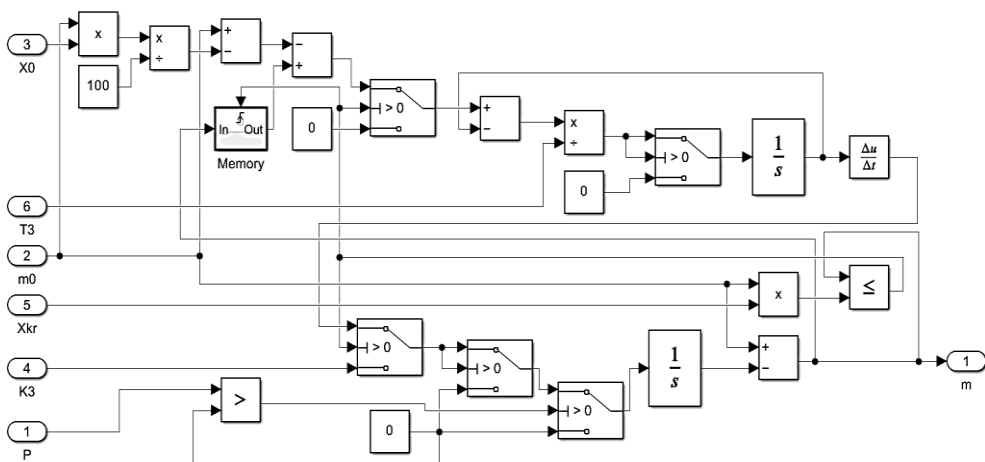


Рис. 4. Підсистема моделювання маси m_Subsystem

Підсистема моделювання маси m_Subsystem має такі входи і виходи:

- вхід P — потужність нагрівача;

- вхід m0 — початкове значення маси вологої сировини;

- вхід X_0 — початкова вологість завантаженої сировини;
- вхід K_3 — коефіцієнт настроювання постійної швидкості сушіння, яка моделюється лінійною функцією;
- вхід X_{kr} — критична точка переходу від етапу сушіння із постійною швидкістю до етапу сушіння із спадаючою швидкістю;
- вхід T_3 — постійна часу динаміки етапу сушіння із спадаючою швидкістю, яка моделюється аперіодичною ланкою першого порядку, коефіцієнт передачі обчислюється автоматично;
- вихід m — поточна маса в сушарці.

Коефіцієнти настроювання визначались з отриманих експериментальних даних реакції сушарки на включення електричного нагрівача із заданою потужністю, а потім на вимкнення при припиненні зменшення маси завантаження в сушарці. Були проведені експерименти із завданнями потужності нагрівача 30%, 40%, 50%, 60%, 70% та з іншими однаковими умовами, проте ідентичність розміщення завантаження відтворити точно важко.

Залежності коефіцієнтів настроювання моделі від заданої потужності нагрівача (єдиного вхідного сигналу, який змінювався при проведенні експериментів), або від даних експериментальних вимірювань, задавалися у вигляді таблиць співвідношень блоками табличної апроксимації (*n-D Lookup Table*), які мають можливість проведення інтерполяції та екстраполяції різними методами.

На рис. 5 представлено експериментальні криві зміни температури та маси завантаженої сировини при заданій потужності нагрівача 50%, завантаженні 1298 г, початковій температурі 24,7 °C та початковій вологості 90%.

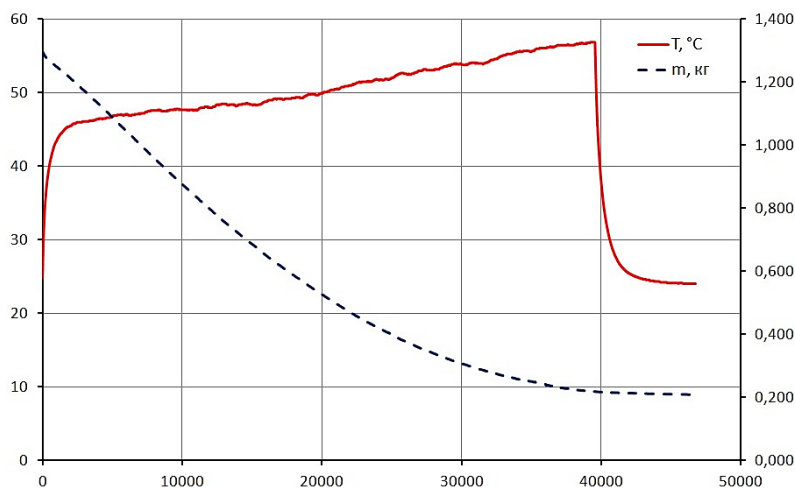


Рис. 5. Експериментальні результати сушіння при потужності 50%

На рис. 6 наведено результат імітаційного моделювання при заданій постійній потужності, початковій масі, вологості й температурі ідентичним експерименту на рис. 5. Модель коректно відтворює початкове швидке зростання температури до певного усталеного рівня, потім йде поступове повільне невелике збільшення

температури разом із висушуванням сировини. При виключенні нагрівання відбувається плавне зменшення температури. Цим етапам відповідає поступове зменшення маси сировини з чітко вираженим переходом від постійної швидкості сушіння до спадної швидкості сушіння. Це відповідає класичним уявленням про кінетику сушіння харчових матеріалів (Ertekin, & Firat, 2015).

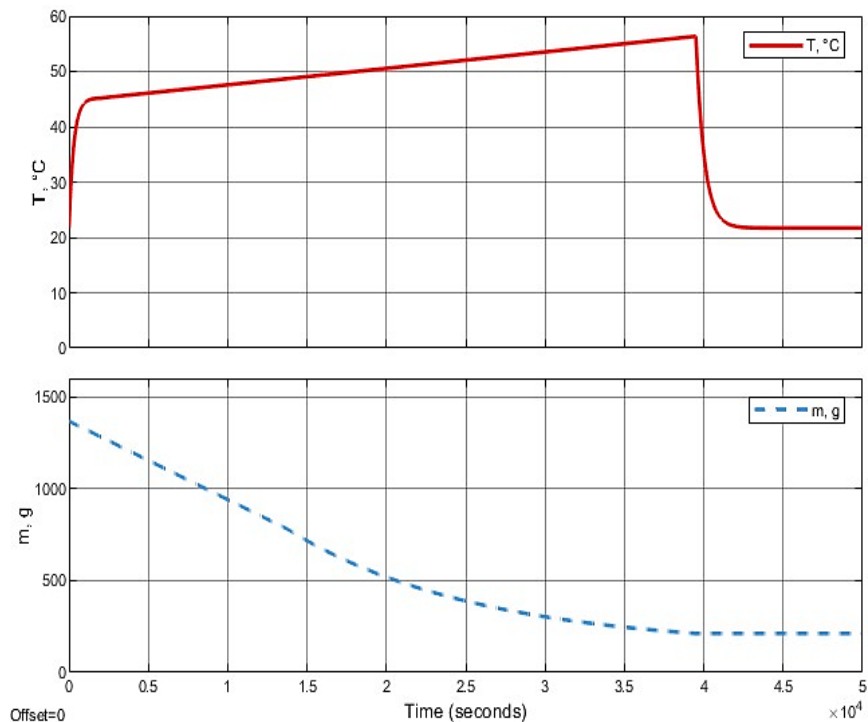


Рис. 6. Результати моделювання сушарки при потужності нагрівача 50%

Для оцінки адекватності побудованої моделі результати імітаційних моделювання порівнювалися з експериментальними даними. Кількісна оцінка подібності здійснювалася за статистичними критеріями MAE, RMSE, MAPE, Bias, R^2 (табл. 1).

Таблиця 1. Результати порівняння результатів моделювання з експериментальними даними

Показник	T	m
MAE (<i>Mean Absolute Error</i>)	0,43 °C	23,7 г
RMSE (<i>Root Mean Square Error</i>)	0,53 °C	29,1 г
MAPE (<i>Mean Absolute Percentage Error</i>)	0,98%	6,35%
Bias (<i>Mean Error/Systematic deviation</i>)	-0,02 °C	-23,2 г
R^2 (<i>Coefficient of Determination</i>)	99,7%	99,8%

На рис. 7 показані накладені криві експерименту та результатів моделювання для температури, а на рис. 8 — для маси завантаження.

При динамічних сценаріях, зокрема при стрибкоподібних збільшеннях потужності нагрівача в моменти досягнення температурою усталених значень, модель також продемонструвала адекватність. На рис. 9 наведено приклад, де температура коректно реагує на кожне збільшення потужності нагрівача (30%, 10%, 10%), а крива маси завантаження має відповідні ділянки зміни швидкості, що узгоджується з експериментальними спостереженнями.

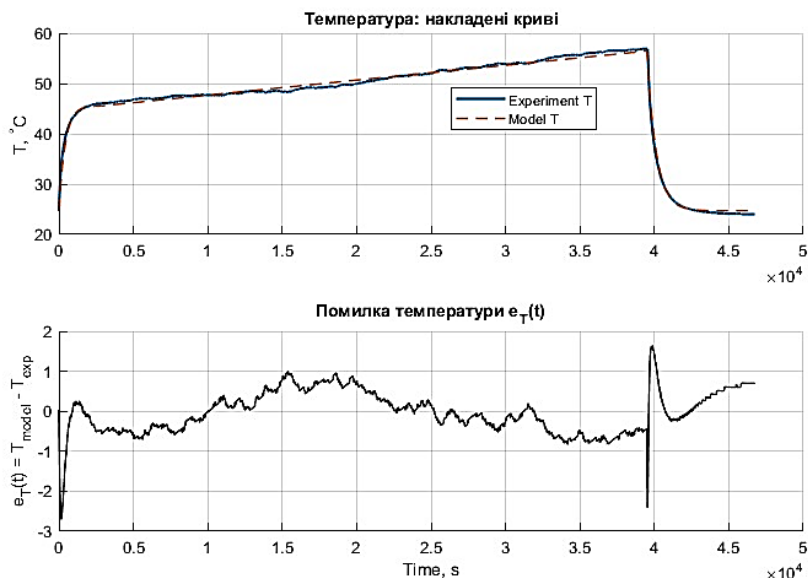


Рис. 7. Порівняння експерименту та моделювання температури

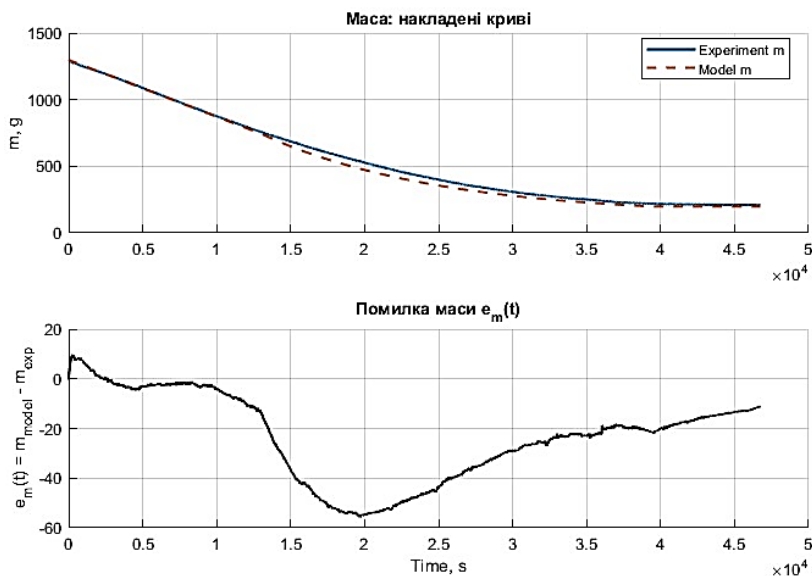


Рис. 8. Порівняння експерименту та моделювання маси

Для підтвердження універсальності підходу модель тестувалася також зміною керуючого впливу з різнонаправленими збільшеннями та зменшеннями рівня потужності на різні рівні (рис. 10), що постійно відбувається, наприклад, в контурах систем автоматичного регулювання температури сушарок. Результати моделювання (рис. 11) показали, що модель зберігає адекватність і в цих випадках.

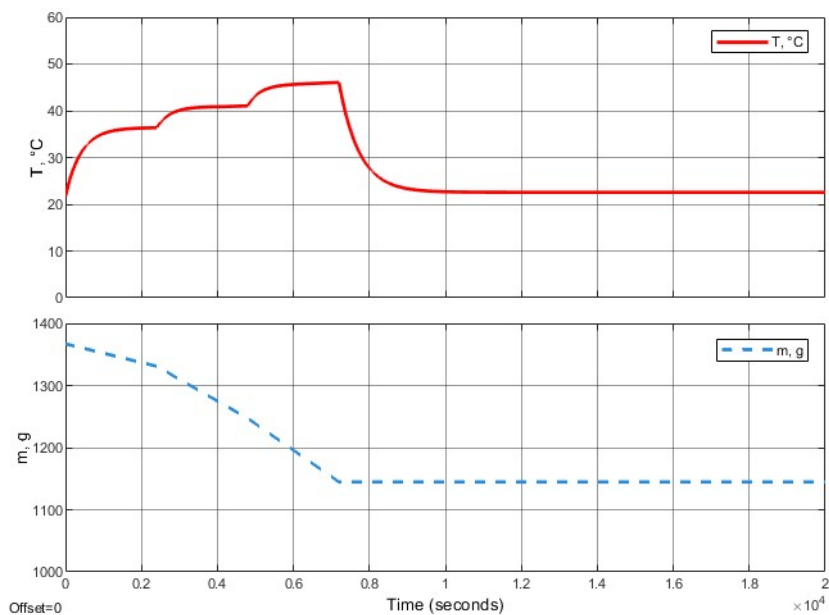


Рис. 9. Результати моделювання при покроковому збільшенні потужності нагрівача

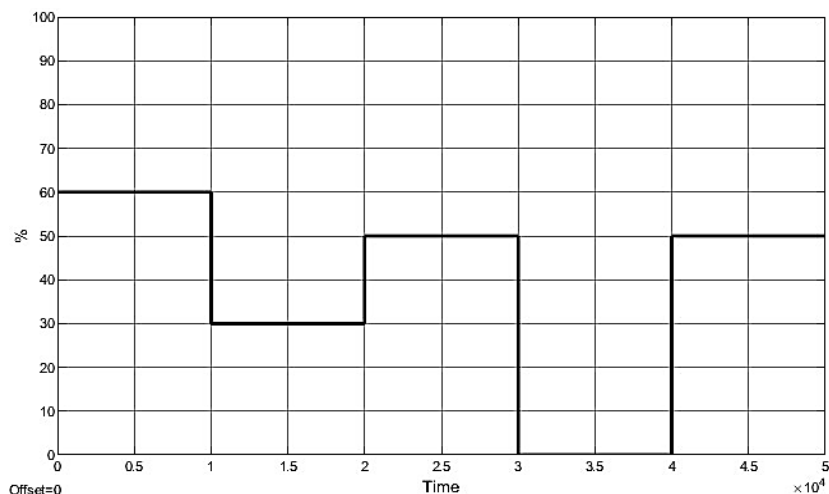


Рис. 10. Тестовий різнонаправлений сигнал зміни потужності

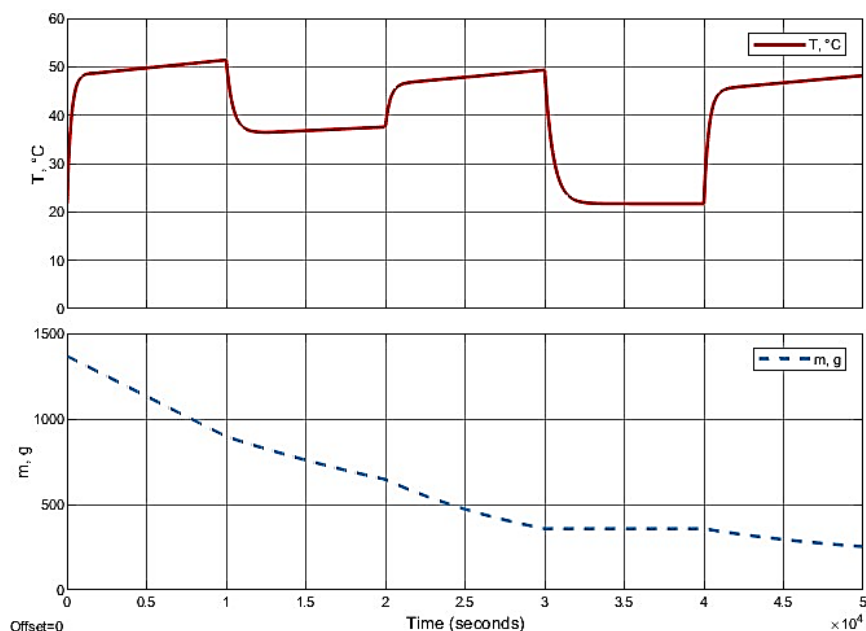


Рис.11. Результати моделювання при різнонаправленій зміні потужності

Висновки

У ході дослідження побудовано імітаційну модель конвективної сушарки періодичної дії на основі отриманих експериментальних даних. Модель реалізована в середовищі MATLAB/Simulink, що забезпечує її зручне і ефективне використання як моделі об'єкта керування для аналізу якості роботи систем автоматичного керування без необхідності проведення натурних експериментів. Побудова імітаційної моделі здійснювалася за принципом максимальної подібності її вхідних і вихідних сигналів експериментальним даним. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними підтвердили достатню точність та адекватність моделі: розроблена модель коректно відтворює динаміку температури і маси сировини в сушарці в робочих режимах, при цьому максимальні відхилення не перевищують 7% від діапазону зміни параметрів. Перевагами моделі також є простота реалізації та налаштування, низькі обчислювальні витрати при її моделюванні. У перспективі модель може вдосконалюватися шляхом додавання нових вхідних змінних для таблиць динамічної корекції параметрів її налаштування, або, наприклад, використанням для їх визначення нейронних мереж, навчених по експериментальних даних. Модель може аналогічно розширюватися підсистемами для моделювання інших контрольованих змінних процесу сушіння, наприклад, вологості повітря в сушарці.

Література

Мельник, В. С., & Смітюх, Я. В. (2024). Експериментальна установка для дослідження систем автоматичного керування сушінням харчових продуктів: матеріали XI Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне

забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами». Київ: НУХТ. <https://drive.google.com/file/d/1OUXJ1vq9oKn9cnyypPwsYRijbrPUyNrW/view?usp=sharing>.

Ahmad, A., Asghar, A., Imran, H., & Shafique, M. (2023). Thermal and CFD analyses of sustainable heat storage in greenhouse dryer. *Sustainability*, 15(15), 12067. <https://doi.org/10.3390/su151512067>.

Akgün, M., & Konaş, E. (2024). The effect of the periodic drying method on the drying time of hazelnuts and energy utilization. *Foods*, 13(6), 901. <https://doi.org/10.3390/foods13060901>.

Akter, F., Muhury, R., Sultana, A., & Deb, U. K. (2022). A Comprehensive Review of Mathematical Modeling for Drying Processes of Fruits and Vegetables. *International Journal of Food Science*, 2022, 6195257. <https://doi.org/10.1155/2022/6195257>.

Cai, J. et al. (2023). Drying kinetics of a single biomass particle using Fick's second law: A comparison between distributed and lumped parameter models. *Processes*, 11(4), 984. <https://doi.org/10.3390/pr11040984>.

Chen, C. (2023). An overview of progress, challenges, needs and trends in modeling approaches in food drying processes. *Drying Technology*. <https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2207636>.

Defraeye, T. (2014). Advanced computational modelling for drying processes: A review. *Applied Energy*, 131, 323—344. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.027>.

Ertekin, C., & Firat, M. Z. (2015). A comprehensive review of thin-layer drying models used in agricultural products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(4), 701—717. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.910493>.

Francik, S., Łapczyńska-Kordon, B., Hajos, M., Basista, G., Zawisław, A., & Francik, R. (2024). Modeling the drying process of onion slices using artificial neural networks. *Energies*, 17(13), 3199. <https://doi.org/10.3390/en17133199>.

He, J., Xu, Z., & Liao, Q. (2023). Deep neural network based adaptive learning for switched systems. *Discrete & Continuous Dynamical Systems — Series S*, 16(7), 1827—1855. <https://doi.org/10.3934/dcdss.2023066>.

Kaleemullah, S., & Kailappan, R. (2005). Modelling of thin-layer drying kinetics of red chillies. *Journal of Food Engineering*, 76(4), 531—537. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.05.049>.

Kumar, C., Karim, M. A., & Joardder, M. U. H. (2014). Intermittent drying of food products: A critical review. *Journal of Food Engineering*, 121, 48—57. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014>.

Li, X. (2023). Simulation study on coupled heat and moisture transfer in convective batch drying. *Drying Technology*, 41(10), 2143—2155. <https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2213767>.

Ljung, L. (1999). *System identification: Theory for the user* (2nd ed.). Prentice Hall.

Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of industrial drying* (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17208>.

Norton, T., & Sun, D.-W. (2006). Computational fluid dynamics (CFD) — an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 17(11), 600—620. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.05.004>.

Pitarch, J. L., Sala, A., & de Prada, C. (2019). A systematic grey-box modeling methodology via data reconciliation and SOS constrained regression. *Processes*, 7(3), 170. <https://doi.org/10.3390/pr7030170>.

Poli, M., Massaroli, S., Yamashita, A., & Asama, H. (2021). Neural hybrid automata: Learning dynamics with multiple modes and transitions. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 34, 17513—17526. <https://proceedings.neurips.cc/paper/2021/hash/5291822d0636dc429e80e953c58b6a76-Abstract.html>.

Sacilik, K., Keskin, R., & Elicin, A. K. (2006). Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*, 73(3), 231—238. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.025>.

Da Silva, R. P. P., Okeke, I. J., Thirumaran, K., Mosalpuri, M., Samadi, F., & Nimbalkar, S. (2025). Current state and future projections of drying processes in the U. S. food and pulp & paper

sectors: Energy, economic, and environmental assessment. *Energy Reports*. Advance online publication. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5281553>.

Szpicer, A. et al. (2025). Computational fluid dynamics simulation of thermal processes in food drying: Application of Navier-Stokes, energy, and species transport equations. *Applied Sciences*, 15(1), 424. <https://doi.org/10.3390/app15010424>.

Yu, P., Li, C., & Gao, X. (2025). Current status of grain drying technology and equipment: A review. *Foods*, 14(14), 2426. <https://doi.org/10.3390/foods14142426>.

Wang, Z. (2025). AI technology in smart drying of foods: A critical review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104052>.

Wang, W., Chen, G., & Mujumdar, A. S. (2007). Physical interpretation of solids drying: An overview on mathematical modeling research. *Drying Technology*, 25(4—6), 659—668. <https://doi.org/10.1080/07373930701285936>.

Záhonyi, P., Fekete, D., Szabó, E., Nagy, Z. K., & Nagy, B. (2025). Explainable artificial neural network as a soft sensor to predict the moisture content in a continuous granulation line. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 212, 107173. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2025.107173>.

ENSURING THE QUALITY AND SAFETY OF BEEKEEPING PRODUCTS IN THE CONDITIONS OF EUROPEAN INTEGRATION

O. Yevtushenko, <https://orcid.org/0000-0001-6773-682X>

A. Siryk, <https://orcid.org/0000-0002-5041-7096>

S. Litvynchuk, <https://orcid.org/0000-0002-5580-3826>

A. Marynin, <https://orcid.org/0000-0001-6692-7472>

R. Svyatnenko, <https://orcid.org/0000-0003-0895-6982>

National University of Food Technologies

Key words:

Quality

Safety

European integration

Beekeeping products

Digitalization

Blockchain technologies

Article history:

Received 06.11.2025

Received in revised form
19.11.2025

Accepted 10.12.2025

Corresponding author:

O. Yevtushenko

E-mail:

0677389857@ukr.net

Citation: Євтушенко О. В., Сірик А. О., Літвинчук С. І., Маринін А. І., Святненко Р. С. (2025). Забезпечення якості та безпечності продуктів бджільництва в умовах євроінтеграції. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 23—40.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-4

ABSTRACT

Key aspects of ensuring the quality and safety of Ukrainian beekeeping products in terms of competitiveness and further development of export potential were examined. Integration into the European system is a strategic step towards the task, which simultaneously strengthens the internal market and opens up external markets for bee products. The regulatory framework for state regulation of the quality and safety of beekeeping products was analyzed, in particular, the harmonization of domestic legislation with EU requirements within the framework of the European integration course. The modern international requirements of Codex Stan 12-1981, Directive 2001/110/EC, the updated Directive 2024/1438, Regulation No. 178/2002, which are aimed primarily at consumer protection, were considered. Special attention was paid to the theoretical aspects of implementing digital technologies in the production and supply of beekeeping products to ensure their full traceability, which complies with strict European standards and requirements, in particular, those set out in Regulation (EC) No. 178/2002 and the updated Directive (EC) 2024/1438. The main advantages of blockchain technology, which records every step of the product's movement from the apiary to the consumer, have been identified. Imutable digital records allow the origin of any beekeeping product to be instantly identified, satisfying the requirement of Regulation 178/2002 for the identification of the supplier and customers, i.e. adhering to the principle of "one step back, one step forward". Each step in the supply chain is recorded in a separate block of a decentralized database, and any participant in the chain can verify where a bee product comes from, thereby increasing the level of consumer trust. The need to use digitalization to ensure compliance with key European requirements was substantiated.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТА БЕЗПЕЧНОСТІ ПРОДУКТІВ БДЖІЛЬНИЦТВА В УМОВАХ ЄВРОІНТЕГРАЦІЇ

О. В. Євтушенко, <https://orcid.org/0000-0001-6773-682X>

А. О. Сірик, <https://orcid.org/0000-0002-5041-7096>

С. І. Літвинчук, <https://orcid.org/0000-0002-5580-3826>

А. І. Маринін, <https://orcid.org/0000-0001-6692-7472>

Р. С. Святненко, <https://orcid.org/0000-0003-0895-6982>

Національний університет харчових технологій

У статті досліджено ключові аспекти забезпечення якості та безпечності українських продуктів бджільництва щодо конкурентоспроможності та подальшого розвитку експортного потенціалу. Інтеграція в європейську систему є стратегічним кроком, який одночасно зміцнює внутрішній ринок і відкриває зовнішні ринки бджолопродуктів. Проаналізовано нормативно-правову базу державного регулювання якості та безпечності продуктів бджільництва, зокрема гармонізацію вітчизняного законодавства з вимогами ЄС у межах євроінтеграційного курсу. Розглянуто сучасні міжнародні вимоги Codex Stan 12-1981, Директиву 2001/110/ЄС, оновлену Директиву 2024/1438, Регламент № 178/2002, що спрямовані передусім на захист споживача. Окрему увагу приділено теоретичним аспектам впровадження цифрових технологій при виробництві та постачанні продуктів бджільництва для забезпечення їх повної простежуваності, що відповідає жорстким європейським нормам і вимогам, закладеним в Регламенті (ЄС) № 178/2002 та оновленій Директиві (ЄС) 2024/1438. Визначено основні переваги технології блокчейн, яка фіксує кожний крок руху продукту від пасіки до споживача. Незмінні цифрові записи дозволяють миттєво визначити походження будь-якого продукту бджільництва, задовольняючи вимогу Регламенту 178/2002 щодо ідентифікації постачальника і клієнтів, тобто дотримання принципу «на крок назад і на крок вперед». Кожен крок у ланцюжку постачання фіксується в окремому блоці децентралізованої бази даних, а будь-який учасник ланцюжка може перевірити, звідки походить бджолопродукт, підвищуючи таким чином рівень довіри споживача. Обґрунтовано необхідність використання цифровізації для забезпечення дотримання ключових європейських вимог.

Ключові слова: якість, безпечність, євроінтеграція, продукти бджільництва, цифровізація, технології блокчейн.

Постановка проблеми. Забезпечення якості та безпечності продуктів бджільництва, а також їх гармонізація зі світовими вимогами стають дедалі важливим для України через зростання експортного потенціалу та попиту на цю продукцію за кордоном. Основу експорту бджолопродукції складає мед. З 29 жовтня 2025 року набрали чинності зміни до тарифних графіків у взаємній торгівлі між Україною та Європейським Союзом, що відкриває новий етап економічного співробітництва між країнами (рішення № 3/2025, ухвалене в рамках Угоди про асоціацію між Україною та ЄС). Це створює нові можливості для українських експортерів. Для України це є вагомим сигналом про поглиблення інтеграції до

ЄС, який підвищує інвестиційну привабливість і зміцнює конкурентоспроможність українських виробників. Так, розмір квот на мед від 2021 року збільшено на 583,3% (Оновлена угода, 2025). Крім того, харчові продукти з вмістом меду за гарантування їх безпечності для споживачів також можуть стати важливим сегментом щодо експорту (Хамід, Пушка, & Гурко, 2020).

Мед є багатокомпонентним природним продуктом, оскільки містить більше чотирьохсот різних сполук (Лазарева, 2015), таких як глюкоза, фруктоза, органічні кислоти, вітаміни, мінерали, ферменти тощо, що робить його унікальним. Джерелами впливу на якість і безпечність продуктів бджільництва можуть бути чинники природного навколишнього середовища, технології утримання бджолосімей, виробництва (обробки, умови зберігання) та транспортування. Варто відмітити, що серйозною загрозою якості та безпечності меду є додавання різних харчових добавок для збільшення його маси (меляса бурякова і крохмальна, глюкоза, цукор тростинний і штучно інвертований, крохмаль, борошно, солодкі фруктові соки, желатин тощо) або отриманий у результаті підгодовлі бджіл цукром (Хамід, Пушкар, & Гурко, 2020).

Оскільки мед широко використовується як харчовий, дієтичний продукт і лікувальний засіб, необхідне збереження його природного складу і властивостей, які гарантують його якість. Отже, якість і безпечність продуктів бджільництва залежать від складної взаємодії природних умов та людської діяльності.

Євроінтеграція продуктів бджільництва — це процес наближення українського ринку бджолопродуктів (мед, віск, прополіс тощо) до стандартів та вимог Європейського Союзу для забезпечення їх конкурентоспроможності та успішного експорту. Угода про асоціацію між Україною та ЄС як ключовий каталізатор реформ створила передумови до підвищення якості та безпечності харчових продуктів вітчизняного виробництва, наближаючи українське законодавство у цій сфері до європейських стандартів. Це досягається шляхом гармонізації правової бази та запровадження європейських вимог, зокрема використання Регламентів і Директив ЄС, адже експорт української продукції бджільництва можливий лише за умови дотримання жорстких вимог та стандартів Європейського Союзу до якості, безпечності та повної прозорості ланцюга постачання. Європейські вимоги до стандартів якості та маркування меду натурального, зафіксовані у Директиві Ради № 2001/110/ЄС, є високими. Вони стосуються складу меду щодо вмісту цукрів, вологості, нерозчинних у воді компонентів, вільної кислоти, гідроксиметилфурфуролу, електричної провідності та діастазної активності за шкалою Шейда (Мельник, Шевченко, & Літвинчук, 2022). Тому особливо актуальною є проблема забезпечення якості й безпечності вітчизняної продукції бджільництва, адже це безпосередньо впливає на здоров'я споживачів та є стратегічно важливим для подальшого розвитку експортного потенціалу бджолопродуктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В Україні питання забезпечення якості та безпечності харчових продуктів є об'єктом досліджень багатьох науковців і наукових шкіл. Це міждисциплінарна галузь, що охоплює харчові технології, гігієну харчування, хімію та мікробіологію. Значний внесок зробили вчені провідних наукових шкіл з Національного університету харчових технологій, Одеської

національної академії харчових технологій, Національного університету біоресурсів і природокористування України та багато інших, де функціонують кафедри та наукові напрямки, присвячені технологічній експертизі та безпеці харчової продукції (Квітковська, Іщенко, & Іщенко, 2024; Маринін, Шевченко, & Мельник, 2024; Веліканов, Арсеньєва, & Сильчук, 2019; Пасічний, & Пампура, 2006; Святненко, Маринін, & Кочубей-Литвиненко, 2016; Переходько, & Кузьмін, 2017; Сіднева, & Рибачук-Ярова, 2013; Сімахіна, & Михайлова, 2024; Петруша, & Вашека, 2021; Українець, & Коваль, 2018; Адамчук та ін., 2022; Adamchuk et. al., 2020; Хамід, Пушкар, & Гурко, 2020). У закладах вищої освіти проводяться щорічні тематичні науково-практичні конференції, присвячені якості та безпечності харчових продуктів. Так, у Національному університеті харчових технологій проводиться щорічна Міжнародна науково-практична конференція «Якість і безпека харчових продуктів»; Одеська національна академія харчових технологій проводить міжнародні науково-практичні конференції «Технології харчових продуктів і комбікормів»; Національний університет біоресурсів і природокористування України проводить міжнародні науково-практичні конференції вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства».

Ці науковці та їх команди працюють над розробкою нових технологій виробництва безпечних продуктів, методів контролю якості, а також нормативної документації, що відповідає сучасним міжнародним стандартам. Вони постійно проводять дослідження, спрямовані на розробку нових методів контролю якості та виявлення фальсифікації харчових продуктів.

Дослідженням якості та безпечності продуктів бджільництва (меду, прополісу, пилку, маточного молочка тощо) в Україні займалися та продовжують працювати над цією темою численні науковці. Зокрема, М. Бащенко (Бащенко, 2016), Л. Лазарева та В. Постоєнко (Лазарева, Акименко, & Ковальська, 2022) удосконалювали систему оцінки якості та безпечності меду; Л. Адамчук (Адамчук та ін., 2022; Адамчук, 2022), В. Сухенко, (Адамчук, & Сухенко, 2019), І. Акульонко, Н. Генгало (Адамчук, Сухенко, & Акульонко, 2019) проводили дослідження фізико-хімічних показників якості меду; С. Фурман досліджувала безпечність, якість і біохімічний склад прополісу залежно від способу його одержання (Фурман та ін., 2024). Значний внесок зробили вчені з профільної установи, якою є Національний науковий центр «Інститут бджільництва ім. П. І. Прокоповича» НААН України (Лазарева, Акименко, & Ковальська, 2022), де функціонує лабораторія методів оцінки якості та безпечності продукції бджільництва. Основними напрямками досліджень лабораторії є розробка та впровадження методів аналізу продуктів бджільництва, а також нормативної документації відносно контролю їх якості; гармонізація національної нормативної бази щодо дослідження продуктів бджільництва з методами контролю, прийнятими в ЄС тощо.

Дослідження, що стосуються євроінтеграції ринку українських продуктів бджільництва, зосереджені на адаптації національного законодавства, гармонізації стандартів якості та розширенні експортного потенціалу, проводять науковці й галузеві експерти: провідний науковий співробітник Національного наукового центру «Інститут аграрної економіки» НАН України Б. Духницький (Духницький, 2024),

який досліджує питання експорту українського меду, зокрема його обсяги, географічну структуру з акцентом на ринок ЄС та проблеми його реалізації, в тому числі в умовах війни; голова Асоціації аграрного експорту Д. Крошка (Українські експортери, 2023), який аналізує можливості конкурентного експорту меду до ЄС та перспективи розширення української продукції на європейському ринку; науковці інституту бджільництва ім. П. І. Прокоповича НААН України, які працюють над відповідністю українських стандартів міжнародним вимогам, що є ключовим для інтеграції; науковці та експерти в рамках співпраці з «APD Ukraine» (Німецько-український агрополітичний діалог), які вивчають перспективи інтеграції українського ринку меду до ЄС та аналізують регуляторну базу (У Брюсселі, 2025). Тобто науковці та експерти у своїх дослідженнях наголошують на необхідності дотримання принципів GBP (Good Beekeeping Practices — Належна практика бджільництва) (Good beekeeping, 2021) та адаптації вітчизняного законодавства до норм ЄС, що дозволить перейти українському меду до категорії брендів медів на європейському ринку.

Аналіз вітчизняних і закордонних наукових джерел (Chirsanova, Carcanari, & Khanchel, 2021; Geană, Isopescu, & Jouceanu, 2024; Morariu et al., 2024) показує, що українські науковці та фахівці вивчають різноманітні аспекти якості й безпечності харчових продуктів, зокрема продукції бджільництва в контексті євроінтеграційних процесів. На думку авторів, перспективним науковим напрямком забезпечення якості та безпечності продуктів бджільництва в умовах євроінтеграції України є використання інновацій для підвищення конкурентоспроможності бджолопродуктів, зокрема використання цифрових технологій повної прозорості відстеження ланцюжка постачання продукції від «вулика до споживача», що є ключовою вимогою європейських споживачів.

Мета дослідження: проведення аналізу вітчизняних і світових вимог щодо якості та безпечності продуктів бджільництва і теоретичне обґрунтування перспектив використання цифрових технологій в умовах євроінтеграції України.

Матеріали і методи. Дослідження ґрунтується на аналізі вітчизняних і закордонних джерел, що стосуються аспектів забезпечення якості, безпечності та прозорості ланцюжків постачання продуктів бджільництва до ЄС. Для досягнення поставленої мети використано два основних методи: монографічний, який полягає у вивченні наукових публікацій, нормативних документів, програм і проєктів, та абстрактно-логічний, що ґрунтується на теоретичному узагальненні та формуванні висновків та рекомендацій.

Викладення основних результатів дослідження. Головним вектором зовнішньоекономічної політики України в умовах третього тисячоліття задекларовано інтеграцію до ЄС (Христенко, 2019). Початок орієнтації та практичної реалізації Європейської моделі технічного регулювання відносин у сфері встановлення, застосування та виконання обов'язкових вимог до продукції або пов'язаних з нею процесів, а також перевірки їх дотримання на відповідність основним положенням законодавства ЄС було закріплено в Угоді про партнерство та співробітництво (1994 р.), а пізніше в постанові Кабінету Міністрів України від 19.03.1997 № 244 «Про заходи щодо поетапного впровадження в Україні вимог директив Європей-

ського Союзу, санітарних, екологічних, ветеринарних, фітосанітарних норм, міжнародних і європейських стандартів» та Указі Президента України від 11.06.1998 № 615/98 «Стратегія інтеграції України до Європейського Союзу» (Крисанов, 2010). Логічним продовженням цього вектора стало отримання Україною статусу країни-кандидата на вступ до ЄС у червні 2022 року, що підтверджує взаємну зацікавленість та визнання європейської перспективи України. Інтеграція сучасних міжнародних вимог у національну систему виробництва продукції бджільництва є не просто рекомендацією, а необхідною умовою для забезпечення гарантування безпечності та досягнення конкурентоспроможності українських бджолопродуктів на світовому ринку.

Пріоритетним завданням виробників харчових продуктів не тільки в Україні, а й в інших країнах світу, є впровадження системи безпеки харчових продуктів (Хамід, Пушкар, & Гурко, 2020). У процесі євроінтеграції України та розширення експорту харчових продуктів до країн ЄС ключовими елементами забезпечення якості й безпечності продукції є впровадження системи НАССР (Hazard Analysis and Critical Control Points). Це превентивна система управління безпечністю харчових продуктів, яка базується на аналізі потенційних небезпечних факторів (біологічних, хімічних, фізичних) і встановленні критичних контрольних точок у технологічному процесі. Її мета — запобігти виникненню небезпек, а не лише реагувати на порушення. Для українських виробників харчових продуктів, у тому числі бджолопродуктів, впровадження НАССР є обов'язковою умовою відповідності вимогам Регламенту (ЄС) № 852/2004 «Про гігієну харчових продуктів» (Регламент Європейського Парламенту, 2004) і важливою передумовою для виходу на ринки ЄС. Для успішного впровадження системи НАССР (Система НАССР; Good Hygiene Practices) спочатку необхідно запровадити низку базових стандартів і гігієнічних процедур, що називаються програмами-передумовами НАССР, які створюють необхідну основу та контрольоване середовище для того, щоб система НАССР могла ефективно функціонувати. Без них контроль критичних точок буде неефективним. Належна виробнича практика GMP (Good Manufacturing Practice) є сукупністю правил, процедур і вимог, спрямованих на забезпечення стабільної якості продукції в процесі її виготовлення. Вона регламентує вимоги до сировини, обладнання, персоналу, виробничих приміщень, контролю якості та документування процесів. Дотримання GMP дає змогу гарантувати, що харчові продукти виготовляються за стабільних умов, які виключають ризики контамінації та зниження якості. Належна гігієнічна практика GHP (Good Hygiene Practice) (Good Hygiene Practices) охоплює вимоги до санітарного стану виробничих приміщень, персоналу, зберігання, транспортування та пакування харчових продуктів. Вона є базовою умовою для ефективного функціонування системи НАССР і включає дотримання норм особистої гігієни працівників, регулярне прибирання, дезінфекцію, контроль за водопостачанням і боротьбу зі шкідниками. Українські підприємства, орієнтовані на експорт до ЄС, активно впроваджують системи НАССР, GMP та GHP з метою гармонізації з європейськими вимогами до безпечності харчових продуктів. Їх застосування дозволяє підвищити довіру споживачів і торгових партнерів, мінімізувати ризики виникнення небезпечних ситуацій під час ви-

робництва, забезпечити стабільну якість та відповідність міжнародним стандартам (зокрема ISO 22000), сприяти розширенню експортних можливостей України на ринках ЄС. Отже, інтеграція принципів HACCP, GMP та GHP у систему управління якістю харчової продукції є необхідною умовою формування конкурентоспроможного, безпечного та надійного українського харчового виробництва в умовах європейського ринку (Голуб, 2017; Богатко, Богатко, & Вакуленко, 2025; Ощипок, Макарук, & Сінчук, 2022), (Міжнародна фінансова корпорація, 2020).

Продукти бджільництва мають величезний потенціал для нарощування експорту, адже кількість ринків збуту цієї продукції впродовж останніх років зростає (Хамід, Пушкар, & Гурко, 2020). Основним ринком збуту українського меду є ЄС, куди відправляється 80% продукції. Зокрема, за обсягом поставок у 2024 році перше місце зайняв Китай (169,6 тис. т), друге місце — Індія (94,8 тис. т), а третє місце — Україна (85,8 тис. т). Україна також постачає мед до таких країн, як Болгарія, Данія, Ізраїль, Іспанія, Італія, Ліберія, Маршаллові острови, Німеччина, Польща, Румунія, Сінгапур, Туреччина, Угорщина, Франція, Чехія та Швейцарія (Літвинчук, Сірик, & Святненко, 2025).

Оскільки ЄС не є самодостатнім у виробництві меду, він є значним потенційним експортним ринком для постачальників меду з інших країн. Нещодавні дослідження ЄС виявили, що значна частина меду, імпортованого до ЄС, підозрюється у невідповідності положенням «Медової директиви». Прозорість постачання продуктів бджільництва до ЄС регулюється кількома ключовими законодавчими актами, головним з яких є Директива 2001/110/ЄС про мед (Council Directive 2001/110/EC relating to honey) — це законодавчий акт, що встановлює єдині правила для визначення складу, маркування та продажу меду на внутрішньому ринку Європейського Союзу. В цій Директиві офіційно, зазначено, що мед — це природна солодка речовина, що виробляється бджолами з нектару рослин або виділень живих частин рослин, яку бджоли збирають, перетворюють, зневоднюють, зберігають і залишають дозрівати у стільниках. Також у Директиві встановлено різні види меду (таких як квітковий, пресований тощо) з відповідними назвами, що мають використовуватися під час реалізації; визначено основні критерії щодо складу меду (такі як мінімальний вміст цукрів, гідроксиметилфурфулолу (НМФ), кислотність), а також вимоги до маркування. Це гарантує якість продукту, який буде реалізований споживачам (Директива Ради, 2001). Постачальники з країн, що не входять до ЄС, та компетентні органи країн-експортерів повинні адаптуватися до нових правил, включаючи суттєві зміни, які набувають чинності у період 2024—2026 роках, для того, щоб ці виробники могли продовжувати постачати мед на ринку ЄС. Нещодавно були внесені суттєві зміни Директивою (ЄС) 2024/1438 про мед (Директива, 2024), яка запроваджує більш жорсткі правила, особливо щодо посилення прозорості походження меду, унеможливлення його фальсифікації на ринку ЄС. Нові правила почнуть діяти в усіх країнах-членах ЄС з 14 червня 2026 року. Головна мета Директиви 2024/1438 — забезпечити споживачів ЄС повною та достовірною інформацією про походження меду та захист чесних виробників від недобросовісної конкуренції (В Україні оновили, 2024). Постачальник може експортувати мед до ЄС лише за умови здатності країни-ви-

робника контролювати та управляти якістю продукту. Україна входить до Переліку країн, що не входять до ЄС, але їй дозволено експортувати мед до Європейського Союзу (відповідно Регламенту 2021/405) (Commission Implementing Regulation, 2021).

У Рішенні 2011/163/ЄС зазначено список третіх країн, яким дозволено ввезення до Європейського Союзу партій меду та іншої продукції бджільництва, призначеної для споживання людиною. Тому для покращення простежуваності ланцюжка постачання меду та продуктів бджільництва на ринок ЄС посилює контроль з боку країн-експортерів. Від 30 листопада 2024 року мед та інші бджолопродукти можуть ввозитися до ЄС, лише якщо вони відправляються, отримані та/або виготовлені в тих установах, які зазначені в списку від компетентного органу країни-експортера (З 30 листопада змінюються, 2024).

Базові законодавчі вимоги щодо якості та безпечності бджолиного меду визначені також у міжнародному стандарті Codex Stan 12-1981 (Codex Standard, 1981), який використовується як глобальний орієнтир і ключовий елемент системи міжнародної торгівлі. Але кожна країна має право прийняти його повністю, частково або адаптувати під свої потреби, якщо може надати наукове обґрунтування для більш жорстких вимог. Багато країн світу, включаючи Україну та членів ЄС, використовують стандарти Кодексу як основу для розробки національного законодавства про мед. Це сприяє гармонізації правил і полегшує міжнародну торгівлю. Стандарти Кодексу мають важливе значення для Світової організації торгівлі (СОТ). Угода СОТ про застосування санітарних і фітосанітарних заходів (Угода SPS) (Угода про застосування, 1994) визначає стандарти Кодексу як еталон для вирішення торговельних спорів. Якщо країна дотримується норм, її заходи вважаються обґрунтованими в рамках правил СОТ. Codex Stan 12-1981 регулює визначення, склад, якість, маркування та методи аналізу меду, які використовуються у всьому світі. В стандарті дано визначення меду, а також встановлено обов'язкові критерії до складу, такі як вміст води (не більше 20%), вміст цукрів (переважно фруктози і глюкози), кислотність, а також мінімальну активність ферментів (діастази) та максимальний вміст НМФ, які є показниками свіжості меду та відсутності надмірного нагрівання. Кодекс визначає, що в меді не можуть бути додані ніякі інші харчові інгредієнти, включаючи воду, за винятком випадків, передбачених стандартом. Також документ містить рекомендації щодо дотримання загальних принципів гігієни харчових продуктів для запобігання забрудненню важкими металами та залишками пестицидів у кількостях, що становлять небезпеку для здоров'я людини. Кодекс встановлює правила маркування, включаючи назву продукту, його походження та іншу обов'язкову інформацію для забезпечення чесної реалізації. Основна мета стандарту — захист здоров'я споживача та забезпечення чесної практики в міжнародній торгівлі медом, запобігаючи його фальсифікації.

Розглянуті Кодекс і Директива мають багато спільного, оскільки Директива ЄС значною мірою ґрунтується на рекомендаціях Кодексу. Обидва документи мають однакові визначення та класифікацію меду. Проте Директива окремо визначає класифікацію меду за призначенням — хлібопекарський мед (мед для промислового використання). Його призначено лише для подальшої технологічної перероб-

ки — для випічки, використанні в кондитерських виробках, оскільки він не відповідає всім жорстким критеріям якості для вживання в нативному вигляді. Хлібопекарський мед відрізняється від звичайного за певними фізико-хімічними показниками. Зокрема, він може мати сторонній присмак або запах, ознаки бродіння та підвищений вміст HMF (може свідчити про те, що мед був перегрітий, це руйнує природні ферменти, але це не є проблемою для промислового використання). На етикетці хлібопекарського меду обов'язково має бути чітко зазначена інформація безпосередньо біля назви продукту про те, що він має використовуватися виключно для приготування їжі або тільки для кулінарного використання. Для хлібопекарського меду заборонено додавати інформацію про конкретне квіткове або рослинне походження, оскільки його якість не відповідає монофлорним стандартам. Окрема класифікація дозволяє легально використовувати мед нижчої якості в харчовій промисловості, одночасно захищаючи споживача, який купує мед для безпосереднього вживання, гарантуючи йому відповідну якість.

Регламент (ЄС) № 178/2002 (Загальне харчове право) (Regulation, 2002) прийнятий від 28 січня 2002 року, є основоположним актом, який встановлює загальні принципи та вимоги сучасної системи харчової безпеки ЄС. Він забезпечує послідовний, комплексний і прозорий підхід до всіх аспектів, пов'язаних із харчовим ланцюжком: визначає основні засади харчового законодавства, включаючи аналіз ризиків, а також принцип прозорості та відповідальності; охоплює всі стадії виробництва, переробки та дистрибуції харчових продуктів (включаючи первинне виробництво); встановлює критерії визначення того, які харчові продукти вважаються небезпечними і вимагає вилучення їх з ринку; запроваджує фундаментальну вимогу простежуваності — оператори харчового бізнесу повинні мати можливість ідентифікації своїх постачальників «на крок назад» та своїх безпосередніх клієнтів «на крок вперед» (це стосується як харчових продуктів, так і кормів та будь-яких речовин); покладає основну відповідальність за безпечність харчових продуктів на операторів харчового бізнесу (виробників, переробників, дистриб'юторів); засновує Європейський орган з безпечності харчових продуктів (EFSA) — незалежне агентство, яке надає наукові консультації та підтримку в питаннях безпечності харчових продуктів; створює та регулює функціонування системи швидкого оповіщення про харчовий продукт і корм (RASFF) для оперативного обміну інформацією між державами-членами та Європейською Комісією про серйозні ризики для здоров'я. Основною метою Регламенту є забезпечення високого рівня захисту здоров'я людей та інтересів споживачів щодо харчових продуктів і кормів, гарантуючи при цьому ефективне функціонування внутрішнього ринку ЄС.

Європейська комісія в рамках Директиви (ЄС) 2024/1438 та з метою підвищення прозорості, якості та автентичності меду на ринку ЄС заснувала спеціальну платформу Honey Platform, створену у червні 2024 року, яка об'єднує представників влади, зацікавлених сторін ланцюжка постачання меду (пасічників, пакувальників, роздрібних торгівців, науковців та незалежних експертів тощо). До основних завдань і функцій цієї платформи належить збір даних і розробка методів для покращення контролю автентичності меду в частині методів виявлення фальсифікації з метою можливості гармонізації на рівні ЄС, розробка рекомендацій від-

носно можливого оновлення критеріїв складу та інших параметрів якості й безпечності меду (викладених у Директиві про мед), надання рекомендацій щодо створення загальносоюзної еталонної лабораторії для тестування меду та контролю якості (International Honey).

Європейське законодавство також регулює імпорт і безпечність інших таких продуктів бджільництва, як пилок, прополіс, маточне молочко, віск тощо, але стандарти якості для них відрізняються від стандартів для меду. Для всіх продуктів бджільництва застосовуються жорсткі регламенти ЄС щодо безпечності харчових продуктів. Усі бджолопродукти з третіх країн повинні супроводжуватися міжнародними ветеринарними сертифікатами. При цьому експортери повинні бути зареєстровані в європейській системі контролю торгівлі та експертизи (TRACES). Також існують дуже жорсткі ліміти на залишкові кількості пестицидів, антибіотиків та інших забруднювачів. Бджолопродукти класифікуються як продукти тваринного походження і до них застосовуються відповідні гігієнічні вимоги. На відміну від меду, не існує окремої загальноєвропейської директиви, що встановлює детальні критерії якості (відсоток вологи, хімічний склад тощо) для пилку, прополісу чи маточного молочка. У деяких країнах-членах ЄС діють власні національні або регіональні рекомендації чи стандарти. Найчастіше ж вимоги визначаються комерційними партнерами або великими асоціаціями, які посилаються на наукові дослідження. Віск регулюється окремими регламентами, якщо він використовується в органічному бджільництві (для вощини), де є спеціальні вимоги до його чистоти та походження.

В Україні розроблені і діють власні національні стандарти (ДСТУ) для більшості основних продуктів бджільництва, які встановлюють технічні умови та критерії якості для цих продуктів. Зокрема, існує ДСТУ 4497:2005 «Мед натуральний. Технічні умови» — стандарт встановлює вимоги до якості та безпечності натурального меду. ДСТУ 3127-95 «Обніжжя бджолине (пилок квітковий) і його суміші. Технічні умови» — стандарт визначає вимоги до якості, методів випробувань, умов зберігання та пакування пилку як продукту бджільництва і встановлює вимоги до якості сировини, процесу сушіння, зберігання й транспортування, а також до складу продукту та методів його контролю. ДСТУ 4662:2006 «Прополіс (бджолиний клей). Технічні умови» — стандарт встановлює технічні умови для прополісу (бджолиного клею), який використовується у харчовій, косметичній та фармацевтичній промисловості. ДСТУ 4229:2003 «Віск бджолиний пасічний. Технічні умови» — стандарт встановлює вимоги до пасічного бджолиного воску, що використовується для виготовлення вощини; він охоплює всю інформацію від виготовлення до зберігання (сферу застосування, технічні вимоги, методи контролю, вимоги до пакування, маркування, транспортування та безпеки). ДСТУ 3483-96 «Віск бджолиний екстракційний. Технічні умови» — стандарт регулює якість саме промислового воску, отриманого простим топленням на пасіці. ДСТУ 4667:2006 «Віск бджолиний промисловий. Технічні умови» — стандарт визначає технічні умови, яким має відповідати промисловий бджолиний віск. ДСТУ 4666:2006 «Молочко маточне бджолине. Технічні умови» — стандарт визначає технічні умови, яким має відповідати маточне молочко бджолине, щоб вважатися якісним і безпечним продуктом на ринку України. ДСТУ 7074:2009 «Перга. Технічні умови» —

стандарт, встановлює вимоги до якості перги, що використовується для споживання людиною, визначає показники якості, методи контролю та умови зберігання, гарантуючи, що продукт відповідає вимогам безпечності та харчової цінності. ДСТУ 7196:2010 «Забрус. Технічні умови» — стандарт встановлює технічні умови, яким має відповідати якісний забрус. Усі зазначені державні стандарти України розроблено ННЦ Інститутом бджільництва ім. П. І. Прокоповича.

Існують вимоги до харчової продукції, в тому числі продуктів бджільництва, встановлені законом України «Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів» (Про основні принципи, 1997), а також наказом Міністерства агрополітики України від 15 листопада 2023 року № 1968 «Про затвердження Гігієнічних вимог до потужностей, на яких здійснюється виробництво та/або обіг продуктів бджільництва» (Про затвердження Гігієнічних вимог, 2023). Наказ № 1968 встановлює обов'язкові правила для забезпечення безпечності та якості меду, прополісу, маточного молочка, пилку, воску та інших продуктів бджільництва на всіх етапах виробництва та обігу. Ці вимоги є обов'язковими для всіх операторів ринку, які займаються виготовленням і реалізацією продуктів бджільництва та спрямовані на гармонізацію українського законодавства з європейським. Закон України «Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів» визначає порядок забезпечення безпечності й окремих показників якості харчових продуктів та регулює відносини між органами виконавчої влади, операторами ринку харчових продуктів і споживачами.

Проаналізувавши законодавство, можна зробити висновок, що міжнародний кодекс Codex Stan 12-1981, Директива про мед і українські ДСТУ встановлюють дуже чіткі та жорсткі критерії якості: від загальних показників якості до відсутності сторонніх домішок і низького рівня НМФ. Усі стандарти спрямовані насамперед на захист споживача та забезпечення чесної торгівлі. Саме в точці перетину цих жорстких вимог і реальної практики виникає ключовий виклик: як гарантувати споживачеві та регулятору, що конкретна «банка меду» відповідає цим стандартам і не є фальсифікатом? Традиційні методи контролю, що ґрунтуються на паперовій документації та вибіркових лабораторних досліджень, виявляються недостатньо ефективними в умовах сучасного глобального ринку. Вони не можуть забезпечити безперервну прозорість всього ланцюжка поставок — від конкретного вулика на пасіці до споживача. Саме ця потреба в абсолютній прозорості та доказовій базі якості призводить до необхідності використання цифрових технологій простежуваності.

Варто зазначити, що інформаційні технології — це невід'ємна частина нашої сучасності, її головна складова за високого рівня розвитку впровадження у наше життя нового стилю управління (Євтушенко, 2018). Впровадження цифрових технологій у виробництво продуктів бджільництва є ключовим інструментом для забезпечення повної простежуваності, що відповідає суворим європейським нормам і вимогам, зокрема, закладеним у Регламенті (ЄС) № 178/2002 та оновленій Директиві (ЄС) 2024/1438. Процес цифровізації дозволяє створити безперервний електронний ланцюжок інформації «від вулика до столу», який задовольняє всі регуляторні вимоги ЄС. Розглянемо механізми забезпечення простежуваності через цифровізацію. Цифровий облік на етапі виробництва забезпечується системою

управління пасікою (Apiary Management Software) за допомогою використання спеціалізованих додатків або хмарних платформ для запису даних про кожен вулик (Beekeeping Equipment Boom, 2024). Вимога ідентифікації забезпечується присвоєнням кожному вулику цифрового ідентифікатора (QR-код, RFID-мітка). Надана інформація щодо записів про вік матки, силу сім'ї, стан здоров'я, проведені обробки з датами та назвами препаратів є критично важливою до виконання норм ЄС щодо залишків антибіотиків. Використання датчиків для відстеження ключових параметрів без прямого втручання в життя сім'ї дозволяє відстежувати вагу вулика в режимі реального часу, контролювати інтенсивність медозбору, споживання корму та планувати відкачування меду. Датчики температури та вологості допомагають контролювати мікроклімат у вулику, що важливо для зимівлі та запобігання хворобам і плісняві. Цифрові записи дозволяють миттєво визначити походження будь-якого продукту бджільництва, задовольняючи вимогу Регламенту 178/2002 щодо ідентифікації постачальника, тобто дотримання принципу «крок назад». Цифровізація процесу переробки та пакування відбувається завдяки реєстрації в цифровій системі даних про різні партії з різних вуликів під час відкачування та фасування меду. Програмне забезпечення відстежує, з яких саме пасік і вуликів походить конкретна партія фасованого меду, що дозволяє точно розрахувати відсоткове співвідношення походження для сумішей меду, як вимагає нова Директива 2024/1438. Результати фізико-хімічних аналізів якості та безпечності меду, вміст НФМ, води, залишків також вносяться в цифрову базу даних і прив'язуються до конкретної партії. Прозорість транспортування та дистрибуція дозволяє у реальному часі контролювати умови зберігання продукції при використанні датчиків температури, вологості та GPS-трекерів, забезпечуючи відповідність стандартам якості ЄС. Усі супровідні документи (накладні, ветеринарні сертифікати) можуть бути оцифровані через систему TRACES для імпорту в ЄС, що прискорить митні процедури та зменшить ризик фальсифікації паперових документів. Маркування та взаємодія із споживачем задовольняється розумним маркуванням (QR або штрих кодом). Скануючи код, споживач отримує повну інформацію про продукт: країну походження (відповідно до Директиви 2024/1438), конкретну пасіку, дату збору, результати лабораторних досліджень і навіть фотографію пасіки. Цифровізація забезпечує дотримання ключових європейських вимог. Виконання вимоги щодо крокової простежуваності та можливості швидкого вилучення небезпечної продукції з ринку визначається відповідно до Регламенту 178/2002. Забезпечення технічної можливості точного розрахунку й обов'язкового зазначення відсотків, а також походження меду зазначено на етикетці відповідно до Директиви 2024/1438. Разом з тим відбувається підвищення довіри споживачів завдяки повній інформаційній прозорості про продукт та його походження. Цифрові технології перетворюють простежуваність з обтяжливої паперової процедури на ефективну, автоматизовану та прозору систему, що є критично важливим для успішного постачання продуктів бджільництва на європейський ринок.

Традиційні системи відстеження «від вулика до споживача» засновані на паперових документах або централізованих базах даних, які вразливі до фальсифікації та помилок. Споживач, як правило, має бути впевненим в автентичності, якості та безпечності продуктів бджільництва і має можливість гарантованого доступу до

достовірної інформації. В цьому випадку виникає необхідність вибору інструментарію, який забезпечить повну довіру до всього ланцюжка поставки.

Однією з ефективних технологій у промисловому виробництві є блокчейн — децентралізована, захищена від підробки технологія, яка фіксує кожний крок руху продукту від пасіки до споживача (Балазюк, & Пилявець, 2022). Сама технологія блокчейн була запропонована у 2008 році Сатоші Накамото в програмному коді й технічному документі біткойна. Спочатку вона була розроблена для підтримки криптовалют, а не промисловості (Яковчук, Міхалевський, & Семенюк, 2021). Усвідомлення того, що технологія блокчейну може бути використана за межами фінансового сектору, розпочалось приблизно у 2013—2015 роках. Розробники та підприємці почали досліджувати її застосування для управління даними, логістики та простежуваності. IBM (International Business Machines Corporation) та Walmart вважаються першими у впровадженні блокчейну для простежуваності харчових продуктів. Ці дві компанії об'єднали свій досвід: Walmart був рушійною силою, тобто надав реально діючу інфраструктуру ланцюжка поставок для пілотного проєкту з IBM. Саме масштаб діяльності Walmart зробив цей проєкт таким значимим і показовим для всієї харчової галузі. Емпіричні кейси Walmart та IBM показують суттєве скорочення часу трасування (операційний показник) завдяки централізованій блокчейн-мережі і стандартизованим записам (Singh, & Sharma, 2022). Термін «блокчейн» дослівно означає «ланцюжок блоків», де кожен з них пов'язаний з попереднім. Блоком називається інформаційний пакет, що містить у собі всі попередні відомості та частину нових (Zimmerman, 2020; Biktimirov, Domashev, & Shcherbakov, 2017; Zheng et al., 2018). А весь ланцюжок являє собою розподілену між безліччю учасників базу даних, що працює без централізованого управління, тобто відсутній посередник у вигляді одного «центрального сервера», на якому зберігається вся інформація. Саме відсутність централізації є важливим елементом технології, оскільки всі дані зберігаються на комп'ютерах користувачів. В основу системи закладено три принципи: розподіленість, відкритість, захищеність. Усі користувачі блокчейн утворюють собою мережу серверів (вузлів), на кожному з яких зберігається копія даних (повна копія всіх блоків). Завдяки цьому зупинити або замінити інформацію практично неможливо, оскільки для цього необхідно вимкнути або «зламати» всі вузли (Kushch, & Prieto-Castrillo, 2019).

Розглянемо основні переваги, які надає використання технології блокчейн від пасіки до споживача. Технологія блокчейн створює незмінний цифровий запис, який реєструє географічне розташування пасіки, дату збору меду, його фасування та транспортування, а також ідентифікатор бджоляра. Кожен крок у ланцюжку постачання фіксується в окремому блоці децентралізованої бази даних, а будь-який учасник ланцюжка може перевірити, звідки походить продукт (тобто повна простежуваність від пасіки до споживача). Лабораторні дослідження, що підтверджують якісні характеристики меду (ботанічне походження, відсутність антибіотиків, пестицидів), також фіксуються в блокчейн. Це надає споживачам можливість мати прямий доступ до результатів лабораторних досліджень, підвищуючи впевненість в якості та безпечності продукту. Використання технології блокчейн ускладнює змішування меду з іншими інгредієнтами (наприклад, цукрові сиропи). Будь-яка спроба заміни даних у ланцюжку постачання негайно буде виявлена, що

зробить цей вид шахрайства економічно недоцільним. Блокчейн створює систему верифікації, яка захищає автентичність бджолопродуктів і гарантує, що заявлені властивості відповідають дійсності.

Проаналізуємо, як технологія блокчейн задовольняє вимоги Директив і Регламентів ЄС щодо простежуваності ланцюжка постачання продуктів бджільництва завдяки своїм основним характеристикам: децентралізації, незмінності даних і прозорості. Відповідно до Регламенту № 178/2002 забезпечується простежуваність на всіх етапах виробництва та дистрибуції («від ферми до столу»), а також можливість ідентифікації постачальників і клієнтів («на крок назад і на крок вперед»). Кожен запис про рух продукту (від вулика до пакування, транспортування та продажу) реєструється як блок у ланцюжку. Ці дані неможливо змінити або видалити, що створює надійний, захищений від підробок продукт. Це гарантія вимог простежуваності, оскільки будь-яка перевірка може миттєво відстежити його походження. У разі виявлення проблеми (фальсифікації партії меду), незмінний ланцюжок даних дозволяє швидко ідентифікувати конкретну партію, її походження та місце знаходження, що мінімізує збитки та захищає споживача. Оновлена Директива 2024/1483 зосереджена на боротьбі з фальсифікацією меду, підвищенні прозорості маркування щодо походження та встановлення гармонізованих методів контролю його якості. Технологія блокчейн дозволяє надійно пов'язати дані про географічне положення та ботанічне походження (зібрані за допомогою датчиків IoT, GPS, лабораторних досліджень пилку) із записом у ланцюжку. Споживачі, скануючи QR-код на упаковці, можуть переконатися в автентичності продукту та його відповідності заявленим характеристикам щодо походження та якості. Це допомагає експортерам завоювати довіру на вимогливому ринку ЄС. Таким чином, технологія блокчейн діє як надійний цифровий «нотаріус» для всієї цифрової інформації про продукти бджільництва.

Висновки

Виробництво та реалізація продуктів бджільництва високої якості та безпечності має стати ключовою складовою стратегії формування конкурентоспроможності на світовому ринку, забезпечити успішну європейську інтеграцію. Зробити це необхідно якнайшвидше, імплементувавши європейські норми, Регламенти та Директиви відповідно до Угоди про асоціацію між Україною та ЄС, захистивши таким чином внутрішній ринок від неякісного імпорту, а зовнішній — від небажаного експорту. Швидка інтеграція в європейську систему якості та безпечності є стратегічним кроком, який одночасно зміцнює внутрішній ринок, відкриває зовнішні ринки та виконує міжнародні зобов'язання України. Світові ринки, такі як ЄС, США, Японія мають жорсткі регуляторні вимоги, що стосуються не лише кінцевого продукту (відсутність антибіотиків, пестицидів, відповідність фізико-хімічним характеристикам), але й процесів виробництва, збору, пакування, зберігання та транспортування, що означає впровадження HACCP, GMP, GHP. Оскільки безпечність є передумовою якості, то сучасні міжнародні вимоги Codex Stan 12-1981, Директива 2001/110/ЄС, оновлена Директива 2024/1438, Регламент № 178/2002 важливі для захисту споживача. Відповідність цим вимогам перетворює потенційного експортера на надійного постачальника, а гарантія безпечності

створює довіру до українських продуктів бджільництва.

Впровадження цифрових технологій у виробництво продуктів бджільництва є ключовим інструментом для забезпечення повної простежуваності, що відповідає жорстким європейським нормам і вимогам, закладеним в Регламенті (ЄС) № 178/2002 та оновленій Директиві (ЄС) 2024/1438, завдяки чому забезпечується простежуваність на всіх етапах виробництва, транспортування та реалізації — «від ферми до столу», а також можливість ідентифікації постачальників і клієнтів — «на крок назад і на крок вперед».

Література

- Адамчук, Л., Сухенко, В., Генгалю, Н., Акульонюк, О. (2019). Дослідження діастазного числа українських медів. *Новітні технології*, 9(2), 77—86.
- Адамчук, Л., Лісогурська, Д., Євтушенко, О., & Гусятинська, О. (2022). *Бджільництво: вектори наукових дослідження*: монографія. НУБіП. Взято з https://www.researchgate.net/publication/on/371350119_BDZILNICTVO_vektori_naukovih_dosliden.
- Адамчук, Л. О., Постоєнко, Г. В., Баль-Прилипка, Л. В., Двикалюк, Р. М., Антонів, А. Д., Пилипко, К. В. (2022). Дослідження меду натурального на вміст залишків антибіотиків. *Наукові праці НУХТ*, 28(2), 153—162. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2022-28-2-14>.
- Адамчук, Л. О., Сухенко, В. Ю. (2019). Науково-технічне обґрунтування системи оцінювання безпеки та якості меду. *Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та безпечність продуктів харчування: особливості схеми сертифікації та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства*: збірник праць за підсумками VIII Міжнародної науково-практичної конференції вчених, аспірантів і студентів. Київ: РВВ, НУБіП України.
- Балазюк, О. Ю., Пилявець, В. М. (2022). Технологія блокчейн: дослідження суті та аналіз сфер використання. *Економіка та суспільство*, 43. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-43-13>.
- Бащенко, М. І. (2016). Удосконалення системи оцінки якості та безпечності меду бджолиного в Україні. *Вісник аграрної науки*, 6, 23—28. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201606-05>.
- Богатко, Н. М., Богатко, А. Ф., Руснак, Л. В., Вакуленко, Н. О. (2025). Аналіз міжнародного законодавства щодо харчової безпеки. *Подільський вісник: сільське господарство*, 2(47), 205—210. <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-2.29>.
- В Україні оновили вимоги до меду (2024). *ЛІГАБізнес*. Взято з <https://ukragroconsult.com/news/v-ukrayini-opovuly-vumogy-do-medu/>.
- Веліканов, О. О., Арсеньєва, Л. Ю., Сидор, В. М., Сильчук, Т. А. (2019). Вплив гігієнічного дизайну обладнання та упаковки на безпечність харчових продуктів. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*, 1(63), 11—14.
- Голуб, Б. (2017). Управління безпечністю харчових продуктів у торгівлі. *Товари і ринки*, 1, 27—36.
- Директива Ради ЄС про мед*. (Директива, Міжнародний документ). 2001/110/ЄС. (2001). Взято з https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_006-01#Text.
- Духницький, Б. (2024). Зміни аграрної торгівлі України з Євросоюзом в умовах війни. *Herold of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, 326(1), 135—139. <https://doi.org/10.31891/10.31891/2307-5740-2024-326-23>.
- Євтушенко, О. В. (2018). Інтелектуалізація інформаційно-аналітичної системи управління охороною праці на харчовому підприємстві. *Наукові праці НУХТ*, 24(3), 100—112.
- З 30 листопада змінюються правила експорту меду до країн ЄС (2024). *Урядовий портал*. Взято з <https://www.kmu.gov.ua/news/z-30-lystopada-zminiuiutsia-pravyla-eksportu-medu-do-krain-ies>.
- Квітківська, Н. П., Іщенко, В. М., Кочубей-Литвиненко, О. В. та Іщенко, М. В. (2024). Моніторинг основних показників якості молока українських виробників молочної продукції. *Науковий вісник ЛНУ ветеринарної медицини та біотехнологій. Серія: Харчові технології*, 26(101), 190—193. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-fl0128>.

Крисанов, Д. Ф. (2010). Якість і безпечність харчової продукції. *Економіка і прогнозування*, 3, 103—119.

Лазарєва, Л. М., Акименко, Л. І., Постоечко, В. О., Ковальська, Л. М. (2022). Оптимізація комплексного підходу щодо виявлення залишкових кількостей антимікробних речовин у меді бджололиному. *Бджільництво України*, 9, 70—78. <https://doi.org/10.46913/beekeepingjournal.2022.9.09>.

Лазарєва, Л. М. (2015). Показник вмісту проліну як критерій оцінки якості меду різного ботанічного походження. *Науково-технічний бюлетень НДЦ біобезпеки та екологічного контролю ресурсів АПК*, 3(4), 97—101.

Літвинчук, С. І., Сірик, А. О., Євтушенко, О. В., Святненко, Р. С. (2025). Аналіз та практичне застосування європейських стандартів контролю якості і безпечності меду. *Здорове харчування від дитинства до довголіття: комплексний підхід, стан та перспективи*: збірник наукових матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції. Київ: НУХТ.

Маринін, А., Шевченко, О., Святненко, Р., Літвинчук, С., Мельник, О. (2024). Інноваційні підходи до виявлення фальсифікації меду: матеріали 90-ї Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді — вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті». Київ: НУХТ.

Мельник, О. П., Шевченко, О. Ю., Маринін, А. І., Літвинчук, С. І. (2022). Фальсифікація меду і методи її виявлення. *Наукові праці НУХТ*, 28(5), 54—62. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2022-28-5-8>.

Міжнародна фінансова корпорація. (2020). *Посібник з безпечності харчових продуктів: Методичні рекомендації зі створення надійної системи управління безпечністю харчових продуктів*. Вашингтон, США: Світовий банк. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1548-5>.

Оновлена угода про торгівлю з ЄС: як зростуть квоти для українських аграріїв. (2025). *Агробізнес сьогодні*. Взято з https://agro-business.com.ua/agrobusiness/item/33920-onovlena-uhoda-pro-torhivliu-z-yes-iak-zrostut-kvoty-dlia-ukrainskykh-ahraryiv.html?utm_source=ukmet_news.

Ощипок, І. М., Макарук, К. В., Сінчук, О. А. (2022). Забезпечення належної гігієнічної практики при виготовленні харчової продукції. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету: технічні науки*, 31, 117—125. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-31-15>.

Пасічний, В. М., Пампура, Т. В. (2006). Варені ковбаси. На першому місці якість. *Харчова промисловість*, 6, 24—27.

Переходько, А. С., Кузьмін, О. В. (2017). Безпечність та якість харчових продуктів. *Проблеми формування здорового способу життя у молоді*: збірник матеріалів X Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів з міжнародною участю. Одеса: ОНАХТ.

Петруша, О. О., Вашека, О. М. (2021). Технологічне проектування харчових виробництв в системі управління безпечністю. *Education and science of today: intersectoral issues and development of sciences: Collection of scientific papers «ΑΙΟΓΟΣ» with Proceedings of the I International Scientific and Practical Conference*, Cambridge. Cambridge-Vinnytsia: P. C. Publishing House & European Scientific Platform.

Про затвердження Гігієнічних вимог до потужностей, на яких здійснюється виробництво та/або обіг продуктів бджільництва. (Мінагрополітики, Наказ). № 1968 (2023). Взято з <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z2262-23#Text>.

Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів (Закон України). № 771/97-ВР (1997). Взято з <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97-%D0%B2%D1%80#Text>.

Регламент Європейського Парламенту і Ради (ЄС) про гігієну харчових продуктів. Європарламент (Регламент, Міжнародний документ). № 852/2004 (2004). Взято з https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_002-04#Text.

Святненко, Р. С., Маринін, А. І., Кочубей-Литвиненко, О. В. (2017). Вивчення впливу електрофізичних методів обробки на мікробіологічні показники харчових продуктів. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 1(96), 125—130.

Система НАССР (Держпродспоживслужба). Взято з <https://dpss.gov.ua/diyalnist/bezpechnist-harchovih-produktiv-ta-veterinarna-medicina/bezpechnist-ta-ikakist-kharchovykh-produktiv/sistema->

насрр.

Сіднева, Ж. К., Рибачук-Ярова, Т. В. (2013). *Проблеми якості і безпечності харчових продуктів в контексті забезпечення продовольчої безпеки. Сучасні парадигми розвитку конкурентоспроможного агропромислового виробництва*: кол. моногр. Умань: «Візаві».

Сімахіна, Г. О., Михайлова, Р. В. (2024). Вектори розвитку сучасної харчової промисловості: традиції і новаторство. *Scientific Research and Experimental Development*, (6). Взято з <https://ojs.Publisher.agency/index.php/SRED/article/view/3443>.

Термін «Належна виробнича практика (Good Manufacturing Practice, GMP)». Законодавство України (Список термінів). Взято з <https://zakon.rada.gov.ua/laws/term/en/34613>.

У Брюсселі за сприянням проекту «Німецько-український агрополітичний діалог» відбувся професійний захід щодо поточних викликів в аграрному секторі України та підготовка до переговорного процесу. *Прес-служба Апарату Верховної Ради України* (2025). Взято з https://www.rada.gov.ua/news/news_kom/262328.html.

Угода про застосування санітарних і фітосанітарних заходів (Угода, Міжнародний документ). 981_006. (1994). Взято з https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/981_006#Text.

Українець, А. І., Коваль, О. А. (2018). Визначення складової показника якості харчових продуктів — консистенції. *Наукові праці НУХТ*, 24, 39—42.

Українські експортери встигнуть збільшити постачання меду до ЄС. *AgroPortal*. (2023). Взято з <https://agroportal.ua/news/ukraina/ukrajinski-eksporteri-vstignut-zbilshiti-postavki-medu-do-yes>.

Фурман, С., Лісогурська, Д., Лісогурська, О., Лігоміна, І., & Войналович, М. (2024). Безпечність, якість та біохімічний склад прополісу залежно від технології одержання. *Аграрний вісник Причорномор'я*, (110), 120—127. <https://doi.org/10.37000/abbsl.2024.110.20>.

Хамід, К., Пушкар, Т., Гурко, Є. (2020). Сучасні проблеми якості та безпечності меду натурального. *Agrarian Bulletin of the Black Sea Littoral*, 96, 77—83. <https://doi.org/10.37000/abbsl.2020.96.09>.

Христенко, О. (2016). Особливості функціонування галузі бджільництва в країнах Європейського Союзу. *Вісник Черкаського університету*, 1, 131—139.

Яковчук, М. В., Міхалевський, В. Ц., Медведчук, Н. К., Скрипник, Т. К., Семенюк, Б. В. (2021). Децентралізована система на базі технології блокчейн для прийняття рішень в аграрному секторі. *Вісник Хмельницького національного університету: технічні науки*, 6(303), 55—63. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2021-303-6-55-63>.

Adamchuk, L., Sukhenko, V., Akulonok, O., Bilotserkivets, T., Vyshniak, V., Lisohurska, D., Lisohurska, O., Slobodyanyuk, N., Shanina, O., & Galyasnyj, I. (2020). Methods for determining the botanical origin of honey. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 14, 483—493. <https://doi.org/10.5219/1386>.

Beekeeping Equipment Boom — The Beekeeping Equipment Market Will Boom in the Next Decade (2024). *Food and Agriculture*. Взято з <https://www.marketresearchintellect.com/blog/beekeeping-gear-boom-apiculture-equipment-market-set-to-thrive-in-the-coming-decade/>.

Biktimirov, M., Domashev, A., Cherkashin, P., Shcherbakov, A. (2017). Blockchain technology: Universal structure and requirements. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*, 51(6), 235—238.

Chirsanova, A., Capcanari, T., Boistean, A., Khanchel, I. (2021). Bee honey: history, characteristics, properties, benefits and adulteration in the beekeeping sector. *Journal of Social Sciences*, IV(3), 98—114. [https://doi.org/10.52326/jss.utm.2021.4\(3\).11](https://doi.org/10.52326/jss.utm.2021.4(3).11).

Codex Standard for honey Codex Stan (Міжнародний документ). 12-1981. (1981). Взято з http://files.foodmate.com/2013/files_1353.html.

Commission Implementing Regulation (EU) (Міжнародний документ). 2021/405/EU (2021). Взято з https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2021/405/2022-08-12.

Directive (EU) of the European Parliament and of the Council. (Директива, Міжнародний документ) 2024/1438/EU (2024). Взято з <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1438/oj/eng>.

Geană, E., Isopescu, R., Ciucure, C., Gîjiu, C., Jouceanu, A. (2024). Detection of honey adulteration using ultraviolet-visible spectral research combined with chemometric analysis. *Foods*, 13(22), 3630. <https://doi.org/10.3390/foods13223630>.

Good beekeeping practices for sustainable apiculture FAO Animal Production and Health Guidelines (2021). *FAO, IZSLT, Apimondia and CAAS*, No. 25. Rome. Взято з <https://doi.org/10.4060/cb5353en>.

Good Hygiene Practices (GHP) and HACCP Toolbox for Food Safety. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Взято з <https://www.fao.org/good-hygiene-practices-haccp-toolbox/en>.

Honey. Detailed information on honey production in the European Union. *European Comision*. Взято з https://agriculture.ec.europa.eu/farming/animal-products/honey_en. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/771/97-%D0%B2%D1%80#Text>.

International Honey Commission. World Network of Honey and Bee Product Science. Взято з <https://www.ihc-platform.net/>.

Kushch, S., & Prieto-Castrillo, F. Blockchain for dynamic nodes in a smart city. *IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. (pp. 29—34). 2019, IEEE. Взято з <https://wfiot.jkjmanagement.com/papers/1570523247.pdf> 123.

Morariu, I.-D., Avasilcai, L., Vieriu, M., Lupu, V. V., Ioniuc, I., Morariu, B.-A., Lupu, A., ..., & Trandafir, L. (2024). Comprehensive Narrative Review on the Hazards of Bee Honey Adulteration and Contamination. *Journal of Food Quality*, V. 2024, Art. ID 3512676, 13 pages. <https://doi.org/10.1155/2024/3512676>.

Regulation (EU) of the European Parliament and of the Council. (Міжнародний документ). 178/2002/EU. (2002). Взято з <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2002/178/oj/eng>.

Singh, V., Sharma, S. (2022). Application of blockchain technology in shaping the future of food supply chains. *Journal of Food Science and Technology*, 60(7674). <http://dx.doi.org/10.1007/s13197-022-05360-0>.

Zheng, Z. et al. (2018). Blockchain challenges and opportunities: A survey. *International journal of web and grid services*, 14(4), 352—375. Взято з <https://allquantor.at/blockchainbib/pdf/zheng2018blockchain.pdf>.

Zimmerman, P. (2020). Blockchain structure and cryptocurrency prices. *Staff working Paper. Bank of England*, 855, 1—75. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3538334>.

INTENSIFICATION OF METANOGENESIS THROUGH PRE-TREATMENT OF RAW MATERIAL

O. Vorontsov, <https://orcid.org/0009-0005-1944-6947>

V. Stabnikov, <https://orcid.org/0000-0003-3738-8056>

National University of Food Technologies

Key words:

*Biogas
Anaerobic conversion of
organic matter to methane
Pre-treatment of raw
materials
Disruption of biomass
structure
Anthropogenic load*

Article history:

Received 11.11.2025

Received in revised form
25.11.2025

Accepted 09.12.2025

Corresponding author:

O. Vorontsov

E-mail:

ewtcorp@ukr.net

Citation: Воронцов О. О.,
Стабніков В. П. (2025). Ін-
тенсифікація метаногене-
зу шляхом попередньої
обробки сировини. *Науко-
ві праці НУХТ*, 31(6), 41—
59.

DOI: 10.24263/2225-2924-
2025-31-6-5

ABSTRACT

Ways to increase the efficiency of biogas/biomethane production through the application of various pre-treatment methods for raw materials, as well as the main advantages and challenges that require further research and technological solutions were analyzed. The continuous increase in the cost of traditional fuels and the growing complexity of energy supply logistics intensify the need for obtaining energy from renewable sources. One of the most promising approaches to addressing this issue is the production of biogas from various waste materials containing organic components.

Biogas is a mixture of gases formed as a result of the anaerobic decomposition of organic matter, which can be used as fuel and for the generation of heat and electricity. At the same time, biogas production reduces the anthropogenic load on the Earth's ecosystems by enabling the utilization of industrial and household waste, as well as wastewater with a high content of organic substances, thereby decreasing CO₂ emissions.

The efficiency of the anaerobic digestion process largely depends on the composition and properties of the feedstock, as well as on its pre-treatment. Pre-treatment of raw materials is a crucial stage that improves the accessibility of organic matter to microorganisms, accelerates the digestion process, and increases biogas yield. The existing main pre-treatment methods — mechanical, thermal, chemical, biological, and others — require comprehensive study, assessment of their advantages and disadvantages, and analysis of current scientific research in this field.

For Ukraine, the diversification of energy resources is of particular importance. Biogas production can help reduce dependence on imported natural gas and strengthen the country's energy independence. The implementation of relevant technologies will also contribute to solving the problem of utilizing large volumes of organic waste generated in agriculture and reducing greenhouse gas emissions into the atmosphere.

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ МЕТАНОГЕНЕЗУ ШЛЯХОМ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ СИРОВИНИ

О. О. Воронцов, <https://orcid.org/0009-0005-1944-6947>

В. П. Стабніков, <https://orcid.org/0000-0003-3738-8056>

Національний університет харчових технологій

Розглянуто шляхи підвищення ефективності виробництва біогазу та біометану шляхом застосування різних методів попередньої обробки сировини, їхні переваги та основні проблеми, що потребують вирішення. Постійне зростання вартості традиційних видів палива, а також ускладнення логістики постачання енергоносіїв загострюють потребу у збільшенні виробництва енергії з відновлюваних джерел. Одним із перспективних напрямів розв'язання цієї проблеми є отримання біогазу з різноманітних відходів, що містять органічну складову.

Біогаз — це суміш газів, яка утворюється в результаті анаеробного розкладання органічних матеріалів і може використовуватися як паливо, а також для виробництва теплової та електричної енергії. Його виробництво сприяє одночасному зменшенню антропогенного навантаження на екосистеми Землі шляхом утилізації промислових і побутових відходів, а також стічних вод із високим вмістом органічних речовин, що дозволяє скоротити викиди CO₂.

Ефективність процесу анаеробного зброджування значною мірою залежить від складу та властивостей вихідної сировини, а також від рівня її підготовки. Попередня обробка є важливим етапом, який підвищує доступність органічної речовини для мікроорганізмів, прискорює процес зброджування та забезпечує збільшення виходу біогазу. Існуючі методи попередньої обробки (механічні, термічні, хімічні, біологічні тощо) потребують всебічного вивчення, визначення їхніх переваг і недоліків, а також аналізу сучасних наукових досліджень у цій галузі.

Для України питання диверсифікації енергетичних ресурсів є особливо важливим, біогаз дозволить зменшити залежність від імпорту природного газу та зміцнити енергетичну незалежність. Впровадження відповідних технологій сприятиме вирішенню проблем з утилізацією великих обсягів органічних відходів, що утворюються в сільському господарстві, а також зменшенню викидів в атмосферу парникових газів.

Ключові слова: біогаз, анаеробне перетворення органічних речовин до метану, передобробка сировини, руйнування структури біомаси, антропогенне навантаження.

Постановка проблеми. Потреба в енергозабезпеченні в умовах дефіциту газу та нафти, ускладнення логістики стимулює пошук нових, альтернативних традиційним, джерел енергії. Все більше уваги привертають технології отримання біогазу, які використовують органічні відходи як відновлювальні сировинні ресурси. Однак вихід і якість біогазу, що отримується при використанні традиційних технологій, не задовольняє вимоги споживачів та є економічно затратним. Основним методом вирішення проблеми є розробка інноваційних технологій, спрямованих

на вдосконалення та впровадження ефективних методів переробки відходів з метою отримання максимальної кількості біогазу з максимальним економічним й екологічним ефектом (Сакун, Різніченко, & Велькін, 2020). Попередня обробка є необхідною для зниження стійкості біомаси, особливо лігноцелюлозної, шляхом збільшення площі поверхні та доступності органічної речовини для мікроорганізмів. Механічні методи, такі як кульове подрібнення та гомогенізація високим тиском, ефективно збільшують вихід метану, але вимагають дотримання позитивного балансу між енергоспоживанням та отриманим приростом енергії. Термічна обробка руйнує клітинні структури, що також покращує біодоступність. Хімічна попередня обробка, зокрема кислотна, лужна та окислювальна, ефективно розкладає лігнін і геміцелюлозу, але може бути дорогавартісною та призводити до утворення інгібіторів. Гібридні підходи часто демонструють синергетичний ефект.

Таким чином, питання інновацій у підготовці сировини з метою інтенсифікації виробництва біогазу як відновлюваного джерела енергії є актуальним в умовах сучасних енергетичних та екологічних викликів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Біоенергетика здатна відігравати вагомую роль у структурі відновлюваних джерел енергії, складаючи їх значну частку. У 2021 році частка електроенергії, отриманої у світі з відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), досягла 8,1% від загальної генерації, або 12,8 ТВт·год, з яких близько 56% — за рахунок сонячного випромінювання, 33% — енергії вітру, 8% — за рахунок спалювання біомаси та біогазу. Виробництво біогазу та біометану в Європі у 2022 році склало 21 млрд м³ (6% споживання природного газу в ЄС). У випадку Данії частка біометану в газовій мережі склала ~ 40%, з перспективою збільшення (Актуальний звіт ЄБА, 2024). Україна володіє величезним потенціалом для виробництва біогазу з різноманітних органічних ресурсів. Значні обсяги сільськогосподарських і харчових відходів, осад міських очисних споруд та інших видів біомаси можуть бути використані для отримання біогазу, здатного замінити частину імпортного природного газу. В Україні сумарна встановлена потужність біогазових установок у 2022 році становила 124 МВт. Видобуток біометану в Україні потенційно може становити 9,7 млрд м³ з тенденцією до зростання (Гелетуха, 2023). Біометаном аграрного походження можна замінити до 20 млрд м³ природного газу. Потенційна сировина для виробництва біометану нерівномірно розподілена по регіонах України, з концентрацією основної її частини в центральних і північних областях.

Птахівництво є однією з провідних галузей сільського господарства України: у 2024 році виробництво м'яса птиці становило близько 1,4 млн тон. Основні виробничі потужності зосереджені у Київській, Вінницькій та Черкаській областях. Зі зростанням чисельності поголів'я, відповідно, збільшується обсяг утворення пташиного посліду, який за відсутності належної утилізації чинить негативний вплив на навколишнє середовище. Водночас пташиний послід може бути ефективно використаний як моносубстрат для виробництва біогазу.

Українськими дослідниками встановлено закономірності анаеробного розкладання пташиного посліду в періодичному режимі залежно від вмісту вологи в субстраті за мезофільних і термофільних умов. Визначено кінетичні параметри метаногенезу, які були використані для моделювання процесу утворення метану під

час безперервного анаеробного зброджування пташиного посліду (Zhadan, Shapovalov, & Usenko, 2023).

В Україні здійснюються активні кроки для підтримки розвитку біогазової та біометанової галузей. Розроблено Національний план дій з відновлюваної енергетики до 2030 року, який передбачає збільшення частки енергії з біомаси в енергетичному балансі країни. Важливим кроком стало також ухвалення законодавчих змін, що дозволяють експорт біометану, відкриваючи нові ринки збуту для українських виробників.

В Україні діє «зелений» тариф на електроенергію, вироблену з біогазу, що стимулює інвестиції в галузь. У 2022 році біоелектростанції згенерували 992 млн кВт·год, або 0,6% від загального виробництва електроенергії, що на 206 млн кВт·год більше, ніж у попередньому році (Конеченков, 2022).

Важливою подією стало введення в експлуатацію перших заводів з виробництва біометану та початок його експорту. Наразі в Україні працюють три біометанові заводи. За оцінками Біоенергетичної асоціації України, у 2025 році вони вироблять близько 17 млн м³ біометану (Шапошніков, 2025).

Перший завод з виробництва біометану на базі власного агровиробництва був збудований компанією «Галс Агро», яка розпочала його реалізацію у 2016 році на основі роботи цукрових заводів і свиногомплексу. Сьогодні загальна електрогенеруюча потужність підприємства становить 14,7 МВт (Кравчук, 2025). Група компаній «VITAGRO» також розпочала експорт українського біометану до Європейського Союзу. Їхній завод, збудований у 2022—2024 роках, використовує як сировину відходи тваринництва та має річну потужність приблизно 3 млн м³.

Україна завдяки значному аграрному потенціалу розглядається як перспективний постачальник біометану на європейський ринок, а прогнози щодо розвитку експорту біометану до країн ЄС є доволі оптимістичними.

На цьому тлі особливої актуальності набуває проблема розроблення технологій отримання біометану, адаптованих до природних умов України та властивостей доступної місцевої сировини. Питання ефективної підготовки сировини, яке дозволило б мінімізувати витрати на будівництво та експлуатацію біогазових реакторів, стає одним із ключових завдань для подальшого розвитку галузі.

Метою представлено огляду є систематизація наукових досліджень щодо попередньої обробки сировини для виробництва біогазу/біометану у світі та перспектив впровадження найбільш економічно доцільних з них в Україні.

Матеріали і методи. Для вивчення перспектив розвитку виробництва біогазу в Україні було використано комплексний підхід, що включає аналіз фахових інформаційних даних, статистичних матеріалів і наукової літератури. Також використано офіційні статистичні дані ООН, ЄС, служб статистики України та провідних країн світу. Було зібрано інформацію про сировину для отримання біогазу (основні види та обсяги), її джерела, в тому числі відходи тваринництва, проаналізовано звіти профільних асоціацій, аналітичних компаній і консалтингових агентств, матеріали профільних конференцій, семінарів та вебінарів. Проведено огляд наукових публікацій у вітчизняних і міжнародних наукових базах даних (Scopus, Web of Science, Google Scholar, фахові видання ВАК України). Напрямами аналізу були:

- сировинна база для виробництва біогазу;
- міжнародний досвід розвитку технологій передобробки сировини;

- аналіз переваг та недоліків механічної, термічної, хімічної, біологічної та інших методів обробки сировини та їх вплив на процеси анаеробного зброджування субстрату.

Викладення основних результатів досліджень. Археогенна біоконверсія, при якій з органічних субстратів утворюється біогаз, є одним з відомих технологій отримання відновлювальних джерел енергії. Біогаз утворюється в результаті біоконверсії органічних сільськогосподарських, промислових харчових та інших відходів під дією мікроорганізмів і включає метан (CH_4), вуглекислий газ (CO_2), а також незначні кількості інших газів. Використання біомаси для отримання біогазу створює так звану вуглецеву нейтральність — нульовий викид вуглекислого газу, при якому вуглець, що виділяється при спалюванні газу, поглинається з атмосфери рослинами, залишки яких можуть бути використані знову як сировина (Zurbrügg, & Vögel, 2014). Біогазові установки (БГУ) призначені для екологічно чистої переробки органічних відходів з отриманням біогазу. Вихід газу залежно від сировини і технології виробництва становить 350—500 м³/т сухої речовини. БГУ варіюються рф складністю від простих циліндричних конструкцій без рухомих частин до повністю автоматизованих складних промислових об'єктів. Необхідною умовою для експлуатації є герметичність конструкції, тому що продуценти метану є облигатними анаеробами. Залежно від загального вмісту твердих речовин у субстраті, що подається на метаногенну біоконверсію, розрізняють вологі та сухі системи. При вологому способі археогенної біоконверсії бажано, щоб вміст сухих речовин у субстраті знаходився в межах 3—12%. Так, анаеробне розкладання курячого посліду в глиняній суспензії без перемішування може мінімізувати споживання енергії та води, оскільки початковий прийнятний вміст органічних твердих речовин може бути збільшений з 5% (мас/об) у суспензії курячого посліду для рідкофазного анаеробного розкладання до 15% (мас/об). Суспензійне анаеробне розкладання азот-, сірко- та жировмісних органічних відходів можна покращити за допомогою мікробного відновлення Fe(III) у глині або гематитовій залізній руді. Це пов'язано з адсорбцією або осадженням таких інгібіторів мікробного ацидогенезу та метаногенезу, як амоній, сульфід, довголанцюгові жирні кислоти, гумінові та фульво-кислоти, глиною або іонами заліза (Ivanov et al., 2004; Ivanov et al., 2019). Однак існує низка негативних моментів, в тому числі необхідність періодичного культивування (Ward, Hobbs, & Holliman, 2008).

Підготовка та стабільність складу сировини мають суттєвий вплив на перебіг процесу метаногенезу, а також на якість і кількість отриманого біогазу. Непідготовлені органічні відходи та біомаса, зокрема лігноцелюлозні матеріали, характеризуються складною структурою, яка перешкоджає мікробній деградації субстрату та обмежує вихід біогазу.

Попередня обробка є необхідною для руйнування цих структур, збільшення площі поверхні та підвищення доступності органічної речовини для мікроорганізмів, що, зрештою, сприяє підвищенню ефективності процесу зброджування та збільшенню виробництва біогазу. У багатьох випадках вона є обов'язковим етапом технологічної підготовки складних органічних субстратів.

Застосування методів попередньої обробки дозволяє використовувати ширший спектр видів біомаси, які були б малопридатними для анаеробної переробки, що істотно розширює можливості для підвищення ефективності виробництва біогазу.

Попередня обробка сировини. Ефективність виробництва біогазу значною мірою визначається видом і характеристиками сировини, що використовується. Деякі субстрати розкладаються повільно через великі розміри часток, низьку біодоступність органічних компонентів або наявність інгібувальних сполук.

Метою попередньої обробки є підвищення доступності органічної речовини для мікроорганізмів. Це досягається за рахунок руйнування структурних компонентів сировини, зменшення розміру частинок і зниження її в'язкості, що полегшує взаємодію мікроорганізмів із субстратом, покращує технічні параметри процесу та сприяє зменшенню загального енергоспоживання (Kratky, & Arce, 2022). Основними методами попередньої обробки сировини для виробництва біогазу є механічна, термічна, біологічна та хімічна.

Різні типи сировини суттєво відрізняються за здатністю до анаеробного розкладання. Наприклад, сільськогосподарські відходи (кукурудзяні стебла, солома) містять значні кількості лігніну, целюлози та геміцелюлози, які є малодоступними для анаеробних мікроорганізмів. Хоча целюлоза та геміцелюлоза є потенційними джерелами цукрів, їхня кристалічна структура ускладнює гідроліз і значно сповільнює первинні стадії анаеробного зброджування. Натомість сировина, багата на легкодоступні вуглеводи, білки або жири, зазвичай, піддається анаеробному розкладанню значно швидше, що забезпечує вищу швидкість процесу та потенційно більший вихід біогазу.

Таблиця 1. Види сировини та потенційні проблеми при її анаеробному перетворенні до метану

Сировина	Основні компоненти	Потенційні проблеми
Кукурудзяне стебло	Лігноцелюлоза (целюлоза, геміцелюлоза, лігнін)	Повільне розкладання, низька біодоступність, утворення плавучих шарів
Гній великої рогатої худоби	Складні органічні сполуки	Повільне розкладання, висока в'язкість, потенційна наявність інгібіторів
Харчові відходи	Вуглеводи, білки, жири	Можливі проблеми зі стабільністю процесу, утворення піни
Осад стічних вод	Органічні речовини	Низька швидкість гідролізу, необхідність руйнування клітинних стінок

Підвищення виходу біогазу з одиниці маси субстрату за короткий проміжок часу безпосередньо впливає на економічну ефективність роботи біогазових установок, роблячи їх більш конкурентоспроможними на ринку відновлюваних джерел енергії.

Фізична попередня обробка. Механічне подрібнення є одним з найпоширеніших методів попередньої обробки сировини для виробництва біогазу. Воно сприяє збільшенню площі поверхні та підвищенню загальної доступності органічних матеріалів для мікроорганізмів, що пришвидшує гідроліз і покращує ефективність процесу зброджування.

Залежно від типу сировини застосовують різні методи подрібнення та відповідне обладнання. Для цього використовують кулькові, молоткові, ножові млини

та інші пристрої, які забезпечують необхідний ступінь зменшення розміру частинок.

Наприклад, для сухої біомаси з вологістю до 10—15% використовують молоткові та ножові млини, тоді як для вологих матеріалів з вмістом води понад 15—20% застосовують екструдери. Є спеціальні біомасоподрібнювачі, які використовуються для обробки об'ємних і складних субстратів, таких як твердий гній, підстилка та силос. Ці машини попередньо подрібнюють сировину, а потім остаточно руйнують її до гомогенного стану за допомогою ротора та ударних елементів. Ефективність подрібнення залежить від типу біомаси. Для харчових відходів подрібнення забезпечує більш рівномірний склад субстрату, що є важливим для стабільності процесу анаеробного бродіння. Зменшення розміру частинок призводить до збільшення площі поверхні, доступної для ферментів, має значний вплив на вихід і кінетику утворення біогазу. Крім того, механічна обробка сприяє зменшенню кристалічності целюлози і знижує в'язкість субстрату. Доведено, що оптимальний розмір частинок для більшості видів сировини, який забезпечує максимальний вихід біогазу, лежить у межах від 0,088 до 0,40 мм. Надмірне зменшення розміру частинок може призвести до негативних наслідків, таких як підвищення в'язкості, утворення агрегатів і потенційне зниження виходу біогазу. Крім того, для дуже дрібного подрібнення потрібні великі витрати енергії, що знизить економічну ефективність процесу.

Оптимізація ступеня механічної обробки є важливою для забезпечення максимального виходу біогазу при мінімізації енергетичних витрат і досягається підбором відповідного обладнання. Характеристики деяких пристроїв для механічної обробки сировини наведена нижче.

Шредери та дробарки використовують для зменшення розміру елементів твердих складових субстрату, що знижує ризик засмічення обладнання та покращує процес зброджування. Широко використовуються для переробки сільськогосподарських відходів. Так, подрібнення соломи призвело до збільшення виходу біогазу на 33,6% порівняно з необробленою (Sule, Agbabiaka, & Zakariyah, 2023).

Млини забезпечують більш дрібний розмір компонентів субстрату і розрізняються за механізмом впливу (різання, розтирання, розрив та ламання).

- кульові млини дозволяють досягти дуже малого розміру частинок та використовуються для обробки харчових і сільськогосподарських відходів. Така обробка значно збільшує питомий вихід метану та пришвидшує кінетику газоутворення. Обробка кульовим млином кукурудзяної соломи (0—240 хв) до розміру частинок 13,85 мкм поліпшили мікроструктуру, фізико-хімічні властивості та подальшу продуктивність метаногенезу. Порівняно з необробленою сировиною, виробництво метану збільшилося на 35,83—101,97%, а час лаг-фази скоротився на 33,04—71,17% (Qu et al., 2024);

- молоткові та ножові млини споживають менше енергії ніж кульові, але вони не забезпечують такого рівня подрібнення. Використовуються для субстратів з сільськогосподарських відходів. Солому від м'якої пшениці та кукурудзяне стебло подрібнювали ножовим млином до середньої довжини близько 20 мм, що відповідає розміру в комерційних дигесторах. Вихід біогазу в результаті передобробки збільшився на 10,1%, концентрація метану в біогазі з побібною соломи була ви-

ща (52,2% проти 49,3% з необробленої). За результатами збродження кукурудзяного стебла статистично значимих відмінностей у складі біогазу не спостерігалось (Dell’Omo, 2025);

- дискові та валкові млини застосовуються для обробки різноманітної біомаси.

Сучасні фізико-механічні підходи попередньої обробки сировини потребують більш складного та дорогого обладнання, що збільшує капітальні та експлуатаційні витрати, але у ряді випадків це економічно виправдано.

Гомогенізація — це обробка субстрату тертям під високим тиском, що покращує доступ мікроорганізмів до органічної речовини. Цей метод збільшує вихід біогазу, але потребує дорогого обладнання і має високе енергоспоживання (Amoo, Madu, & Adeleye, 2023).

Екструзія вважається економічно виправданим передовим методом попередньої обробки сировини, особливо для матеріалів, що містять лігнін. Процес передбачає проходження сировини через матрицю із застосуванням високого тиску й температури для руйнування клітинної структури. Така передобробка прискорює гідроліз, підвищує швидкість утворення метану й органічне навантаження у реакторах (Montgomery, & Bochmann, 2014). Поєднання механічних і термічних процесів спрощує підготовку сировини, виключає необхідність використання додаткових хімікатів. Було досліджено доступність цукру та об’єми отриманого біогазу з екструдованих зразків. Вимірювалися споживання енергії, температура та час перебування зразків у процесі екструзії. Результати показали збільшення виходу метану з екструдованих зразків приблизно на 4—29% після 28 та 1—16% 90 днів анаеробного зброджування (Wahid, Hjorth, & Møller, 2015). Технологічні параметри екструзії залежать від типу сировини. При правильному виборі параметрів процес забезпечує зростання виходу метану на 10—30% та покращення гідродинамічних властивостей субстрату.

Таблиця 2. Обробка різних видів сировини методом екструзії

Тип сировини	Температура, °C	Швидкість шнека, об/хв	Вологість, %	Енерговитрати, кВт·год/т	Очікуване підвищення виходу CH ₄ , %
Харчові відходи	90—130	80—120	65—75	40—70	+10—25
Курячий послід	100—140	100—160	55—65	50—85	+15—30
Гній ВРХ	110—150	90—130	65—80	45—75	+10—20

Як видно з табл. 2, оптимальні режими залежать від вмісту сухих речовин. Для вологих харчових відходів доцільно застосовувати нижчі температури, тоді як для посліду та гною ефективнішою є короткочасна високотемпературна екструзія.

Дефлейкери та диспергатори. Ці апарати забезпечують інтенсивне руйнування структури біомаси шляхом розпушення волокнистих матеріалів, гомогенізації органічної маси та підвищення доступності субстрату для ферментативного розкладу. Дефлейкери впливають на сировину за принципом зсувного розриву волокон під дією дискових пластин, що мають насічки або зубці. Внаслідок цього частинки біомаси розшаровуються, а структура стає більш пористою. Диспергатори

забезпечують інтенсивне подрібнення і гомогенізацію маси при високих швидкостях зсуву (3 000 об/хв і більше), що дозволяє рівномірно розподілити тверду і рідку фази (Grubben et al., 2012).

Таблиця 3. Порівняння параметрів дефлейкерів і диспергаторів

Параметр	Дефлейкер	Диспергатор
Принцип дії	Механічне розпушення волокон	Інтенсивне зсувне подрібнення
Швидкість ротора, об/хв	1200—1800	2000—3000
Споживана енергія, кВт·год/т	30—50	45—70
Підвищення виходу CH_4 , %	+50—60	+35—45
Типова сировина	Силос, солома, гній, паперові відходи	Харчові відходи, органічні ТПВ
Переваги	Менше енергоспоживання, ефективне розпушення волокон	Висока ступінь гомогенізації, знищення агломератів
Недоліки	Менша диспергувальна здатність	Вища енерговитратність

Така передобробка має позитивний енергетичний баланс, приріст виробництва метану перевищує енерговитрати. Ефективність дефлейкера становила близько 1,8—2,4 кВт·год додаткової енергії CH_4 на 1 кВт·год спожитої електроенергії, а для диспергатора — близько 1,3—1,6 кВт·год/кВт·год (Cesaro, Cieri, & Belgiorno, 2020). Це робить дефлейкер більш економічно доцільним для великих потоків волокнистої біомаси.

Струминна обробка передбачає пропускання біомаси через спеціальні форсунки під високим тиском. Під час різкої зміни тиску та швидкості потоку виникають гідродинамічні зсуви, кавітація та мікротурбулентність, що призводить до деструкції клітинної структури матеріалу (Zhang, Zhang, & Zhang, 2012). Підвищення тиску та швидкості потоку збільшує ефект деструкції біомаси, але водночас підвищує енергоспоживання.

Метод підходить для широкого спектра органічних матеріалів, зокрема гною великої рогатої худоби, свиней, курячого посліду, харчових і рослинних відходів, силосу, соломи, жому, мулових осадів та органічної фракції побутових відходів (Gallego-García, & Duque, 2022).

Таблиця 4. Параметри струминної обробки різних видів сировини

Тип сировини	Тиск, МПа	Швидкість потоку, м/с	Температура, °C	Енерговитрати, кВт·год/т	Підвищення виходу CH_4 , %
Гній ВРХ	10—25	60—120	30—60	20—45	+10—20
Курячий послід	15—30	80—140	40—80	30—60	+15—25
Харчові відходи	8—20	50—100	25—60	15—35	+10—18
Силос/солома	20—40	100—160	50—90	40—70	+20—35

Оптимальний режим струминної обробки залежить від вологості та структури субстрату. Для високовологих матеріалів доцільна обробка при 10—20 МПа, тоді як для соломи або жому ефективні короткочасні імпульси з тиском понад 30 МПа (Cesaro, Cieri, & Belgiorno, 2020).

Кавітація — це сучасна технологія попередньої підготовки біомаси, спрямована на підвищення ефективності процесу анаеробного зброджування і, відповідно, збільшення виходу біогазу. Фізично — це процес утворення, росту та руйнування бульбашок пари або газу в рідині при зміні тиску. Коли ці бульбашки лопаються, виникають локальні зони високого тиску (до 1000 атм); температурні сплески; ударні хвилі та мікрореактивні струмені, які руйнують структуру субстрату та знижують ступінь полімеризації складних органічних сполук. Розрізняють гідродинамічну кавітацію (біомаса проходить через зону низького тиску в кавітаційних реакторах, де виникають кавітаційні бульбашки й акустичну (ультразвук частою 20—40 кГц). Кавітаційна обробка є перспективним методом інтенсифікації виробництва біогазу, особливо при переробці гною, харчових та агровідходів, осадів стічних вод. Результати залежать від режиму обробки (інтенсивність та вид кавітації, час, температура, концентрація субстрату, поєднання з хімічною/ферментною обробкою) (Bimestre, Mantovani, & Tuna, 2020). За даними лабораторних досліджень, вихід біогазу може реально зрости на 20—60%; вміст метану в біогазі — на 5—15%; час зброджування скорочується на 15—30%. Вміст залишкового активного мулу в дигестаті знижується.

Таблиця 5. Ефективність кавітаційної обробки різних видів сировини

Субстрат	Тип кавітації	Зміна виходу CH ₄
Первинні осади/дигестат	Вортекс-гідродинамічна кавітація (НС)	≈ +100—200%
Тверді харчові відходи + осад стічних вод	Ультразвук + лужна обробка	≈ +49%
Лігноцелюлозна біомаса	Гідродинамічна кавітація	≈ + від десятків до понад 100% залежно від сировини
Міські органічні відходи	Гідродинамічна кавітація	% підвищення залежать від сировини
Кукурудзяна лузга (лігноцелюлоза)	Гідродинамічна кавітація + ферментна (НСЕ)	Відновлення лігніну склало 47,4%
Різні органічні відходи	Ультразвук (пілотні моделі)	≈ +20—60%
С/г біомаса, гній, активний мул	Гідродинамічна кавітація (пілотні моделі)	430—460 л CH ₄ /кг СР

Кавітація показує збільшення виходу метану для різних субстратів, але її ефективність дуже залежить від типу субстрату та режиму обробки (енерговитрати, час, комбіновані методи) (Bimestre, Mantovani, & Tuna, 2020). Ультразвукова обробка є ефективним методом підготовки сировини для виробництва біогазу. Оптимальні параметри залежать від типу сировини, проте у більшості випадків доцільно застосовувати частоту 20—25 кГц та енергетичну дозу до 9000 кДж/кг СР, що забезпечує підвищення виходу метану на 25—50% (Appels, Baeyens, & Dewil, 2008). Підтверджено значне підвищення виходу біогазу після ультразвукової обробки харчових відходів, на 30—45% (Cesaro, & Belgiorio, 2014). Для деяких культур (наприклад, кукурудза) ефект може бути меншим або навіть від'ємним, якщо умови кавітації підібрані неправильно (Bimestre, Mantovani, & Tuna, 2020).

Змішувальні системи. Різні типи змішувальних систем, включаючи механічні, гідравлічні або пневматичні, використовуються для забезпечення однорідного стану та гомогенності суміші субстрату з активним мулом. Ефективне перемішування може покращити біодоступність компонентів субстрату та підвищити водоутримувальну здатність.

Термічна попередня обробка. Нагрівання біомаси приводить до вивільнення внутрішньоклітинних речовини поживних елементів, таких як нітроген та фосфор. Крім того, термічна обробка сприяє солубілізації органічної речовини, що полегшує її засвоєння мікроорганізмами. До основних видів термічної обробки відносяться гідроліз і піроліз. Гідроліз застосовують для попередньої обробки різних видів сировини, включаючи лігноцелюлозні матеріали, такі як солома, кукурудзяні стебла, а також осад стічних вод. При підвищенні температур і тиску в процесі полімери (целюлоза, геміцелюлоза, лігнін тощо) руйнуються до простіших цукрів. Механізми гідролізу включають розрив глікозидних зв'язків у целюлозі та геміцелюлозі, а також часткову деструкцію лігніну (Carrere та ін., 2010). Ефективність гідролізу залежить від температури та часу його проведення. Обробка різних типів мулу при температурі 150—180 °C протягом 30—60 хв забезпечує скорочення вмісту органічних речовин до 60% і збільшує виробництво біогазу (Aboulfotoh, 2015; Langdon, Pesante, & Vidal, 2016). Піролізом називають термічне розкладання біомаси в безкисневому середовищі при високих температурах, зазвичай, вище 500 °C. У результаті піролізу утворюються біоолія, біовугілля та синтез-газ. Швидкий піроліз при температурі близько 500 °C сприяє максимальному виходу біоолії, тоді як повільний при нижчих температурах збільшує вихід біовугілля (Carrere et al., 2010). При надмірно високих температурах можуть утворюватися інгібітори, такі як меланоїди.

Хімічна попередня обробка. Хімічна обробка також спрямована на підвищення біодоступності сировини для мікроорганізмів та руйнування лігноцелюлозної структури. В основному використовують озонування та обробку лугами. Використання озону (O_3), сильного окислювача, сприяє деградації лігноцелюлозної біомаси та збільшенню пористості матеріалу. Озонування може застосовуватися для попередньої обробки різних видів сировини, включаючи осад стічних вод. Ефективність озонування залежить від дози озону та часу обробки. Під дією O_3 відбувається лізис клітин та руйнування позаклітинних полімерних речовин, що підвищує доступність субстрату для мікроорганізмів (Taherzadeh, & Karimi, 2008).

Лужну обробку проводять гідроксидом натрію ($NaOH$), гідроксидом кальцію ($Ca(OH)_2$) або аміаком (NH_3). Луги руйнують ефірні зв'язки між лігніном, геміцелюлозою та целюлозою, що призводить до розчинення лігніну та збільшення площі поверхні матеріалу. Ефективність лужної обробки залежить від концентрації лугу, температури та часу обробки. Лужна обробка широко застосовується для попередньої обробки соломи, лушпиння та інші сільськогосподарських відходів (Appels, Van Der Heyden, & Degève, 2010). Кислотна обробка передбачає використання розведених або концентрованих кислот для гідролізу геміцелюлози та підвищення доступності целюлози. Органічні розчинники та іонні рідини є перспективними хімічними сполуками, які можуть бути використані для розщеплення лігноцелюлозної сировини. Типові розчинники (етанол, метанол, ацетон, диметилсульфоксид (ДМСО), або суміші спиртів з кислотами) здатні вибірково видаляти

лігнін з матриці біомаси, що робить целюлозу доступнішою для мікроорганізмів під час анаеробного зброджування. Зменшення кристалічності целюлози, зростання пористості матеріалу покращує біодоступність сировини, у результаті біодеградація прискорюється, а вихід метану зростає (Mancini, Papirio, & Esposito, 2016).

Таблиця 5. Ефективність обробки різних видів сировини органічними розчинниками

Тип сировини	Обробка	Вихід CH ₄ , %
Рисова солома	60% етанол, 120 °С, 2 год	+52
Кукурудзяний жом	Етанол—вода (70:30), 100 °С	+46
Трав'яна біомаса	Ацетон, 80 °С	+38
Солома пшениці	ДМТС, 90 °С, 3 год	+55
М'які залишки	Етанол + оцтова кислота, 120 °С	+60

Така попередня обробка субстрату збільшує вихід метану в середньому на 40—60% порівняно з необробленою біомасою, зменшує час гідролізу на 20—30%, підвищує концентрацію розчинних органічних речовин у 1,5—2,2 раза. Найефективнішими є розчинники на основі етанолу, ацетону та ДМТС, особливо у поєднанні з ферментними або термічними методами (Hernández-Beltrán et al., 2019).

Іонні рідини (ІР) — це солі, які мають розчинні та каталізаторні властивості. У лігноцелюлозній біомасі ІР розривають міжмолекулярні та внутрішньомолекулярні взаємодії, зокрема руйнують водневі зв'язки у целюлозі та розчиняють фракції лігніну. Це призводить до зменшення кристалічності целюлози, збільшення пористості, що підвищує доступність субстрату для ферментів і мікроорганізмів (Yin et al., 2021). Так, обробка пшеничної соломи 1-етіл-3-метілімідазоліа ацетатом підвищує вихід метану у 1,34—1,61 раза (Marin-Batista, Mohedano, & de la Rubia, 2021). Привертає увагу висока ефективність делігніфікації та підвищення гідролітичної здатності біомаси; можливість підбору ІР з урахуванням специфіки сировини. Оптимізація складу ІР і умов обробки дозволяє підвищити вихід метану у 1,5—2 рази. Однак вартість деяких іонних рідин і енергозатрати при їх регенерації високі, залишки ІР потенційно токсичні для анаеробної мікрофлори.

Використання хімічних реагентів може призвести до забруднення навколишнього середовища, якщо не буде забезпечено їх належну утилізацію або регенерацію. Крім того, залишки хімічних речовин в обробленій сировині можуть негативно впливати на процес метаногенезу.

Біологічна попередня обробка. При біологічній передобробці використовують ферменти або живі мікроорганізми для деструкції структурних компонентів біомаси. У мікробній підготовці застосовують бактерії, гриби та ферментативні комплекси, що продукують целюлази, ксиланази, протеази та ліпази. Процес може бути аеробним або факультативно анаеробним і тривати 1—5 днів (Hendriks, & Zeeman, 2009). Цей етап забезпечує підвищення біодоступності сполук вуглецю, азоту та зменшення полімерних структур (целюлоза, лігнін, білки), що покращує вихід метану на 15—60% залежно від субстрату (Zheng, Zhao, & Li, 2014; Sun, Cao, & Wang, 2020). Біостимуляція полягає у додаванні готових мікробних консорціумів або ферментів, які активують гідролізну стадію анаеробного перетворення

органічних речовин. Додавання метаногенних консорціумів на ранніх етапах дозволяє скоротити лаг-фазу на 25% і збільшити вихід CH_4 на 18% (Sun, Cao, & Wang, 2020). У біологічних ко-культурах часто комбінують аеробні та анаеробні мікроорганізми, що сприяє стабілізації pH і покращує збродження складних відходів. Для ферментативної деструкції целюлози та геміцелюлози застосовують гриби видів *Trichoderma reesei*, *Aspergillus niger* та *Phanerochaete chrysosporium*. Бактерії родів *Clostridium*, *Bacillus* та *Pseudomonas* здатні руйнувати білки та ліпіди. Застосування змішаних культур (ко-культуральний підхід) дозволяє підвищити біогазоутворення на 25—40% (Zhang, Loh, & Tong, 2019).

Таблиця 6. Порівняння біологічних методів підготовки сировини

Метод	Типові мікроорганізми/ферменти	Ефект на вихід біогазу	Переваги/недоліки	Література
Ферментативна обробка	Целюлази, протеази, ліпази	+25—50% CH_4	Висока ефективність, але вартість ферментів висока	Appels et al., 2008
Мікробна аеробна	<i>Trichoderma reesei</i> , <i>Aspergillus niger</i>	+20—35% CH_4	Проста реалізація, але потребує контролю O_2	Zheng et al., 2014
Біостимуляція консорціумами	<i>Clostridium</i> , <i>Methanosaeta</i>	+15—30% CH_4	Підвищує швидкість, але залежить від складу сировини	Sun et al., 2020
Комбінована (фермент + мікроорганізми)	Целюлазні гриби + метаногени	+40—60% CH_4	Найвищий ефект, але складна координація процесу	Zhang et al., 2019

Температура біологічної обробки, зазвичай, становить 30—40 °C (мезофільний режим), pH — 6,5—7,5, а тривалість — 48—120 годин. При ферментативному гідролізі вміст розчинного органічного вуглецю може збільшитися у 2—3 рази, а вихід метану — до 0,35—0,45 м³ CH_4 /кг сухих речовин (Appels, Baeyens, & Dewil, 2008). При ко-культурній обробці значення COD підвищується на 40—60%, що свідчить про підвищення біодоступності субстрату (Zhang, Loh, & Tong, 2019). Мікробна та біологічна підготовки є перспективними методами підвищення ефективності виробництва біогазу. Найвищий ефект спостерігається при комбінованому використанні ферментів і мікроорганізмів, що може підвищити вихід метану на 40—60%.

Мікроаеробна попередня обробка передбачає подачу невеликої кількості кисню та стимулює мікроби для вищого гідролізу й ацидогенезу. Прикладом є попередня обробка курячого пір'я за допомогою *Pseudomonas aeruginosa*, що виділяє кератиназу, для руйнування його стійкої структури. Біологічні методи попередньої обробки посилюють ферментативний гідроліз та ефективність біометанізації, що може значно збільшити вихід метану (Chao, Li, & Guangquig, 2021).

Порівняльний аналіз методів попередньої обробки сировини. Вибір ефективності механічної, термічної, мікробіологічної чи хімічної обробки сировини для виробництва біогазу залежить від типу сировини, бажаного виходу біогазу, швид-

кості процесу, енергоспоживання, собівартості. Механічна обробка дозволяє збільшити площу поверхні та зменшити розмір частинок і особливо ефективна для обробки трав. Однак механічні методи енергоємні, а їхній вплив на вихід біогазу менший порівняно з іншими. Термічна обробка спричиняє руйнування складних органічних сполук, підвищуючи доступність поживних речовин. Термічні методи можуть значно збільшити вихід біогазу, особливо при обробці лігноцелюлозної сировини (Chandra, Takeuchi, & Hasegawa, 2012). Проте необхідно ретельно контролювати параметри процесу, щоб уникнути утворення інгібіторів та оптимізувати енергоспоживання. Хімічна обробка є ефективною для делігніфікації біомаси та підвищення її біодоступності. Озонування особливо ефективно для різних видів органічних відходів. Однак хімічні методи пов'язані з високою вартістю реагентів, необхідністю утилізації відходів і ризиком утворення інгібіторів. Мікробіологічна обробка поки знаходиться на стадії лабораторних досліджень. Вибір оптимального методу залежить від багатьох факторів. Для лігноцелюлозної сировини більш ефективними є хімічні та термічні методи, а для багатої на вуглеводи — достатньо механічної обробки. Для досягнення кращих результатів експериментують з комбінованими методами попередньої обробки, що дозволяє отримати синергетичний ефект. Механічна обробка на першому етапі зменшує розмір частинок, а потім хімічна або термічна обробка руйнує складні сполуки (Atelge, Atabani, & Kaya, 2020).

Як приклад, розглянемо метод біоекструзії. Біоекструзія — це процес механічної, теплової та частково біохімічної обробки органічної сировини у спеціальному пристрої (Ma et al., 2022). Метод базується на класичній екструзії, під час якої біомаса піддається високому тиску (10—40 бар), температурі (90—150 °C) і зсувним силам, але додатково вводяться ферменти або активні мікроорганізми, які ініціюють гідроліз органічних полімерів (целюлози, геміцелюлози, білків) (Wang, Ma, & Xing, 2023).

Інноваційна біотехнологія BioIronTech (патент США № 7393452 та патент Сінгапуру № 106658 «Склади та методи очищення стічних вод та інших відходів») включає такі етапи: аноксичне бактеріальне відновлення Fe(III), наприклад, порошок залізної руди; оновлення поверхні частинок залізної руди за рахунок утворення розчинених іонів Fe²⁺; осадження нерозчинних солей заліза (II) неорганічними аніонами (фосфатами) або органічними аніонами (фенолами та органічними кислотами); біоокислення сполук заліза (II) з утворенням негативно, позитивно або нейтрально заряджених гідроксидів заліза (III), які є добрими адсорбентами багатьох забруднюючих речовин; утилізація або термічна регенерація (гідр)оксиду заліза (III). Технологія BioIronTech дозволяє значно покращити аеробне й анаеробне очищення муніципальних і промислових стічних вод, особливо анаеробне зброджування ліпід- та сульфатовмісних стічних вод підприємств харчової промисловості (Ivanov et al., 2014).

Таблиця 7. Вплив обробки сировини біоекструзією на вихід метану

Субстрат	Умови біоекструзії	Вихід CH ₄ , %
Кукурудзяна солома	120 °C, 20 бар, ферментна добавка 0,1%	+35—45
Кукурудзяний силос	130 °C, подвійна шнекова система, біоактиватор	+25—38

Продовження таблиці 7

Солома пшениці	100 °С, 25 бар, ферментна суміш	+41
Суміш гною і соломи	110 °С, 15 бар, мікробний консорціум	+ до 50
Агровідходи, силос	біоекструзія + гідротермічний гідроліз	+25—35

Біоекструзія є перспективним методом комбінованої підготовки біомаси перед метаногенезом. Поєднання механічної деструкції та ферментного гідролізу дає змогу підвищити вихід біогазу на 30—50%, скоротити час й покращити стабільність процесу (Chevalier et al., 2025). Метод особливо ефективний для лігноцелюлозних субстратів. Так, вихід метану з стебла кукурудзи та рисової соломи після обробки збільшився на 32—45% (Kupryaniuk, Oniszczyk, & Matwijczuk, 2020; Ma et al., 2022).

Інноваційні технології попередньої підготовки сировини інтегровані з археогенною біоконверсією і спрямовані на максимізацію виробництва біометану. Наразі існує потреба у подоланні розриву між результатами лабораторних досліджень та комерційним застосуванням. В майбутньому попередня підготовка сировини буде базуватися на комплексному використанні двох або більше методах. Увага буде зосереджена на оптимізації їх місця в рамках взаємодії між попередньою обробкою, АЗ-системами, очищенням біогазу, та прибутковістю і технологічністю БГА.

Таблиця 8. Порівняння ефективності методів попередньої підготовки сировини

Метод	Тип дії	Основні параметри	Підвищення виходу CH ₄ , %	Потреба в енергії, кВт·год/т	Переваги	Недоліки
Механічна	Подрібнення	Розмір часток 0,5—5 мм	10—30	30—80	Простота, універсальність	Високі енерговитрати
Хімічна	Кислотна, лужна, окисна	pH 2—12, 60—90 °С, 1—3 год	20—45	10—25	Ефективна деструкція полімерів	Корозія обладнання, потреба нейтралізації
Термічна	Парова, гідротермічна	120—180 °С, 15—60 хв	25—50	15—40	Прискорення гідролізу	Високі енерговитрати
Біологічна	Мікробна, ферментативна	30—40 °С, 2—5 діб	20—60	5—10	Екологічність, стабілізація процесу	Тривалість
Комбінована	Мех., фіз., хім., біологічна	Різні	40—70	15—60	Найвищий ефект	Складність координації

Вибір конкретного обладнання повинен збалансувати бажаний ступінь зменшення розміру частинок (що впливає на технологічні процеси) з необхідними енергетичними витратами і потребує ретельного аналізу потреб та ресурсів для кожного конкретного проекту (Heller, Brandhorst, & Oechsner, 2023).

Висновки

1. Різні методи попередньої підготовки сировини дозволяють значно підвищити ефективність виробництва біогазу. Найбільш перспективними є комбіновані технології, які поєднують механічні або фізичні впливи з біологічними процесами. Оптимізація параметрів підготовки дає змогу збільшити вихід метану до 0,45—0,50 м³ СН₄/кг сухої речовини, скоротити лаг-фазу археогенної біоконверсії та підвищити стабільність процесу.

2. Вибір методу попередньої обробки залежить від типу сировини, бажаного збільшення виходу біогазу, економічних витрат та екологічних міркувань.

3. Мікробна та біологічна підготовки сировини є перспективними методами інтенсифікації процесу виробництва біогазу. Вони забезпечують підвищення виходу метану, стабілізацію процесу зброджування та зменшення енергетичних витрат, але довготривалі і потребують високого рівня технологічної дисципліни.

4. Механічна попередня обробка є ефективною для збільшення виробництва біогазу з різноманітної органічної сировини, особливо з вмістом лігноцелюлозної біомаси. Для потреб сільських домогосподарств цей метод є найкращим у поєднанні з дигестором, який не потребує складного обслуговування.

5. Найвищий ефект спостерігається при комбінованому методі попередньої підготовки сировини, що може підвищити вихід метану на 40—70% при позитивному енергетичному балансі. Дороговартість обладнання, необхідність висококваліфікованого обслуговування обмежує застосування таких технологій на малих біогазових заводах.

6. Для розкриття повного потенціалу попередньої обробки сировини для анаеробного зброджування необхідна розробка більш енергоефективних технологій, оптимізація методів для конкретних субстратів і вивчення системних підходів, які враховують весь ланцюг формування вартості біометану.

Література

- Актуальний звіт ЄБА. (2024). *Uabio*. <https://uabio.org/materials/15629/>.
- Гелетука, Г. Г. (2023). Біометаном аграрного походження можна замінити до 20 млрд кубів природного газу. *Grow How in.ua* <https://www.growhow.in.ua/biometanom-ahramoho-pokhodzhen-nia-mozhna-zaminyty-do-20-mlrd-kubiv-prirodnoho-hazu-heorhiy-heletukha>.
- Конеченков, А. Є. (2022). Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. *Разумков центр* <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny>.
- Кравчук, С. В. (2025). Перший біометан: виклики і перспективи для розвитку галузі. *Uabio*. <https://uabio.org/materials/14736/>.
- Сагун, Л. М., Різніченко, Л. В., Велькін, Б. О. (2020). Перспективи розвитку ринку біогазу в Україні та за кордоном. *Економіка і Організація Управління*, 1(37), 160. <https://doi.org/10.31558/2307-2318.2020.1.16>.
- Aboulfotoh, A. (2015). Effect of thermal pretreatment on the solubilization of organic matters in a mixture of primary and waste activated sludge. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 10(2), 161—166. <https://doi.org/10.5383/ijtee.10.02.011>.
- Amoo, A., Madu, I., Adeleye, A. (2023) Review on the pre-treatment advancements of biogas production barriers. *UMY Journal of Microbiology Research*, 8(1), 6—30. <https://doi.org/10.47430/ujmr.2381.002>.

- Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J., Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755—781. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>.
- Appels, L., Van Der Heyden, L., De Wael, K., Degreè, J. (2010). Influence of low temperature thermal pre-treatment on sludge solubilisation, heavy metal release and anaerobic digestion. *Bioresour-
ce Technology*, 101(15), 5743—5748. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.068>.
- Atelge, M., Atabani, A., Krisa, D., Kaya, M. (2020). A critical review of pretreatment technologies to enhance anaerobic digestion and energy recovery. *Fuel*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117494>.
- Bimestre, T., Mantovani, J., Canettieri, E., Tuna, C. (2022). Hydrodynamic cavitation for ligno-cellulosic biomass pretreatment: A review of recent developments and future perspectives. *Bioresour-
ces and Bioprocessing*, 9, 7 <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00499-2>.
- Carrere, H., Dumas, C., Battimelli, A., Batstone, D., Delgenes, J., Steyer, P., Ferrer, I. (2010). Pre-treatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review. *Journal of Hazardous Mate-
rials*, 183, 1—15. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.129>.
- Cesaro, A., Belgiorno, V. (2014). Pretreatment methods to improve anaerobic biodegradability of organic solid waste. *Chemical Engineering Journal*, 240, 24—37. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.11.055>.
- Cesaro, A., Cieri, V., Belgiorno, V. (2020). Press extrusion pretreatment of the organic fraction of municipal solid waste for enhanced methane production. *Journal of Material Cycles and Waste Mana-
gement*, 23, 130—138. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01105-3>.
- Chao, S., Li, W., Cai, F., Chang, C., Guangquig, L. (2021). Anaerobic and microaerobic pretreat-
ment for improving methane production from paper waste in anaerobic digestion. *Frontiers in Micro-
biology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.688290>.
- Chevalier, A., Lamarque, J., Sambusiti, C., Vandenbossche, V., Santanach-Carreras, E., Monlau, F. (2025). Pilot-scale assessment of twin-screw extrusion combined with lime pretreatment to improve semi-continuous biomethane production from corn stover, and potential of produced digestate as fer-
tilizer. *Journal of Environmental Management*, 377, 124635. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124635>.
- Gallego-García, M., Moreno, A., Manzanares, P., Negro, M., Duque, A. (2023). Recent advances on physical technologies for the pretreatment of food waste and lignocellulosic residues. *Bioresour-
ce Technology*, 369, 128397. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128397>.
- Dell’Omo, P. (2025). Different susceptibilities of wheat straw and corn stover to mechanical pre-treatment for biomethane production. *Methane*, 4(1), 5. <https://doi.org/10.3390/methane4010005>.
- Heller, R., Brandhorst, C., Hulsemann, B., Lemmer, A., Oechsner, H. (2023). Comparison of diffe-
rent mechanical pretreatment methods for the anaerobic digestion of landscape management grass. *Energies*, 6(24), 8091. <https://doi.org/10.3390/en16248091>.
- Hendriks, A., Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic bio-
mass. *Bioresour-
ce Technology*, 100(1), 10—18. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027>.
- Hernández-Beltrán, J., Hernández-De Lira, I., Cruz-Santos, M., Saucedo-Luevanos, A., Hernán-
dez-Terán, F., Balagurusamy, N. (2019). Insight into pretreatment methods of lignocellulosic biomass to increase biogas yield: Current state, challenges, and opportunities. *Applied Science*, 9(18), 3721. <https://doi.org/10.3390/app9183721>.
- Hjorth, M., Gränitz, K., Adamsen, A., Møller, H. (2010). Extrusion as a pretreatment to increase biogas production. *Bioresour-
ce Technology*, 102(8), 4989—4994. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.128>.
- Ivanov, V., Wang, J. Y., Stabnikova, O., Krasinko, V., Stabnikov, V., Tay, S. T. L., Tay, J. H. (2004). Iron-mediated removal of ammonia from strong nitrogenous wastewater of food processing. *Water Science and Technology*, 49(5—6), 421—431. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0783>.
- Ivanov, V., Stabnikov, V., Guo C., Stabnikova, O., Ahmed, Z., Kim, I., Shuy, E. (2014). Wastewa-
ter engineering applications of BioIronTech process based on the biogeochemical cycle of iron biore-
duction and (bio)oxidation. *AIMS Environmental Science*, 1(2), 53—66. <https://doi.org/10.3934/environsci.2014.2.53>.

- Ivanov, V., Stabnikov, V., Stabnikova, O., Salyuk, A., Shapovalov, E., Ahmed, Z., Tay, J. (2019). Iron-containing clay and hematite iron ore in slurry-phase anaerobic digestion of chicken manure. *AIMS Materials Science*, 6(5), 821—832. <https://doi.org/10.3934/matersci.2019.5.821>.
- Kratky, L., Arce, C. (2022). Mechanical pretreatment of lignocellulosic biomass toward enzymatic/fermentative valorization. *IScience*, 25(7), 104610. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104610>.
- Kupryaniuk, K., Oniszcuk, T., Combrzyński, M., Czekala, W., Matwijczuk, A. (2020). The influence of corn straw extrusion pretreatment parameters on methane fermentation performance. *Materials*, 13(13), 3003. <https://doi.org/10.3390/ma13133003>.
- Langdon, P., Pesante, S., Venegas, M., Vidal, G. (2016). Developments in pre-treatment methods to improve anaerobic digestion of sewage sludge. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 15(2), 1—39. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9396-8>.
- Mancini, G., Papirio, S., Lens, P., Esposito, G. (2016). Solvent pretreatments of lignocellulosic materials to enhance biogas production. *Energy & Fuels*, 30(3), 1892—1900. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02711>.
- Ma, S., Li, Y., Li, J., Yu, X., Cui, Z., Yuan, X., Zhu, W., Wang, H. (2022). Features of single and combined technologies for lignocellulose pretreatment to enhance biomethane production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, 112606. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112606>.
- Marin-Batista, J., Mohedano, A., de la Rubia, A. (2021). Pretreatment of lignocellulosic biomass with 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate. *Resources*, 23. <https://doi.org/10.3390/resources10120118>.
- Montgomery, L., Bochmann, G. (2014). Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production. Technical Report. ISBN 978-1-910154-05-2 (electronic version). https://www.iea-biogas.net/files/datenredaktion/download/Technical%20Brochures/pretreatment_web.pdf.
- Patent US 7 393452. (2008). Tay, J. H., Tay, S. T. L., Ivanov, V., Stabnikova, O., Wang, J. *Compositions and methods for the treatment of wastewater and other waste*. International Classes: C02F3/30; C02F3/34.
- Patent Singapore 106658. (2006). Tay, J. H., Tay, S. T. L., Ivanov, V., Stabnikova, O., Wang, J. Y. *Compositions and methods for the treatment of wastewater and other waste*. International Classes: C02F3/30; C02F3/34.
- Qu, Y., Miao, X., Chen, S., Qin, N., Li, J., Che, Y., Luo, L., Sun, Y. (2024). Novel insights into the mechanism of dynamic changes in microstructure and physicochemical properties of corn straw pretreated by ball milling and feasibility analysis of anaerobic digestion. *Science of The Total Environment*, 945, 173943. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173943>.
- Sule, I., Agbabiaka, T., Salii, B., Ajijolakewu, K., Zakariyah, R. (2023). Optimization of conditions for the production of indole acetic acid by *Azotobacter*. *Umyu Journal of Microbiology Research*, 8(1), 46—53. <https://www.ajol.info/index.php/ujmr/article/download/285950/269409/667998>.
- Sun, C., Cao, W., Wang, Y. (2020). Microbial consortia and bioaugmentation strategies for anaerobic digestion: A review. *Renewable Energy*, 146, 1956—1965. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.120>.
- Taherzadeh, M., & Karimi, K. (2008). Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 9, 1621—165. <https://doi.org/10.3390/ijms9091621>.
- Vögeli, Y., Lohri, C. R., Gallardo, A., Diener, S., Zurbrugg, C. (2014). *Anaerobic digestion of biowaste in developing countries: Practical information and case studies*. Zurbrugg, 136 p. https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SWM/Anaerobic_Digestion/biowaste.pdf.
- Wahid, R., Hjorth, M., Kristensen, S., & Møller, H. (2015). Extrusion as pretreatment for boosting methane production: Effect of screw configurations. *Energy & Fuels*, 29(7), 4030—4037. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00191>.
- Wang, J., Ma, D., Lou, Y., Ma, J., Xing, D. (2023). Optimization of biogas production from straw wastes by different pretreatments: Progress, challenges, and prospects. *Science of The Total Environment*, 905, 166992. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166992>.

Yin, X., Wei, L., Pan, X., Liu, C., Jiang, J., Wang, K. (2021). The pretreatment of lignocelluloses with green solvent as biorefinery preprocess. *Frontiers in Plant Science, Plant Biotechnology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.670061>.

Zhadan, S., Shapovalov, Y., Salyuk, A., Usenko, S. (2023). Bioconversion of Poultry Waste into Clean Energy. In: O. Stabnikova, O. Shevchenko, V. Stabnikov, O. Paredes-López (Eds.) *Bioconversion of Waste to Value-added Products*, pp. 221—243. CRC Press, Boca Raton, London, New York, <https://doi.org/10.1201/9781003329671-8>.

Zhang, S., Zhang, P., Zhang, G., Fan, J., Zhang, Y. (2012). Enhancement of anaerobic sludge digestion by high-pressure homogenization. *Bioresource Technology*, 118, 496—501. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.089>.

Zhang, J., Loh, K. C., Zhang, J., Tong, Y. (2019). Bioaugmentation and microbial community analysis for enhanced methane production from anaerobic digestion of food waste. *Bioresource Technology*, 272, 70—79. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.081>.

Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F., Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 42, 35—53. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.01.001>.

SELENIUM NANOPARTICLES IN THE FOOD INDUSTRY AND AGRICULTURE: CURRENT STATUS OF RESEARCH, PROSPECTS AND EU REGULATORY FRAMEWORK

O. Skrotska, <https://orcid.org/0000-0003-4296-648X>

O. Zholobko, <https://orcid.org/0009-0003-3083-1614>

National University of Food Technologies

Key words:

Selenium nanoparticles
Foodborne pathogens
Food products
Agriculture
EU regulatory framework

Article history:

Received 06.11.2025

Received in revised form

21.11.2025

Accepted 08.12.2025

Corresponding author:

O. Skrotska

E-mail:

skrotska@ukr.net

Citation: Скроцька О. І., Жолобок О. В. (2025). Наночастинки селену в харчовій промисловості та сільському господарстві: сучасний стан досліджень, перспективи та нормативна база ЄС. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 60—76. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-6

ABSTRACT

Biosynthesised selenium nanoparticles (SeNPs) demonstrate pronounced antimicrobial and antifungal activity against a wide range of food pathogens and microorganisms causing spoilage of products. Using SeNPs in food technologies allows reducing the level of contamination of *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp., *Staphylococcus aureus*, *Aspergillus* spp., *Fusarium* spp. and *Penicillium* spp. in various types of food products. Using SeNPs in edible coatings extends the shelf life of fruits and vegetables by an average of 20—40%, reduces their mass loss by 15—30% and ensures the preservation of elasticity and attractive appearance of fruits for a long time.

The effectiveness of the action of nanoparticles was determined by the method of their biosynthesis, size, morphology and surface modification. Selenium nanoparticles with sizes of 3—50 nm, synthesised using microorganisms or plant extracts, had a high antimicrobial activity. The concentration of SeNPs in the range of 10—50 mg/l was sufficient to inhibit most gram-positive and gram-negative bacteria without significantly impacting the sensory properties of food products and their safety for consumers. Integration of SeNPs into polymeric packaging materials helped reduce the rate of oxidative processes, slow the accumulation of peroxides and preserve natural antioxidants in products. These things prevent their spoilage and loss of nutritional value during storage.

The obtained results indicate a high potential for using biosynthesised selenium nanoparticles as a safe and effective alternative to synthetic preservatives and chemical fungicides. Their use contributes to increasing microbiological safety, reducing food losses and developing environmentally friendly technologies for storing and packaging food products.

At the same time, the practical implementation of SeNPs in the food industry requires considering regulatory aspects. In the European Union, using nanomaterials, specifically selenium nanoparticles, is subject to special requirements for safety, migration analysis and toxicological assessment. This requires harmonisation of scientific research with EU legislative regulations and further improvement of methods for assessing the safety of their use.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-6

НАНОЧАСТИНКИ СЕЛЕНУ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ ТА СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ: СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ, ПЕРСПЕКТИВИ ТА НОРМАТИВНА БАЗА ЄС

О. І. Скроцька, <https://orcid.org/0000-0003-4296-648X>

О. В. Жолобко, <https://orcid.org/0009-0003-3083-1614>

Національний університет харчових технологій

Біосинтезовані наночастинки селену (SeNPs) демонструють виражену анти-мікробну та антифунгальну активність проти широкого спектра харчових патогенів і мікроорганізмів, що спричиняють псування продукції. Використання SeNPs у харчових технологіях дозволяє зменшити рівень контамінації *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella spp.*, *Staphylococcus aureus*, *Aspergillus spp.*, *Fusarium spp.* та *Penicillium spp.* у різних видах харчових продуктів. Застосування SeNPs у складі їстівних покриттів подовжує термін зберігання фруктів і овочів у середньому на 20—40%, знижує втрату їх маси на 15—30% та забезпечує збереження пружності та привабливого зовнішнього вигляду плодів упродовж тривалого часу.

Ефективність дії наночастинок визначається способом їх біосинтезу, розмірами, морфологією та модифікацією поверхні. Високу антимікробну активність проявляють наночастинки селену з розмірами 3—50 нм, що були синтезовані з використанням мікроорганізмів або рослинних екстрактів. Концентрація SeNPs у діапазоні 10—50 мг/л є достатньою для пригнічення більшості грампозитивних і грамнегативних бактерій без істотного впливу на органолептичні властивості харчових продуктів та їхню безпечність для споживачів. Інтеграція SeNPs у полімерні пакувальні матеріали сприяє зниженню швидкості окисних процесів, уповільненню накопичення пероксидів і збереженню природних антиоксидантів у продуктах, що запобігає їх псуванню та втраті поживної цінності під час зберігання.

Отримані результати свідчать про високий потенціал використання біосинтезованих наночастинок селену як безпечної та ефективною альтернативи синтетичним консервантам і хімічним фунгіцидам. Їхнє застосування сприяє підвищенню мікробіологічної безпеки, зниженню харчових втрат і розвитку екологічно чистих технологій зберігання та пакування харчової продукції.

Водночас практична імплементація SeNPs у харчовій промисловості потребує врахування регуляторних аспектів. У Європейському Союзі використання наноматеріалів, зокрема наночастинок селену, підлягає спеціальним вимогам щодо безпечності, міграційного аналізу та токсикологічної оцінки. Це вимагає гармонізації наукових досліджень із законодавчими нормами ЄС та подальшого вдосконалення методів оцінки безпечності їх використання.

Ключові слова: наночастинки селену, харчові патогени, харчові продукти, сільське господарство, нормативна база ЄС.

Постановка проблеми. Проблема мікробної контамінації харчових продуктів та їх псування залишається одним із ключових викликів сучасної харчової промисловості. Бактеріальні патогени (*Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp., *Staphylococcus aureus* тощо) та міцеліальні гриби (*Aspergillus* spp., *Fusarium* spp., *Penicillium* spp., *Botrytis cinerea*) спричиняють значні економічні втрати через псування продукції, зниження терміну її зберігання та ризик виникнення харчових отруєнь і інфекцій у споживачів (Aftab, 2023; Hamouda, 2024; Salem, 2022; Yuan, 2023). Традиційні підходи контролю передбачають використання хімічних консервантів, антибіотиків і фунгіцидів, проте їх широке застосування обмежується зростанням антибіотикорезистентності, потенційними токсичними ефектами та негативним впливом на екологію.

Окрім безпосередньої антимікробної дії, сучасна харчова промисловість потребує рішень, що одночасно подовжують термін споживання продукції, зберігаючи її харчову та біологічну цінність, а також відповідають концепціям безпечності та сталого розвитку. Біосинтезовані наночастинки селену (SeNPs) розглядаються як альтернатива традиційним засобам захисту завдяки їхнім вираженим антимікробним, антифунгальним і антиоксидантним властивостям. Селен, як есенціальний мікроелемент, додатково може сприяти біофортифікації сільськогосподарських культур, підвищуючи їх поживну цінність і стійкість до абіотичних стресів (Garza-García та ін., 2022).

Попри зростаючу кількість досліджень щодо можливостей біосинтезу наночастинок селену, систематизовані дані щодо їх ефективності проти харчових патогенів, механізмів дії біогенних SeNPs, впливу їх розміру, форми та поверхневих характеристик на антимікробні властивості залишаються обмеженими (Ao, 2023; Gregirchak, 2023; Ndwandwe, 2021; Qin, 2025; Stabnikova, 2023). Додатковим аспектом є питання безпечності використання наночастинок селену. Незважаючи на те, що наявні дослідження свідчать про відсутність значної міграції селену з багатошарових пакувальних матеріалів за наявності бар'єрного шару, регуляторні вимоги ЄС до наноматеріалів у харчовій сфері стають дедалі суворішими (EFSA Scientific Committee, 2021a; EFSA Scientific Committee, 2021b; Rauscher, 2023). Це зумовлює необхідність аналізу не лише технологічних переваг SeNPs, а й їх відповідності чинному законодавству та гармонізації із загальноєвропейськими нормами безпечності харчових продуктів.

Отже, необхідним є комплексний аналіз наявних результатів, що дозволить визначити оптимальні умови використання біосинтезованих SeNPs у харчових покриттях, пакувальних матеріалах і сільському господарстві, а також оцінити їх безпеку з урахуванням вимог регуляторних органів ЄС. Такий підхід сприятиме розробці ефективних і безпечних стратегій для зменшення харчових втрат, підвищення якості продукції та зміцнення продовольчої безпеки.

Тому **метою пропонованого огляду** є узагальнення сучасних наукових даних щодо антимікробної активності наночастинок селену, аналіз механізмів, що визначають їхню ефективність проти харчових патогенів, а також визначення перспектив їх застосування для подовження терміну зберігання харчових продуктів, розроблення біоактивних пакувальних матеріалів і підвищення харчової безпеки з урахуванням регуляторних вимог ЄС.

Матеріали і методи. У дослідженні застосовано методи систематичного огляду наукової літератури. Пошук наукових публікацій здійснювали з використанням баз даних PubMed, Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Google Scholar. Для написання огляду використовували статті, що містили експериментальні дані щодо біосинтезу SeNPs із використанням мікроорганізмів, рослинних екстрактів або харчових відходів; дослідження антимікробної та антифунгальної активності SeNPs проти харчових патогенів; результати використання SeNPs у харчових покриттях, пакувальних матеріалах та агробіотехнологіях. Основна частина використаних джерел охоплює період 2018—2025 років.

Викладення основних результатів дослідження. *Харчові патогени.* Наночастинки селену показали виражену антимікробну активність проти широкого спектра харчових патогенів (як бактерій, так і міцеліальних грибів). Їх ефективність залежить від способу синтезу, розміру, концентрації та походження вихідних матеріалів (табл. 1).

Таблиця 1. Дія біогенних наночастинок селену на харчові патогени

Умови біосинтезу наночастинок	Характеристика наночастинок	Харчові патогени, до яких виявлена антимікробна дія SeNPs	Джерело
Екстракт естрагону, 0,1 М Na ₂ SeO ₃ , 0,2 М аскорбінової кислоти, 12 год при постійному перемішуванні	Сферичні, 20—40 нм	<i>Bacillus cereus</i> ATCC 11778, <i>Escherichia coli</i> ATCC 25922, <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC29213, <i>Listeria monocytogenes</i> , <i>Salmonella</i> spp., <i>Alternaria alternata</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Aspergillus parasiticus</i> , <i>Botrytis cinerea</i> , <i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Penicillium chrysogenum</i>	Yilmaz, Ispirli, Taylan, & Dertli, 2021
Екстракт алое, 10 мМ Na ₂ SeO ₃ , 121 °С, 1,5 бар, 15 хв	Сферичні, середній розмір 50 нм	<i>Staphylococcus aureus</i> PTCC 1112, <i>Escherichia coli</i> PPTCC 1270, <i>Colletotrichum coccodes</i> , <i>Penicillium digitatum</i>	Fardsadegh, & Jafarizadeh-Malmiri, 2019
Екстракт плодів <i>Emblica officinalis</i> (індійський агрус), 10 мМ Na ₂ SeO ₃ , 27 °С, 120 об/хв, 24 год	Сферичні, середній розмір 15—40 нм	<i>Escherichia coli</i> MTCC 41, <i>Listeria monocytogenes</i> MTCC 657, <i>Staphylococcus aureus</i> MTCC 96, <i>Enterococcus faecalis</i> MTCC 439, <i>Aspergillus brasiliensis</i> MTCC 1344, <i>Aspergillus flavus</i> MTCC 1883, <i>Aspergillus ochraceus</i> MTCC 10276, <i>Fusarium anthophilum</i> MTCC 10129, <i>Rhizopus stolonifer</i> MTCC 4886	Gunti, Dass, & Kalagatur, 2019
Екстракт кореня <i>Saussurea costus</i> , 10 мМ Na ₂ SeO ₃ , 25 °С, 180 об/хв, 4 год	Сферичні, 2,86—8,73 нм	<i>Escherichia coli</i> ATCC-25922, <i>Salmonella typhimurium</i> ATCC-23852, <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC-25923	Al-Saggaf та ін., 2020
Екстракт <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , 2 мМ Na ₂ SeO ₃ , 30 °С, 150 об/хв, 4 год	Сферичні, 4—51 нм	<i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Aspergillus niger</i>	Salem, 2022

Екстракт <i>Spirulina platensis</i> , 1 мМ Na ₂ SeO ₃ , 25 °C, 72 год	Сферичні, 2,8—38,9 нм	<i>Salmonella typhimurium</i> ATCC 14028, <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 25923	ElSaied, Diab, Tayel, Alghuthaymi, & Moussa, 2021
Супернатант <i>Bacillus licheniformis</i> , 1 мМ SeO ₂ , 37 °C, 48 год	Сферичні, 10—50 нм	<i>Bacillus cereus</i> DSMZ 345, <i>Enterococcus faecalis</i> ATCC 51299, <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 29213, <i>Escherichia coli</i> O157:H7 ATCC 43895, <i>Salmonella enterica</i> serovar Typhimurium ATCC 23564, <i>Salmonella enterica</i> serovar Enteritidis ATCC 4931	Khiralla, & El-Deeb, 2015
Культуральна рідина <i>Providencia vermicola</i> BGRW, 1 мМ SeO ₂ , 37 °C, 24 год	Сферичні, 3—50 нм	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Streptococcus agalactiae</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Enterobacter</i> sp., <i>Enterococcus</i> sp., <i>Proteus mirabilis</i> , <i>Klebsiella</i> sp., <i>Salmonella enteritidis</i> , <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	El-Deeb, Al-Talhi, Mostafa, & Abou-Assy, 2018

Наночастинки селену, які були отримані з використанням рослинних екстрактів характеризуються значною активністю проти широкого спектра бактеріальних харчових патогенів, які викликають різні кишкові інфекції та харчові отруєння, а також проти міцеліальних грибів, що спричиняють псування харчових продуктів. Так, SeNPs, що були отримані за допомогою екстракту естрагону, показали ефективність проти таких бактеріальних харчових патогенів, як *Bacillus cereus*, *Listeria monocytogenes* і *Staphylococcus aureus*. При їх використанні зона затримки росту бактерій становила 13—18 мм. Також виявлено протигрибкову активність SeNPs проти *Aspergillus niger* (10—14 мм), *Aspergillus parasiticus* (17—36 мм), *Botrytis cinerea* (8—12 мм), *Fusarium oxysporum* (15—24,5 мм) та *Penicillium chrysogenum* (9—14 мм). Усі ці міцеліальні гриби призводять до псування харчових продуктів. До речі, сам екстракт естрагону, який використовували для біосинтезу SeNPs, не проявляв антимікробної дії (Yilmaz, Ispirli, Taylan, & Dertli, 2021).

Синтезовані з використанням екстракту *Aloe vera* SeNPs мали високу антибактеріальну та протигрибкову активність як проти грампозитивних (*Staphylococcus aureus*), так і проти грамнегативних (*Escherichia coli*) бактерій, а також грибів *Colletotrichum coccodes* та *Penicillium digitatum* (Fardsadegh, & Jafarizadeh-Malmiri, 2019).

Біогенні SeNPs (синтез з використанням екстракту плодів *Emblica officinalis*) проявили широкий спектр активності щодо різних харчових патогенів, особливо проти міцеліальних грибів, зокрема *Aspergillus brasiliensis*, *Aspergillus flavus*, *Aspergillus oryzae*, *Aspergillus ochraceus*, *Fusarium anthophilum*, *Rhizopus stolonifer*. Визначена мінімальна інгібуюча концентрація (МІК) щодо таких бактеріальних харчових патогенів: *Escherichia coli* — 59,83 мкг/мл, *Listeria monocytogenes* — 29,83 мкг/мл, *Staphylococcus aureus* — 9,16 мкг/мл, *Enterococcus faecalis* — 18,67 мкг/мл (Gunti, Dass, & Kalagatur, 2019).

SeNPs, що були отримані з використанням екстракту кореня костусу (*Saussurea costus*), продемонстрували антибактеріальну дію проти *Escherichia coli* (зона затримки росту — 20,8 мм; МІК — 20 мкг/мл), *Salmonella typhimurium* (зона затримки росту — 22,3 мм; МІК — 17,5 мкг/мл) та *Staphylococcus aureus* (зона затримки росту — 18,6 мм; МІК — 25 мкг/мл) (Al-Saggaf та ін., 2020).

З використанням екстракту листя *Nilgiranthus ciliatus* були синтезовані SeNPs, які у концентрації 25 мкг/мл мали активність проти таких харчових патогенів, як *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* та *Salmonella typhi* (Meenambigai та ін., 2022).

Також досліджена антимікробна активність наночастинок селену, які були отримані з використанням мікроорганізмів. Наприклад, для біосинтезу SeNPs можна використовувати екстракт хлібопекарських дріжджів. Отримані таким способом наночастинок проявляють антимікробну дію проти різних харчових патогенів: *Escherichia coli* (МІК — 125 мкг/мл), *Staphylococcus aureus* (МІК — 62,5 мкг/мл), *Aspergillus fumigatus* (МІК — 250 мкг/мл), *Aspergillus niger* (МІК — 500 мкг/мл) (Salem, 2022).

Для наночастинок селену, що були синтезовані з використанням водного екстракту ціанобактерій *Spirulina platensis*, встановлена активність щодо бактеріальних харчових патогенів: *Staphylococcus aureus* (зона затримки росту — 18,7 мм; МІК — 17,5 мкг/мл) і *Salmonella typhimurium* (зона затримки росту — 15,3 мм; МІК — 22,5 мкг/мл) (ElSaied, Diab, Tayel, Alghuthaymi, & Moussa, 2021).

З використанням супернатанту бактерій *Bacillus licheniformis* (виділені з харчових відходів) були отримані наночастинок селену, які виявили антибактеріальну дію (МІК₉₀ — 25 мкг/мл) проти *Bacillus cereus*, *Enterococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella typhimurium* та *Salmonella enteritidis*. Концентрація SeNPs 20 мкг/мл була ефективною проти біоплівки усіх протестованих харчових патогенів, за винятком *Bacillus cereus* (Khiralla, & El-Deeb, 2015).

Наночастинок селену, що були отримані з використанням *Providencia vermicola* BGRW, показали широкий діапазон активності проти харчових патогенів. Вони проявляли антимікробну дію проти *Staphylococcus aureus* і *Bacillus cereus* (зона затримки росту — 29 мм), метицилін-резистентних *Staphylococcus aureus* (зона затримки росту — 27 мм), *Streptococcus agalactiae* (зона затримки росту — 25 мм) та *Escherichia coli* (зона затримки росту — 13 мм). Грампозитивні бактерії були більш чутливими до дії біогенних SeNPs, (МІК₉₀: *Staphylococcus aureus* — 10 мкг/мл, *Bacillus cereus* — 15 мкг/мл), ніж грамнегативні (*Escherichia coli* — 20 мкг/мл). Також наночастинок селену мали антибіоплівкову активність (>95% інгібування) проти *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus*, *Escherichia coli* та *Salmonella enteritidis* (El-Deeb, Al-Talhi, Mostafa, & Abou-Assy, 2018).

Показано підвищення інгібуючої активності щодо харчових патогенів (*Salmonella typhimurium*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*) молочнокислих бактерій, які були, збагачені наночастинок селену (Yang Jing Peng та ін., 2018).

Антимікробний ефект наночастинок селену зумовлений кількома взаємопов'язаними механізмами. Одним із них є генерація активних форм кисню, які викликають окисне пошкодження білків, ліпідів і нуклеїнових кислот у бактеріальних

клітинах. Іншим важливим механізмом є взаємодія SeNPs з тіловими групами білків клітинної стінки мікроорганізмів, що призводить до її руйнування та порушення функціональності клітини. Крім того, SeNPs можуть збільшувати проникність клітинної мембрани, порушувати її цілісність, впливати на дихальний ланцюг та синтез АТФ, що зупиняє поділ клітин і може викликати їхній лізис (El Saied, 2021; Gunti, 2019; Meenambigai, 2022).

Ефективність антимікробної дії SeNPs визначається низкою фізико-хімічних характеристик. Розмір і форма наночастинок відіграють ключову роль: біогенно синтезовані SeNPs, зазвичай, мають розміри від 3 до 50 нм, причому менші частинки краще проникають крізь клітинну стінку мікроорганізмів і демонструють вищу активність. Також важливим параметром є поверхневий заряд (дзета-потенціал), який впливає на стабільність наночастинок і запобігає їх агрегації. Як негативно, так і позитивно заряджені SeNPs можуть проявляти високу антимікробну активність, що свідчить про вагомий роль електростатичних взаємодій наночастинок з бактеріальними клітинними стінками. Метод синтезу та тип поверхневого покриття також мають значення. Біологічні методи, що використовують білки, полісахариди або ліпіди як стабілізуючі агенти, дозволяють отримати наночастинок з різним зарядом і вищою спорідненістю до бактерій (Al-Saggaf, 2020; Gunti, 2019; Yuan, 2023).

Подовження терміну зберігання плодів та овочів. Наночастинок селену, що були отримані з використанням екстракту листя *Cassia fistula* L., значно подовжували термін зберігання полуниці — до 16 діб при 6 °C. Обробка полуниці SeNPs зменшувала фізіологічну втрату ваги, підтримувала вміст вологи та знижувала частоту гниття. Відзначено підвищення активності каталази і пероксидази, збільшення загального вмісту фенолів та антиоксидантної активності (Aftab та ін., 2023). Інші дослідження із застосуванням SeNPs, що були синтезовані з використанням аскорбінової кислоти, підтвердили їхню ефективність у збереженні післязбиральної якості полуниці, навіть у випадках інфекції *Botrytis cinerea* (сіра гниль). Покриття полуниці розчином наночастинок селену сприяло збереженню антоціанів та розчинних сухих речовин, створюючи бар'єр, що обмежував проникнення CO₂, O₂ та вологи (Hamouda, Abdel-Hamid, Hagagy, & Nofal, 2024).

Синтезовані за допомогою екстракту шкірки граната (*Punica granatum*) SeNPs ефективно пригнічували ріст міцеліальних грибів *Penicillium digitatum*, що викликають гниття цитрусових під час їх зберігання і транспортування. Покриття наночастинок селену в комплексі з нанохітозаном заражених *Penicillium digitatum* апельсинів забезпечило повний захист плодів (100% інгібування росту *P. digitatum*) та збереження їхнього зовнішнього вигляду. Вже через 12 год після обробки цитрусових нанокомпозитом відбувався лізис і деформація гіф *P. digitatum* (Salem, Abd-Elraoof, Tayel, Alzuair, & Abonama, 2022).

Екзогенне застосування біосинтезованих наночастинок селену на рослинах манго, уражених хворобою деформації, підвищувало вміст хлорофілу, індекс стабільності мембран, рівень проліну та розчинних цукрів. Найбільш ефективною виявилася концентрація SeNPs 30 мкг/мл. Обробка наночастинок сприяла зниженню біотичного стресу шляхом активації ферментів антиоксидантного захисту (супероксиддисмутаза, пероксидаза) та накопичення фенольних сполук і флавоноїдів. У дослідженнях *in vitro* SeNPs у концентрації 300 мкг/мл максимально інгібували

ріст грибів *Fusarium mangiferae*, що викликають хворобу деформації манго (Shahbaz та ін., 2023).

SeNPs, що були синтезовані з використанням водного екстракту насіння пажитника (*Trigonella foenum-graecum*), показали виражену біоцидну активність проти *Fusarium oxysporum* (збудник фузаріозного в'янення томатів) та *Fusarium moniliforme* (спричиняє кореневі та прикореневі гнилі). Обробка інфікованих томатів наночастинками селену забезпечила повне пригнічення росту цих грибів та дозволила зберегти свіжість томатів упродовж 25 діб при 25 °C та 35 діб при 5 °C. Уже через 18 год після обробки томатів SeNPs спостерігалась суттєва деформація та лізис міцелію *F. oxysporum*. При цьому зменшувалася фізіологічна втрата маси плодів, знижувався pH та підвищувався вміст каротиноїдів і лікопіну в томатах (Manaa, Hamza, & Sorour, 2023).

Обробка слив їстівним покриттям на основі композитів полівінілового спирту та хітозану з наночастинками селену, що були отримані з використанням екстракту апельсинових шкірок, призводила до зниження втрати маси плодів і збереження їх пружності. Це дозволяє подовжити термін зберігання слив. Таке покриття також сприяло зменшенню кислотності, підвищенню вмісту розчинних сухих речовин і накопиченню L-аскорбінової кислоти й антоціанів у сливах (Abdelaziz та ін., 2025).

Антифунгальна активність SeNPs реалізується шляхом порушення цілісності клітинних мембран грибів і викликаного цим витоку клітинного вмісту, а також через індукцію утворення активних форм кисню, що пошкоджують ДНК і клітинні структури. Антиоксидантні властивості наночастинок селену сприяють захисту хлоропластів від окисного стресу, стимулюють біосинтез хлорофілу та підвищують активність антиоксидантних ферментів. Крім того, покриття з SeNPs створюють фізичний бар'єр, який обмежує газообмін і втрату вологи, сповільнюючи таким чином дозрівання та розкладання плодів (Salem, 2022; Shahbaz, 2023).

Пакувальні матеріали. Наночастинки селену успішно інтегрують у різні типи пакувальних матеріалів (табл. 2).

Таблиця 2. Пакувальні матеріали для харчових продуктів з наночастинками селену

Основа матеріалу	Метод синтезу або походження SeNPs	Властивості упаковки	Джерело
Плівка на основі крохмалю маніюки з SeNPs (282 нм)	Біологічний синтез: безклітинний водний екстракт <i>Enterococcus durans</i> MF5, 0,1 M Na ₂ SeO ₃ , 100 °C, 10 хв	Антибактеріальна дія (<i>Listeria monocytogenes</i> CLIST 2044 1/2 ^a , <i>Listeria ivanovii</i> 2050, <i>Listeria seeligeri</i> 2067, <i>Salmonella enteritidis</i> 1316, <i>Salmonella</i> sp., <i>Escherichia coli</i> ATCC 23922), зниження проникності водяної пари, УФ-стійкість	Nogueira, de Carvalho, Peron dos Santos, Furlaneto, & Maia, 2024
Плівка на основі полімолочної кислоти з мікрочастинками SeNPs (900 нм)	Комерційні наночастинки	Антибактеріальна дія (<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia coli</i>), антиоксидантна активність, підвищена водостійкість, УФ-стійкість	Lu та ін., 2020

Плівка на основі картопляного крохмалю з SeNPs (86,8 нм)	Сольвотермічний синтез з використанням екстракту листя <i>Moringa oleifera</i>	Антибактеріальна дія (<i>Salmonella typhimurium</i> ATCC 14028, <i>Escherichia coli</i> ATCC 43888), антиоксидантна активність	Ndwandwe, Malinga, Kayitesi, & Dlamini, 2022
Плівка на основі хітозану з SeNPs (6,8—58,2 нм)	Біологічний синтез: водний екстракт кориці, 10 мМ Na ₂ SeO ₃ , 25 °C, 210 об/хв, 6 год	Антибактеріальна дія (<i>Escherichia coli</i> ATCC-25922, <i>Salmonella typhimurium</i> ATCC-14028, <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC-25923, <i>Listeria monocytogenes</i> ATCC-19116)	Alghuthaymi та ін., 2021
Багатошаровий гнучкий матеріал з SeNPs (50—70 нм)	Хімічний синтез: Na ₂ SeO ₃ , аскорбінова кислота, 7% 2,4,7,9-тетраметил-5-децин-4,7-діол етоксилат	Антиоксидантна активність, нейтралізація активних форм кисню	Vera, Canellas, & Nerin, 2018

Одними з найперспективніших є плівки на основі крохмалю маніюки, які відзначаються доступністю, біорозкладністю та відсутністю впливу на сенсорні характеристики харчових продуктів. Такі плівки досліджували за наявності у них 1% та 2% SeNPs, що були синтезовані із використанням безклітинного водного екстракту *Enterococcus durans* MF5 з 10% вмістом ентероцинів (Nogueira, de Carvalho, Peron dos Santos, Furlaneto, & Maia, 2024). Полімолочна кислота (PLA) також є ефективним матеріалом для створення харчових плівок з наночастинками селену, оскільки має відмінні механічні властивості, прозорість і термопластичність та визнана безпечною для контакту з харчовими продуктами (Lu та ін., 2020). Також досліджують використання SeNPs у харчових плівках з картопляного крохмалю (Ndwandwe, Malinga, Kayitesi, & Dlamini, 2022). Окремий напрям становлять їстівні покриття на основі хітозану, що поєднують природну антимікробну дію цього полісахариду та антимікробні властивості наночастинок селену (Alghuthaymi та ін., 2021).

Синтез SeNPs для пакувальних матеріалів можна здійснювати різними методами, однак для харчової промисловості пріоритетними є екологічно безпечні підходи, що ґрунтуються на використанні біологічних об'єктів. Наночастинки селену, які були додатково введені в харчове покриття, а також були синтезовані з використанням мікроорганізмів — *Saccharomyces cerevisiae* (Salem, 2022), *Enterococcus durans* MF5 (Nogueira, de Carvalho, Peron dos Santos, Furlaneto, & Maia, 2024), *Providencia vermicola* BGRW (El-Deeb, Al-Talhi, Mostafa, & Abou-Assy, 2018), *Bacillus licheniformis* (Khiralla, & El-Deeb, 2015) та рослинних екстрактів — листя *Nilgiranthus ciliatus* (Meenambigai та ін., 2022), листя *Annona glabra* (Huong та ін., 2023), кори кориці (Alghuthaymi та ін., 2021).

Включення SeNPs до пакувальних матеріалів забезпечує їм низку цінних властивостей. Антиоксидантна активність зростає зі зменшенням розміру наночастинок, що дозволяє ефективно нейтралізувати вільні радикали. Дослідження показали, що плівки з крохмалю маніюки, полімолочної кислоти та картопляного крохмалю, збагачені SeNPs, суттєво зменшують рівень окисних процесів, подовжуючи термін зберігання таких продуктів, як лісові та волоські горіхи, картопляні чіпси,

шинка, курятина та овочі (Vera, Canellas, & Nerín, 2018). Антимікробна дія селенових наночастинок охоплює широкий спектр харчових патогенів, включно з *Listeria monocytogenes*, *Salmonella typhimurium*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus*. Механізм антимікробної дії наночастинок селену полягає в руйнуванні їх клітинної мембрани та стимуляції утворення активних форм кисню (Alghuthaymi, 2021; Lu, 2020; Nogueira, 2024).

Крім антимікробних і антиоксидантних властивостей, пакувальні матеріали з SeNPs демонструють покращені фізичні та бар'єрні характеристики. Вони знижують паропроникність, підвищують стійкість до УФ-випромінювання, водостійкість і механічну міцність, а також здатні незначно змінювати оптичні властивості плівок, надаючи їм червонуватого відтінку без суттєвої втрати прозорості (Lu, 2020; Ndwandwe, 2022; Nogueira, 2024; Vera, 2016).

Сільське господарство. Застосування SeNPs сприяє покращенню морфологічних характеристик рослин, зокрема висоти, довжини коренів і пагонів, свіжої та сухої маси, площі листової поверхні та кількості листків (табл. 3). Для пшениці та костриці очеретяної оптимальна концентрація SeNPs становить близько 30 мг/л при позакореновому внесенні, що забезпечує суттєве збільшення ростових параметрів як за нормальних умов, так і під час посухи (Ikram та ін., 2020). У випадку гороху найкращий ефект спостерігався при концентрації наночастинок 10 мг/л, що сприяло максимальному розвитку кореневої системи та приросту біомаси (Tenededzai, Chirwa, & Brink, 2023). Вищі концентрації SeNPs (понад 40 мг/л) можуть мати інгібуючий ефект (Ikram та ін., 2020). Крім того, наночастинки селену стимулюють фотосинтетичну активність рослин, підвищуючи вміст хлорофілу а, хлорофілу б, бета-каротину, лютеїну та зеаксантину, активність рибулозобісфосфаткарбоксилази і продихову провідність, що у поєднанні з підвищеним рівнем CO₂ може збільшувати продукцію сухої речовини у 1,8 раза порівняно з контролем. Позитивний ефект використання SeNPs зафіксовано для широкого спектра сільськогосподарських культур, включно із салатом (Cheng та ін., 2023), капустою (AbdElgawad та ін., 2023), картоплею (Liu та ін., 2025), горохом (Tenededzai, Chirwa, & Brink, 2023), рисом (Wang та ін., 2025), томатами (Hernández-Hernández та ін., 2019), редискою (Cheng та ін., 2022), баклажанами (Mahmoud та ін., 2023) тощо.

Таблиця 3. Використання наночастинок селену в сільському господарстві

Культура	Спосіб застосування SeNPs (ефективна концентрація)	Вплив наночастинок селену	Джерело
Пшениця	Фоліарна обробка (30 мг/л)	Покращення агрономічних показників (висота рослин, довжина пагона, свіжа та суха маса пагонів/коренів, довжина коренів, площа та кількість листків) особливо в умовах посухи; посилення росту як у нормальних умовах, так і в умовах водного дефіциту	Ikram та ін., 2020
Пшениця	Обробка насіння та внесення в ґрунт (25 мг/л)	Підвищення фізіолого-біохімічних показників (продихова провідність, акумуляція фотосинтетичних пігментів у листках, швидкість фотосинтезу, антиоксидантні ферменти та метаболіти); суттєве збільшення сухої маси	Alsherif, Hajjar, Aldilami, & AbdElgawad, 2023

Пшениця	Обробка насіння (замочування на 24 год, 100 мг/мл)	Протигрибкова активність (пригнічення <i>Fusarium</i> spp. — збудник кореневої та прикореневої гнилі); підвищення толерантності рослин до посухи та теплового стресу; збільшення кількості фотосинтетичних пігментів, покращення параметрів газообміну	El-Saadony та ін., 2021
Горох	Обробка насіння (10 ppm)	Збільшення індексу проростання насіння; стимулювання росту коренів та пагонів (збільшення середньої кількості коренів, довжини коренів та пагонів); збільшення свіжої та сухої маси	Tendenedzai, Chirwa, & Brink, 2023
Костриця очеретяна	Фоліарна обробка (4,5 мг/л)	Покращення агрономічних показників (розмір кореня, висота рослини, виробництво біомаси); покращення якості корму (збільшення вмісту селену, флавоноїдів, танінів, сирого протеїну, ліпідів, вуглеводів, зниження вмісту сирової клітковини)	González-Lemus та ін., 2022
Картопля	Фоліарна обробка (5 мг/л)	Антимікробна активність (пригнічення <i>Streptomyces</i> spp. — збудник парші звичайної); підвищення врожайності; покращення якості бульб (збільшення вмісту сухої речовини, сирого протеїну, селену)	Liu та ін., 2025
Капуста	Обробка насіння (25 ppm)	Стимуляція росту (збільшення свіжої та сухої маси); покращення поживної якості (підвищення вмісту амінокислот, зокрема глютамінової кислоти та тирозину); збільшення загального вмісту глюкозинолатів, глукорафаніну та сульфорафану	AbdElgawad та ін., 2023

Ще одним важливим аспектом використання SeNPs є біофортифікація рослин, що дозволяє підвищити їх поживну цінність. Наночастинки селену значно збільшують вміст цього елементу в рослинах: у костриці (*Festuca arundinacea* Schreb.) концентрація селену зросла приблизно в чотири рази при застосуванні 4,5 мг/мл SeNPs (González-Lemus, 2022), а у пшениці — у 19—21 раз більше, ніж у контролі (Alsherif, Hajjar, Aldilami, & AbdElgawad, 2023). Крім того, SeNPs сприяють збільшенню вмісту сирого протеїну, ліпідів і вуглеводів при одночасному зниженні вмісту клітковини. Також наночастинки селену стимулюють синтез біоактивних сполук — фенолів, флавоноїдів і танінів, що підвищує антиоксидантну здатність рослин (Ikram та ін., 2020).

SeNPs відіграють важливу роль у підвищенні стійкості рослин до абіотичних стресів. Зокрема, їх застосування дозволяє зменшити негативний вплив посухи завдяки затримці старіння та кращому регулюванню водного балансу. Так, використання наночастинок селену в концентрації 25 мг/л призвело до покращення параметрів росту огірків в умовах засоленого ґрунту та спеки (Shalaby та ін., 2021). Після обробки SeNPs у концентрації 75 мг/л насіння томатів спостерігали кращий ріст рослин в умовах недостатньої вологості (Ishtiaq та ін., 2023). Обробка полуниці наночастинками селену (50 мг/л) сприяла покращенню ростових показників

і підвищенню врожайності за умов посухи (Zahedi, Moharrami, Sarikhani, & Padervand, 2020).

Наночастинки селену значно посилюють антиоксидантну систему захисту рослин, підвищуючи активність ферментів, таких як пероксидаза, каталаза, супероксиддисмутаза, аскорбатпероксидаза та глутатіонредуктаза, а також вміст антиоксидантних молекул (аскорбату, глутатіону) (Aloufi, 2024; Alsherif, 2023; Zeeshan, 2023). Біосинтезовані SeNPs проявляють вищу антиоксидантну активність: понад 70% інгібування DPPH-радикалів при концентрації 80 ppm, тоді як для селеніту цей показник не перевищує 20% (Tendenedzai, Chirwa, & Brink, 2023).

Ще один перспективний напрям застосування SeNPs — це захист від шкідників і хвороб. Біосинтезовані наночастинки селену, отримані з використанням *Lactobacillus acidophilus* ML14, виявили високу протигрибкову активність проти *Fusarium culmorum* та *Fusarium graminearum* — збудників кореневої гнилі пшениці. Вони здатні зменшувати захворюваність на 75% і суттєво підвищувати продуктивність культур. Антимікробна дія наночастинок селену пов'язана з пошкодженням ДНК та руйнуванням клітинної стінки патогенів. Таким чином, SeNPs розглядаються як перспективна альтернатива традиційним хімічним пестицидам (El-Saadony та ін., 2021).

Механізм дії SeNPs у рослинах є комплексним і включає антиоксидантний захист, стимуляцію синтезу сірковмісних і селеновмісних амінокислот, регуляцію вуглеводного обміну та взаємодію з ґрунтовими мікроорганізмами. Селен у формі наночастинок здатний повільно вивільнятися в ґрунтовий розчин, що забезпечує його пролонговану дію, а також менш негативно впливає на мікробні спільноти порівняно з селенітом (González-Lemus, 2022; Ikram, 2020; Liu, 2021).

Регулювання використання наночастинок селену в ЄС. У Європейському Союзі використання наночастинок у харчових продуктах, кормах і пакувальних матеріалах суворо регламентується. Загальні вимоги встановлені Регламентом (ЄС) № 1935/2004 щодо матеріалів і виробів, які контактують із харчовими продуктами, а також спеціальними актами, зокрема Регламентом (ЄС) № 10/2011 для пластиків і Регламентом (ЄС) № 450/2009 щодо активних та інтелектуальних матеріалів та виробів, які призначені для контакту з харчовими продуктами. У разі використання наночастинок у харчових інгредієнтах вони підпадають під дію Регламенту (ЄС) 2015/2283 про нові харчові продукти. Окрема увага приділяється визначенню терміна «наноматеріал», уточненому в Рекомендації Комісії 2022/С 229/01, яка встановлює критерії щодо діапазону розмірів і порогових значень (EFSA Scientific Committee, 2021b; Rauscher, 2023; Schoonjans, 2023).

Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA) розробило низку методичних документів, включно з «Guidance on risk assessment of nanomaterials to be applied in the food and feed chain: human and animal health» та «Guidance on technical requirements for regulated food and feed product applications to establish the presence of small particles including nanoparticles» (EFSA Scientific Committee, 2021a; EFSA Scientific Committee, 2021b). Ці документи деталізують вимоги до опису фізико-хімічних характеристик, оцінки міграції, токсикологічних досліджень і моделювання експозиції. Зокрема, в технічному висновку EFSA було оцінено наночастинки селену з розмірами 50—90 нм. Встановлено, що використання SeNPs у багатошарових полімерних плівках є безпечним за умови їх розміщення в шарі,

який не має прямого контакту з харчовим продуктом, наприклад, відокремленому шаром поліолефіну. У такому випадку міграція селену з матеріалу не відбувається, що свідчить про відсутність ризику для споживачів (Silano та ін., 2018). Встановлено, що у випадку використання SeNPs у багатошарових плівках і при цьому наночастинки включені в шар, який безпосередньо не контактує з харчовим продуктом, наприклад, відділений шаром поліолефіну, вони не викликають ризику для споживачів, оскільки міграція селену з таких матеріалів не була виявлена. Проте було встановлено наявність міграції наночастинок селену для плівок з картопляного крохмалю у кількості 0,01—0,26 мг/кг, що є значно нижчим за допустимі норми — 60 мг/кг (Ndwandwe, Malinga, Kayitesi, & Dlamini, 2022).

Загалом, регуляторна практика ЄС орієнтована на принцип обережності, забезпечення повної прозорості та відстежуваності наноматеріалів у харчовому ланцюзі. Подальші кроки уніфікації включають гармонізацію тестових протоколів і розширення вимог щодо постмаркетингового моніторингу, що є актуальним і для використання SeNPs у сфері харчової безпеки та біотехнологій.

Висновки

Біосинтезовані наночастинки селену характеризуються антимікробною активністю проти широкого спектра харчових патогенів і фітопатогенів, ефективно пригнічують утворення біоплівки, подовжують термін зберігання плодів та овочів, а також підвищують їх харчову цінність і стійкість до абіотичних стресів. Інтеграція SeNPs у істивні покриття та пакувальні матеріали покращує їх бар'єрні, антиоксидантні й антибактеріальні властивості, знижує харчові втрати та сприяє безпечному зберіганню продукції. Отже, біогенні наночастинки селену є екологічно безпечною альтернативою хімічним пестицидам і консервантам для харчової промисловості та сільського господарства.

Разом з тим перспективи практичного впровадження SeNPs у харчову галузь тісно пов'язані з дотриманням чинних регуляторних вимог. У Європейському Союзі застосування наноматеріалів у харчових продуктах і пакувальних матеріалах регулюється суворими нормами, що передбачають проведення оцінки ризику, вивчення міграції елементів наночастинок і доведення їх безпечності для споживачів. Тому подальші дослідження мають бути зосереджені не лише на оптимізації процесу біосинтезу та встановленні антимікробної активності наночастинок селену, але й на узгодженні наукових результатів із регуляторними вимогами ЄС, що забезпечить їхнє безпечне використання у харчових технологіях.

Література

- Abdelaziz, H. T., Seif Mohamed, E. M., Younis, S. K., Ahmed, N., Michael, M. N., Abu-Hussein, S. H., ..., & El-Sayed, S. M. (2025). Selenium nanoparticle loaded on PVA/chitosan biofilm synthesized from orange peels: antimicrobial and antioxidant properties for plum preservation. *BMC chemistry*, 19(1), 245. <https://doi.org/10.1186/s13065-025-01608-w>.
- Abdelgawad, H., Magdy Korany, S., Reyad, A. M., Zahid, I., Akhter, N., Alsherif, E., ..., & Crecchio, C. (2023). Synergistic impacts of plant-growth-promoting bacteria and selenium nanoparticles on improving the nutritional value and biological activities of three cultivars of Brassica sprouts. *ACS omega*, 8(29), 26414—26424. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02957>.

- Aftab, A., Ali, M., Yousaf, Z., Binjawhar, D. N., Hyder, S., Aftab, Z. E. H., ..., & Ali, I. (2023). Shelf-life extension of *Fragaria* × *ananassa* Duch. using selenium nanoparticles synthesized from *Cassia fistula* Linn. leaves. *Food science & nutrition*, 11(6), 3464—3484. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3336>.
- Alghuthaymi, M. A., Diab, A. M., Elzahy, A. F., Mazrou, K. E., Tayel, A. A., & Moussa, S. H. (2021). Research Article Green Biosynthesized Selenium Nanoparticles by Cinnamon Extract and Their Antimicrobial Activity and Application as Edible Coatings with Nano-Chitosan. *Journal of Food Quality*, 2021, 6670709. <https://doi.org/10.1155/2021/6670709>.
- Aloufi, F. A., Abdelgawad, H., Halawani, R. F., Balkhyour, M. A., & Hassan, A. H. (2024). Selenium nanoparticles induce coumarin metabolism and essential oil production in *Trachyspermum ammi* under future climate CO₂ conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 211, 108705. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108705>.
- Al-Saggaf, M. S., Tayel, A. A., Ghobashy, M. O., Alotaibi, M. A., Alghuthaymi, M. A., & Moussa, S. H. (2020). Phytosynthesis of selenium nanoparticles using the costus extract for bactericidal application against foodborne pathogens. *Green Processing and Synthesis*, 9(1), 477—487. <https://doi.org/10.1515/gps-2020-0038>.
- Alsherif, E. A., Hajar, D., Aldilami, M., & Abdelgawad, H. (2023). Physiological and biochemical responses of wheat to synergistic effects of selenium nanoparticles and elevated CO₂ conditions. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1183185. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1183185>.
- Ao, B., Du, Q., Liu, D., Shi, X., Tu, J., & Xia, X. (2023). A review on synthesis and antibacterial potential of bio-selenium nanoparticles in the food industry. *Frontiers in microbiology*, 14, 1229838. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1229838>.
- Cheng, B., Wang, C., Chen, F., Yue, L., Cao, X., Liu, X., ..., & Xing, B. (2022). Multiomics understanding of improved quality in cherry radish (*Raphanus sativus* L. var. *radculus pers*) after foliar application of selenium nanomaterials. *Science of the Total Environment*, 824, 153712. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153712>.
- Cheng, B., Wang, C., Yue, L., Chen, F., Cao, X., Lan, Q., ..., & Wang, Z. (2023). Selenium nanomaterials improve the quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) by modulating root growth, nutrient availability, and photosynthesis. *NanoImpact*, 29, 100449. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2022.100449>.
- González-Lemus, U., Medina-Pérez, G., Espino-García, J. J., Fernández-Luqueño, F., Campos-Montiel, R., Almaraz-Buendía, I., ..., & Urrutia-Hernández, T. (2022). Nutritional parameters, biomass production, and antioxidant activity of *Festuca arundinacea* Schreb. conditioned with selenium nanoparticles. *Plants*, 11(17), 2326. <https://doi.org/10.3390/plants11172326>.
- EFSA Scientific Committee, More, S., Bampidis, V., Benford, D., Bragard, C., Halldorsson, T., ..., & Schoonjans, R. (2021a). Guidance on risk assessment of nanomaterials to be applied in the food and feed chain: Human and animal health. *Efsa Journal*, 19(8), e06768. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6768>.
- EFSA Scientific Committee, More, S., Bampidis, V., Benford, D., Bragard, C., Halldorsson, T., ..., & Schoonjans, R. (2021b). Guidance on technical requirements for regulated food and feed product applications to establish the presence of small particles including nanoparticles. *EFSA Journal*, 19(8), e06769. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6769>.
- El-Deeb, B., Al-Talhi, A., Mostafa, N., & Abou-Assy, R. (2018). Biological synthesis and structural characterization of selenium nanoparticles and assessment of their antimicrobial properties. *Am. Sci. Res. J. Eng. Technol. Sci.*, 45(1), 135—170.
- El-Saadony, M. T., Saad, A. M., Najjar, A. A., Alzahrani, S. O., Alkhatib, F. M., Shafi, M. E., ..., & Hassan, M. A. (2021). The use of biological selenium nanoparticles to suppress *Triticum aestivum* L. crown and root rot diseases induced by *Fusarium species* and improve yield under drought and heat stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(8), 4461—4471. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.043>.
- ElSaied, B. E., Diab, A. M., Tayel, A. A., Alghuthaymi, M. A., & Moussa, S. H. (2021). Potent antibacterial action of phycosynthesized selenium nanoparticles using *Spirulina platensis* extract. *Green Processing and Synthesis*, 10(1), 49—60. <https://doi.org/10.1515/gps-2021-0005>.
- Fardsadeh, B., & Jafarizadeh-Malmiri, H. (2019). Aloe vera leaf extract mediated green synthesis of selenium nanoparticles and assessment of their in vitro antimicrobial activity against spoilage fungi

and pathogenic bacteria strains. *Green Processing and Synthesis*, 8(1), 399—407. <https://doi.org/10.1515/gps-2019-0007>.

Garza-García, J. J., Hernández-Díaz, J. A., Zamudio-Ojeda, A., León-Morales, J. M., Guerrero-Guzmán, A., Sánchez-Chiprés, D. R., ..., & García-Morales, S. (2022). The role of selenium nanoparticles in agriculture and food technology. *Biological trace element research*, 200(5), 2528—2548. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-02847-3>.

Gregirchak, N., Syniavska, D., Khonkiv, M., & Stabnikov, V. (2023). Lactic acid bacteria for the synthesis of metals nanoparticles. *Ukrainian Food Journal*, 12(4), 599—626. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2023-12-4-8>.

Gunti, L., Dass, R. S., & Kalagatur, N. K. (2019). Phytofabrication of selenium nanoparticles from *Embllica officinalis* fruit extract and exploring its biopotential applications: antioxidant, antimicrobial, and biocompatibility. *Frontiers in microbiology*, 10, 931. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00931>.

Hamouda, R. A., Abdel-Hamid, M. S., Hagagy, N., & Nofal, A. M. (2024). The potent effect of selenium nanoparticles: insight into the antifungal activity and preservation of postharvest strawberries from gray mold diseases. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(11), 6756—6768. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13502>.

Hernández-Hernández, H., Quiterio-Gutiérrez, T., Cadenas-Pliego, G., Ortega-Ortiz, H., Hernández-Fuentes, A. D., Cabrera de la Fuente, M., ..., & Juárez-Maldonado, A. (2019). Impact of selenium and copper nanoparticles on yield, antioxidant system, and fruit quality of tomato plants. *Plants*, 8(10), 355. <https://doi.org/10.3390/plants8100355>.

Huon, Q. T. T., Nam, N. T. H., Duy, B. T., An, H., Hai, N. D., Ngan, H. T. K., ..., & Nguyen, H. H. (2023). Structurally natural chitosan films decorated with *Andrographis paniculata* extract and selenium nanoparticles: Properties and strawberry preservation. *Food Bioscience*, 53, 102647. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102647>.

Ikram, M., Raja, N. I., Javed, B., Mashwani, Z. U. R., Hussain, M., Hussain, M., ..., & Akram, A. (2020). Foliar applications of bio-fabricated selenium nanoparticles to improve the growth of wheat plants under drought stress. *Green Processing and Synthesis*, 9(1), 706—714. <https://doi.org/10.1515/gps-2020-0067>.

Ishtiaq, M., Mazhar, M. W., Maqbool, M., Hussain, T., Hussain, S. A., Casini, R., & Elansary, H. O. (2023). Seed priming with the selenium nanoparticles maintains the redox status in the water stressed tomato plants by modulating the antioxidant defense enzymes. *Plants* 12, 1556. <https://doi.org/10.3390/plants12071556>.

Khiralla, G. M., & El-Deeb, B. A. (2015). Antimicrobial and antibiofilm effects of selenium nanoparticles on some foodborne pathogens. *LWT-Food Science and Technology*, 63(2), 1001—1007. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.08>.

Liu, J., Qi, W. Y., Chen, H., Song, C., Li, Q., & Wang, S. G. (2021). Selenium nanoparticles as an innovative selenium fertilizer exert less disturbance to soil microorganisms. *Frontiers in Microbiology*, 12, 746046. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.746046>.

Liu, H., Zhang, Y., Zhang, L., Liu, Y., Chen, Y., & Shi, Y. (2025). Nano-selenium strengthens potato resistance to potato scab induced by *Streptomyces* spp., increases yield, and elevates tuber quality by influencing rhizosphere microbiomes. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1523174. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1523174>.

Lu, R., Sameen, D. E., Qin, W., Wu, D., Dai, J., Li, S., & Liu, Y. (2020). Development of polylactic acid films with selenium microparticles and its application for food packaging. *Coatings*, 10(3), 280. <https://doi.org/10.3390/coatings10030280>.

Mahmoud, S., Shedeed, S., El-Ramady, H., Abdalla, Z. F., El-Bassiony, A. E. M., & El-Sawy, S. (2023). Biological nano-selenium for eggplant biofortification under soil nutrient deficiency. *Egyptian Journal of Soil Science*, 63(2), 151—162. <https://doi.org/10.21608/ejss.2023.190428.1570>.

Manaa, H. M., Hamza, E. M., & Sorour, N. M. (2023). Post-harvest biocontrol of *Fusarium* infection in tomato fruits using bio-mediated selenium nanoparticles. *Amb Express*, 13(1), 119. <https://doi.org/10.1186/s13568-023-01622-y>.

Meenambigai, K., Kokila, R., Chandhirasekar, K., Thendralmanikandan, A., Kaliannan, D., Ibrahim, K. S., ..., & Nareshkumar, A. (2022). Green synthesis of selenium nanoparticles mediated by

Nilgiranthus ciliates leaf extracts for antimicrobial activity on foodborne pathogenic microbes and pesticidal activity against *Aedes aegypti* with molecular docking. *Biological Trace Element Research*, 200(6), 2948—2962. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-02868-y>.

Ndwandwe, B. K., Malinga, S. P., Kayitesi, E., & Dlamini, B. C. (2022). Selenium nanoparticles-enhanced potato starch film for active food packaging application. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(10), 6512—6521. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15990>.

Ndwandwe, B. K., Malinga, S. P., Kayitesi, E., & Dlamini, B. C. (2021). Advances in green synthesis of selenium nanoparticles and their application in food packaging. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(6), 2640—2650. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14916>.

Nogueira, M. H., de Carvalho, L., Peron dos Santos, A. R., Furlaneto, M. C., & Maia, L. F. (2024). Cassava starch-based film infused with biogenic selenium nanoparticles (bio-SeNPs) to reduce foodborne pathogens. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(10), 7541—7549. <https://doi.org/10.1111/ijfs.17519>.

Qin, X., Wang, Z., Lai, J., Liang, Y., & Qian, K. (2025). The synthesis of selenium nanoparticles and their applications in enhancing plant stress resistance: A Review. *Nanomaterials*, 15(4), 301. <https://doi.org/10.3390/nano15040301>.

Rauscher, H., Kestens, V., Rasmussen, K., Linsinger, T., & Stefaniak, E. (2023). Guidance on the implementation of the Commission Recommendation 2022/C 229/01 on the definition of nanomaterial. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/143118>.

Rauscher, H., Kobe, A., Kestens, V., & Rasmussen, K. (2023). Is it a nanomaterial in the EU? Three essential elements to work it out. *Nano Today*, 49, 101780. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2023.101780>.

Salem, M. F., Abd-Elraoof, W. A., Tayel, A. A., Alzuaibr, F. M., & Abonama, O. M. (2022). Antifungal application of biosynthesized selenium nanoparticles with pomegranate peels and nanochitosan as edible coatings for citrus green mold protection. *Journal of Nanobiotechnology*, 20(1), 182. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01393-x>.

Salem, S. S. (2022). Bio-fabrication of selenium nanoparticles using Baker's yeast extract and its antimicrobial efficacy on food borne pathogens. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 194(5), 1898—1910. <https://doi.org/10.1007/s12010-022-03809-8>.

Schoonjans, R., Castenmiller, J., Chaudhry, Q., Cubadda, F., Daskaleros, T., Franz, R., ..., & Tarazona, J. (2023). Regulatory safety assessment of nanoparticles for the food chain in Europe. *Trends in Food Science & Technology*, 134, 98—111. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.01.01>.

Shahbaz, M., Akram, A., Raja, N. I., Mukhtar, T., Mehak, A., Fatima, N., ..., & Abasi, F. (2023). Antifungal activity of green synthesized selenium nanoparticles and their effect on physiological, biochemical, and antioxidant defense system of mango under mango malformation disease. *PLoS One*, 18(2), e0274679. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274679>.

Shalaby, T. A., Abd-Alkarim, E., El-Aidy, F., Hamed, E. S., Sharaf-Eldin, M., Taha, N., ..., & Dos Reis, A. R. (2021). Nano-selenium, silicon and H₂O₂ boost growth and productivity of cucumber under combined salinity and heat stress. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 212, 111962. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111962>.

Silano, V., Bolognesi, C., Chipman, K., Cravedi, J. P., Engel, K. H., ..., & Castle, L. (2018). Safety assessment of the active substance selenium nanoparticles, for use in active food contact materials. *EFSA Journal*, 16(1), e05115. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5115>.

Stabnikova, O., Khonkiv, M., Kovshar, I., & Stabnikov, V. (2023). Biosynthesis of selenium nanoparticles by lactic acid bacteria and areas of their possible applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(9), 230. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03673-6>.

Tendenedzai, J. T., Chirwa, E. M., & Brink, H. G. (2023). Harnessing selenium nanoparticles (SeNPs) for enhancing growth and germination, and mitigating oxidative stress in *Pisum sativum* L. *Scientific Reports*, 13(1), 20379. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47616-5>.

Vera, P., Canellas, E., & Nerin, C. (2018). New antioxidant multilayer packaging with nanoselenium to enhance the shelf-life of market food products. *Nanomaterials*, 8(10), 837. <https://doi.org/10.3390/nano8100837>.

Vera, P., Echegoyen, Y., Canellas, E., Nerín, C., Palomo, M., Madrid, Y., & Cámara, C. (2016). Nano selenium as antioxidant agent in a multilayer food packaging material. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 408(24), 6659—6670. <https://doi.org/10.1007/s00216-016-9780-9>.

Wang, R., Zhang, M., Chen, T., Shen, W., Dai, J., Zhang, H., & Zhang, H. (2025). Enhanced selenium enrichment and flavors in rice (*Oryza sativa* L.) with selenium nanoparticles foliar application. *Journal of Food Composition and Analysis*, 107837. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107837>.

Yang Jing Peng, Y. J., Wang Jing, W. J., Yang Kun, Y. K., Liu Miao Miao, L. M., Qi Yi Man, Q. Y., Zhang Ting Jing, Z. T., ..., & Wei Xin Yuan, W. X. (2018). Antibacterial activity of selenium-enriched lactic acid bacteria against common food-borne pathogens in vitro. *Journal of Dairy Science*, 101(3), 1930—1942. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13430>.

Yilmaz, M. T., Ispirli, H., Taylan, O., & Dertli, E. (2021). A green nano-biosynthesis of selenium nanoparticles with Tarragon extract: Structural, thermal, and antimicrobial characterization. *LWT*, 141, 110969. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110969>.

Yuan, Q., Xiao, R., Afolabi, M., Bomma, M., & Xiao, Z. (2023). Evaluation of antibacterial activity of selenium nanoparticles against food-borne pathogens. *Microorganisms*, 11(6), 1519. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11061519>.

Zahedi, S. M., Moharrami, F., Sarikhani, S., & Padervand, M. (2020). Selenium and silica nano-structure-based recovery of strawberry plants subjected to drought stress. *Scientific reports*, 10(1), 17672. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74273-9>.

Zeeshan, M., Hu, Y. X., Guo, X. H., Sun, C. Y., Salam, A., Ahmad, S., ..., & Zhou, X. B. (2023). Physiological and transcriptomic study reveal SeNPs-mediated AsIII stress detoxification mechanisms involved modulation of antioxidants, metal transporters, and transcription factors in *Glycine max* L. (Merr.) roots. *Environmental Pollution*, 317, 120637. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120637>.

DEVELOPMENT OF RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES FOR THE VALORIZATION OF APPLE WASTE IN THE PRODUCTION OF FERMENTED BEVERAGES: PROSPECTS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN UKRAINE

A. Hirina, <https://orcid.org/0009-0004-4699-1492>

N. Hrehirchak, <https://orcid.org/0000-0001-8579-9058>

National University of Food Technologies

Key words:

Fermented beverages
Apple waste
Valorization
Green extraction
Circular economy
Sustainable production

Article history:

Received 13.11.2025
Received in revised form
25.11.2025
Accepted 11.12.2025

Corresponding author:

N. Hrehirchak
E-mail:
g_natal@ukr.net

Citation: Гіріна А. С. Грегирчак Н. М. (2025). Розвиток ресурсозберігаючих технологій валоризації яблучних відходів у виробництві ферментованих напоїв: перспективи сталого розвитку в Україні. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 77—87.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-7

ABSTRACT

The pressing issue of optimizing apple raw material processing in the food industry to produce fermented plant-based beverages, amid growing consumer demand for healthy, probiotic-enriched products post-COVID-19 is shown in the article. Traditional technologies result in high energy consumption and substantial waste generation, such as pomace and press cake, which contribute to global food losses accounting for 8—10% of greenhouse gas emissions. In Ukraine, a major apple producer, inefficient waste utilization limits sustainable development and competitiveness. Recent research on valorization techniques, including green extraction (microwave and ultrasonic methods yielding 20—30% higher efficiency), bioconversion for biofuels (bioethanol and biogas with a reduced carbon footprint of 1.13 kg CO₂ eq·kg⁻¹), production of biopolymers, feed additives, and functional food ingredients were studied. These approaches align with circular economy principles, transforming waste into value-added products like antioxidant-enhanced ciders, extruded snacks, pectin, and bioplastics. Market trends show increasing preference for plant-based fermented drinks from fruits, vegetables, legumes, and grains, with apples offering ideal composition (carbohydrates, phenolics, fibers) for fermentation stability and nutritional value. Challenges include economic infeasibility due to high investments, technical barriers like high moisture content and rapid spoilage, and scaling issues. Recommendations for Ukraine's food sector emphasize integrated cascade processing, state support for innovations, and development of new functional products to minimize waste, reduce environmental impact, and boost economic efficiency.

РОЗВИТОК РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВАЛОРИЗАЦІЇ ЯБЛУЧНИХ ВІДХОДІВ У ВИРОБНИЦТВІ ФЕРМЕНТОВАНИХ НАПОЇВ: ПЕРСПЕКТИВИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ В УКРАЇНІ

А. С. Гіріна, <https://orcid.org/0009-0004-4699-1492>

Н. М. Грегірчак, <https://orcid.org/0000-0001-8579-9058>

Національний університет харчових технологій

У статті розглянуто актуальну проблему оптимізації переробки яблучної сировини в харчовій промисловості для виробництва ферментованих рослинних напоїв, зумовлену зростанням попиту на здорові продукти з пробіотичними властивостями після пандемії COVID-19. Традиційні технології характеризуються високим енергоспоживанням та утворенням значної кількості відходів, таких як мезга та вичавки, які спричиняють глобальні харчові втрати, відповідальні за 8—10% викидів парникових газів. В Україні, як провідному виробнику яблук, не-ефективна утилізація відходів обмежує сталий розвиток і конкурентоспроможність. Дослідження аналізує сучасні тенденції, включаючи валоризацію відходів за допомогою зеленої екстракції (мікрохвильовий та ультразвуковий методи з ефективністю на 20—30% вищою), біоконверсії для біопалив (біоетанолу та біогазу з вуглецевим слідом $1,13 \text{ кг CO}_2 \text{ екв} \cdot \text{кг}^{-1}$), виробництва біополімерів, кормових добавок та функціональних харчових інгредієнтів. Ці підходи відповідають принципам циркулярної економіки, перетворюючи відходи на продукти з доданою вартістю, такі як сидр з підвищеним вмістом антиоксидантів, екструдовані снеки, пектини та біопластики. Ринкові тенденції свідчать про зростання попиту на ферментовані напої з рослинної сировини (фруктів, овочів, бобових, зернових), де яблука забезпечують оптимальний склад (вуглеводи, фенольні сполуки, волокна) для стабільності ферментації та харчової цінності. Виклики включають економічну недоцільність через високі інвестиції, технічні бар'єри (висока вологість, швидке псування) та проблеми масштабування. Рекомендації для харчової промисловості України акцентують на інтегрований каскадній переробці, державній підтримці інновацій і створенні нових функціональних продуктів для мінімізації відходів, зменшення екологічного впливу та підвищення економічної ефективності.

Ключові слова: ферментовані напої, яблучні відходи, валоризація, зелена екстракція, циркулярна економіка, стале виробництво.

Постановка проблеми. У сучасних умовах харчової промисловості спостерігається стрімке зростання попиту на ферментовані рослинні напої, зумовлене змінною споживачьких уподобань у напрямку здорового харчування, зменшення споживання молочних продуктів через алергії та непереносимість лактози, а також підвищеною зацікавленістю в продуктах з пробіотичними властивостями після пандемії COVID-19 (Hidalgo-Fuentes et al., 2024; Li et al., 2022). Яблучна сировина, як одна з найбільш доступних і поширених у світі (з обсягами вирощування понад

5 млн га), має значний потенціал для виробництва таких напоїв завдяки високому вмісту біоактивних речовин, але традиційні технології переробки характеризуються суттєвими недоліками: високим енергоспоживанням, утворенням великої кількості відходів (мезги та вичавок) і недостатньою ефективністю використання ресурсів (Guiné et al., 2021; Gotebiewska et al., 2022).

Ці відходи, що становлять значну частку рослинних залишків, спричиняють глобальну проблему харчових втрат, відповідальну за 8—10% викидів парникових газів і посилення кліматичних змін (Pal et al., 2023). Попри багатий склад відходів (харчові волокна, цукри, поліфеноли), вони часто утилізуються неефективно — через компостування чи використання як корму, що не реалізує їхню повну харчову та економічну цінність і створює додаткове навантаження на довкілля (Keşa et al., 2021). В Україні, як провідному виробнику яблук, ця проблема набуває особливого значення, оскільки відсутність широкого впровадження ресурсозберігаючих технологій валоризації (екстракція, біоконверсія, виробництво добавок) обмежує сталий розвиток галузі, призводить до економічних втрат і знижує конкурентоспроможність на глобальному ринку (Rebolledo-Leiva et al., 2024; Sobczak et al., 2022).

Ключовими викликами є економічна недоцільність впровадження інноваційних методів (високі інвестиції), технічні бар'єри (вологість сировини, стандартизація, швидке псування) та брак інтеграції принципів циркулярної економіки в промислові процеси, що перешкоджає переходу до сталого виробництва ферментованих напоїв з підвищеною функціональною цінністю (Putra et al., 2023; Thomas et al., 2025). Таким чином, проблема полягає в необхідності оптимізації технологій переробки яблучної сировини для мінімізації відходів, зменшення екологічного впливу та підвищення економічної ефективності, що вимагає комплексного аналізу й розробки рекомендацій для харчової промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження підкреслюють потенціал валоризації яблучних відходів (мезги та вичавок) для створення продуктів з доданою вартістю через мікробіологічні процеси й енергетичну оптимізацію. В огляді (Selmi та ін., 2025) зазначається, що ферментація мезги з використанням лактобактерій (наприклад, *Lactiplantibacillus plantarum*) та дріжджів (*Saccharomyces cerevisiae*) підвищує вміст фенольних сполук, антиоксидантів та органічних кислот, дозволяючи створювати функціональні продукти, такі як йогурти з покращеною текстурою, хліб з вищим вмістом волокон і напої з ароматизаторами. Це сприяє циркулярній економіці, зменшуючи відходи та покращуючи харчову цінність.

У (Ciftci, Genc, & Genc, 2025) проведено енергетичний та ексергетичний аналіз виробництва яблучного соку з валоризацією мезги в джем і харчові волокна, демонструючи зростання ефективності ексергії з 58,9% до 82,5% для асептичного наповнення, що знижує руйнування ексергії й екологічне навантаження.

У (Cela, & Bertolino, 2025) досліджують використання мезги як ароматизатора в пивоварінні, показуючи, що додавання 60 г/л мезги від сортів Gala підвищує вміст поліфенолів, естерів і вищих спиртів, покращуючи смак та прийнятність для споживачів, особливо молодих.

У статті (Thomas et al., 2025) акцентують на технологіях, таких як екструзія та інкапсуляція, для вилучення пектину та антиоксидантів з мезги, із застосуванням у желе, хлібобулочних виробках і ферментації для оцту, підкреслюючи нетермічне

сушіння для збереження біоактивних речовин та досягнення Цілей ООН щодо зменшення харчових втрат.

Ці дослідження доповнюють існуючі тенденції, фокусуючись на інтеграції біотехнологій для сталого розвитку харчової промисловості.

Метою дослідження є аналіз сучасних тенденцій виробництва ферментованих рослинних напоїв на основі яблучної сировини, оцінка потенціалу валоризації побічних продуктів переробки (мезги та вичавок) для зменшення харчових відходів і підвищення сталості виробництва, а також розробка рекомендацій щодо впровадження ресурсозберігаючих технологій в умовах харчової промисловості України з урахуванням економічних, екологічних та функціональних аспектів.

Матеріали і методи. Проведено аналіз сучасних наукових досліджень і публікацій з використанням наукометричних баз даних: PubMed, Elsevier, Google Scholar та Scopus, для визначення актуальних тенденцій розвитку ресурсозберігаючих технологій при виробництві ферментованих напоїв на основі рослинної сировини.

Викладення основних результатів дослідження. *Тendenції ринку ферментованих рослинних напоїв.* Упродовж останніх років спостерігається стаłe зростання попиту на ферментовані рослинні напої як на світовому, так і на вітчизняному ринках. Ця тенденція зумовлена зміною харчових вподобань і пріоритетів населення, що орієнтуються на здорове харчування та зменшення молочних продуктів у раціоні через харчові алергії, непереносимість лактози чи дієти (Hidalgo-Fuentes та ін., 2024). Крім того, на зростання попиту на ферментовані напої на основі рослинної сировини вплинула низка інших факторів. Наприклад після пандемії COVID-19 значно підвищилась зацікавленість споживачів до продуктів, що потенційно мають певну фізіологічну дію. Особливу увагу привертають продукти, що мають у своєму складі пробіотичні мікроорганізми та можуть підтримувати загальний стан організму, позитивно впливати на шлункову мікробіоту, шлунково-кишковий тракт, а також мати імунomodulatory та протизапальну активність. Такі зміни споживачьких уподобань стали одними з ключових чинників активного розвитку виробництва ферментованих продуктів та напоїв, зокрема на рослинній сировині (Li та ін., 2022).

Основними видами рослинної сировини, що використовується для виробництва ферментованих напоїв є фрукти, овочі, бобові та зернові культури. Вони використовуються як альтернативні субстрати для ферментації, а готовий напій, при оптимальних умовах ферментації може мати функціональні властивості. Овочева сировина, зазвичай, використовується для виробництва напоїв з підвищеною антиоксидантною властивістю. Зернові культури є традиційною сировиною для виробництва ферментованих напоїв у нашому регіоні. Фруктова сировина є потенційно пріоритетною сировиною для виробництва ферментованих рослинних напоїв завдяки природному високому вмісту цукрів, органічних кислот і біоактивних речовин, що є сприятливим середовищем для ферментації (Deziderio, de Souza, Kamimura, & Petrus, 2023). Серед фруктові сировини яблука посідають провідне місце завдяки оптимальному вмісту вуглеводів, органічних кислот, фенольних сполук, харчових волокон і біологічно активних молекул, що забезпечує природну стабілізацію ферментаційного процесу та якість готового напою. Крім того, яблука є поширеною сировиною у всьому світі. Їх масштаби вирощування сягають більш

ніж 5 млн га, а тривалі терміни зберігання дозволяють перероблювати яблучну сировину протягом всього року (Guiné, Bartosa, Coldea, & Bartkiene, 2021).

Зважаючи на високу доступність яблучної сировини, її стабільну якість і значний вплив біоактивних компонентів, Україна має потужний потенціал для розвитку виробництва ферментованих напоїв з високою харчовою та функціональною цінністю. Однак традиційні технологічні процеси переробки рослинної сировини та виробництва напоїв характеризуються низкою проблем, серед яких високе енергоспоживання й утворення значної кількості відходів. У цьому контексті особлива увага у сфері харчової біотехнології зосереджена на оптимізації процесів ферментації рослинних напоїв, а також на впровадженні ресурсозаощаджувальних технологій на підприємствах, що дозволяють оптимізувати використання природних ресурсів, одночасно зберігаючи чи покращуючи біологічну активність та органолептичні властивості готового напою (Gotebiewska, Kalinowska, & Yildiz, 2022). Реалізація таких технологій на вітчизняних підприємствах дасть змогу підтримати їх економіку та орієнтувати виробництво на сталий розвиток, що є пріоритетним в контексті наявних екологічних проблем і перспективним для покращення конкурентоспроможності виробників.

Проблеми традиційних технологій і харчових відходів. Однією з найбільших проблем харчової промисловості є кількість утворених харчових відходів, значну частину з яких становлять рослинні відходи. У світовому масштабі такі обсяги залишків сировини сприяли загостренню існуючої проблеми харчових відходів та збільшенню обсягів викиду парникових газів. На сьогодні близько 8—10% загальних викидів парникових газів пов'язані з харчовими відходами. Це збільшує прояви глобального потепління та потребує швидкого реагування (Pal та ін., 2023). У сучасних умовах виробництва ферментованих рослинних напоїв, значна частина рослинної сировини після первинної переробки, наприклад, після виробництва соку, утворює значну частину залишків. У контексті переробки фруктових сировини такими залишками є вичавки та мезга. Зазвичай, вони містять у своєму складі велику частку харчових волокон, цукрів і біоактивних сполук, що робить «залишки» сировини перспективними для повторного використання. Валоризація таких субстратів є важливою з огляду на економічні переваги, адже з того, що на багатьох підприємствах вважається відходами виробництва та відправляється на утилізацію, можна виробляти продукти з доданою вартістю й отримувати значний прибуток (Keşa та ін., 2021). Зазвичай, такі відходи піддають компостуванню або використовують як корм для тварин, що вважається традиційним поводженням із залишками рослинної сировини. Однак це не є перспективним напрямом перероблення харчової сировини, оскільки такий підхід не дозволяє повною мірою реалізувати її харчову цінність і створює додаткове навантаження на навколишнє середовище. Зважаючи на це, валоризація залишків рослинної сировини на підприємствах харчової промисловості відповідає принципам циркуляційної економіки та є ключовим етапом для забезпечення ефективності та сталості виробництва (Gotebiewska, Kalinowska, & Yildiz, 2022). Наукові дослідження доводять можливість повторного використання залишків рослинної сировини, зокрема яблучної сировини після її первинного використання.

Технології валоризації залишків яблучної сировини. Одним із перспективних напрямків повторного використання рослинної сировини є екстракція. Наприклад,

яблучна мезга містить значну частину цінних компонентів, таких як нутрицевтики чи пектин, які можуть бути використані в харчовій чи фармацевтичній промисловості. Особливу увагу наукової спільноти привертає зелена екстракція, що збільшує вихід продукту при менших витратах і зменшених обсягах залишків (Putra та ін., 2023), тоді як традиційна екстракція пропонує мацерацію та екстракцію Сокслета, що використовується понад століття. Перевагами цього методу є постійний контакт зразка з екстрагентом і підтримка системою досить високої температури, завдяки чому фільтрація не потрібна. Недоліками методу є використання органічних розчинників через утворення токсичних залишків, що викликає занепокоєння щодо їх довгострокового впливу на навколишнє середовище (Gotebiewska, Kalinowska, & Yildiz, 2022).

Водночас зелена екстракція пропонує нові технології екстракції, серед яких мікрохвильова екстракція, субкритична водна екстракція та надкритична вуглекисла екстракція, що характеризуються високим виходом при одночасному зниженні кількості токсичних залишків. Принципи мікрохвильової екстракції ґрунтуються на прямому впливі хвиль на матеріал, створюючи цільовий нагрів з мінімальними втратами тепла в навколишнє середовище. Час екстракції становить менше ніж 30 хв, що значно скорочує час порівняно з конвенційними методами. Такий метод є перспективним для екстракції пектину, враховуючи його ефективність, нетоксичність та екологічність. Оптимальні умови для екстракції пектину: час 20,8 хв, рН 1,01, потужність мікрохвиль 499,4 Вт. Ультразвукова екстракція пропонує використання невеликої кількості розчинника, скорочує час екстракції та збільшує вихід екстракту. Такий метод екстракції є значно ефективнішим (на 30%) та в декілька разів швидшим за традиційний метод Сокслета. Таким чином, ці методи екстракції демонструють значний потенціал для отримання пектину чи поліфенолів із залишків яблучної сировини, оскільки вони є безпечними, швидшими й ефективнішими порівняно з традиційними методами. І хоч зелена екстракція є екологічною альтернативою традиційним методам, а також демонструє значний потенціал та ефективність у лабораторних масштабах, на сьогодні нерозв'язаною проблемою залишається її впровадження у промислових масштабах через проблеми з масштабуванням, автоматизацією та дискусіями щодо економічної доцільності (Putra та ін., 2023).

Іншою технологією для підвищення цінності побічних продуктів переробки фруктових сировин є *біоконверсія*, в результаті якої отримують біопаливо. Для яблучних вичавок це є одним з найперспективніших шляхів валоризації сировини, зважаючи на її вуглеводневий склад. З біомаси можна отримати біопаливо або його проміжні продукти. За допомогою біохімічних, механічних і термохімічних процесів можна отримати біоетанол, біогаз, біометан чи біовугілля з виходом енергії 10—30 Вт/м³ (Thomas, Abebe, Emenike, & Martynenko, 2025). Крім того, було запропоноване використання сушених яблучних вичавок як твердого біопалива для прямого спалювання (Tulej, & Gtowacki, 2022). Виробництво біоетанолу другого покоління з відходів, таких як яблучні вичавки, є важливим в соціально-економічному й екологічному контекстах. Окремим перспективним напрямом є каскадне використання рослинних відходів, що дозволяє одночасно знизити кількість відходів і енергоспоживання виробництва. В такій схемі перероблювання основним про-

дуктом є біоетанол, а побічним продуктом — винаса, тобто залишок після ферментації цукровмісних субстратів. У подальшому його можна використовувати як органічне добриво, корм для тварин або ж для подальшої валоризації. Так, винасу можна піддати анаеробному зброджуванню з отриманням біогазу, що можна інтегрувати у виробництво для зменшення його енергетичних потреб. Згідно з оцінкою екологічної доцільності спільне виробництво біоетанолу та біогазу з яблучних вичавок є найбільш ефективним і доцільним. Вуглецевий слід такого виробництва становить $1,13 \text{ кг CO}_2 \text{ екв} \cdot \text{кг}^{-1}$, що на 70% менше, ніж при виробництві біоетанолу та подальшому використанні винаси як органічного добрива з вуглецевим слідом $4,09 \text{ кг CO}_2 \text{ екв} \cdot \text{кг}^{-1}$. З огляду на це впровадження таких технологій у промислових масштабах в умовах сучасного виробництва є ефективним і перспективним, попри першочергові високі інвестиційні витрати (Rebolledo-Leiva та ін., 2024).

Рослинні відходи можуть мати значний потенціал і в інших промислових секторах. Їх можна використовувати навіть при виробництві посуду. Було продемонстроване виробництво стійких біополімерів з використанням яблучних вичавок. Такі біополімери є екологічно безпечними та можуть мати широкий спектр застосування. Одним із прикладів застосування біопластику, отриманого таким способом, було виготовлення чашок. Найкращі механічні властивості були досягнуті при змішуванні суміші яблучних вичавок з 30% (мас./мас.) вмістом гліцерину на етапі виготовлення біополімеру. Такі біополімери можуть бути використані для виробництва екологічно чистого одноразового посуду чи в інших сферах промислового сектору (Gotebiewska, Kalinowska, & Yildiz, 2022).

Однак, попри значні екологічні переваги, попередньо описані методи на сьогодні мають певні труднощі в реалізації у сучасних умовах промисловості. Основним питанням, що викликає жваві обговорення, є економічна доцільність їх впровадження (Rebolledo-Leiva та ін., 2024). У зв'язку з цим перспективним напрямом використання рослинних відходів залишається виробництво кормових добавок (Thomas, Abebe, Emenike, & Martynenko, 2025). Яблучна мезга, що залишається після переробки яблук, є цінною вторинною сировиною для їх виробництва. Вона покращує травлення тварин та має гарну поживну цінність (Neshovska, 2024). Збагачення раціону тварин такими кормовими добавками підвищує засвоєння поживних речовин, сприяє росту, продуктивності тварин і позитивно впливає на стан і здоров'я тварин, а також на їх стресостійкість (Aghili, Toghyani, & Tabeidian, 2019).

Для використання яблучної мезги при виробництві кормових добавок її першочергово обробляють. Це необхідно для забезпечення мікробної безпеки та довготривалого зберігання. Серед методів хімічного зберігання доступним та економічним є використання оцтової кислоти. Застосування 0,8 М оцтової кислоти, що еквівалентно концентрації комерційного оцту, може забезпечити стабільне зберігання яблучних вичавок щонайменше на 14 діб, знижуючи концентрацію мікробних колонієутворюючих одиниць і запобігаючи ферментації. Це не погіршує якість кормових добавок, а залишкова оцтова кислота потенційно може мати позитивний вплив на жуйних тварин. Такий метод має гарні економічні результати, через що може широко використовуватись в промислових масштабах для короткочасного зберігання чи транспортування кормових добавок (Harratt та ін., 2025).

Отже, технології використання залишків рослинної сировини демонструють широкий потенціал комплексної переробки в різних сферах. Водночас останні дослідження свідчать, що ще одним перспективним напрямом є харчова промисловість, де ця сировина є гарним субстратом для виробництва ферментованих функціональних напоїв, або функціональним інгредієнтом чи добавкою. Завдяки високому вмісту харчових волокон, пектину та поліфенолів яблучну мезгу застосовують у технології екструзії. Наприклад, шляхом екструзії пектину з яблучних вичавок можна отримати гелеутворювач, що надалі застосовується у виробництві варення чи желе. Крім того, яблучні вичавки мають великий потенціал як функціональний компонент при виробництві екструдованих харчових продуктах, таких як батончики чи сухі сніданки. Його додавання збагачує продукт харчовими волокнами, антиоксидантами, а також покращує вологоутримувальну здатність, розпушувальність і засвоюваність (Thomas, Abebe, Emenike, & Martynenko, 2025).

З огляду на значні обсяги залишків рослинної сировини, зокрема і яблучної мезги, в результаті обробки рослинної сировини для виробництва ферментованих рослинних напоїв, перспективним і закономірним є їх подальше використання при виробництві інших ферментованих напоїв, для підвищення їх функціональної цінності. Наприклад, додавання яблучних вичавок до яблучного соку перед початком ферментації сидру дозволяє підвищити вміст фенольних сполук у готовому напої на 30—60%, покращуючи антиоксидантні властивості напою. Крім того, є потенціал додавання яблучних вичавок під час ферментації для покращення сенсорного профілю напою, залежно від мети. Такі ферментовані напої мають унікальний смак та аромат, а також додаткову користь для здоров'я (Castro, Affonso, & Perry, 2025).

Виклики, обмеження та перспективи. На жаль, попри численні перспективи та досліджені технології валоризації залишків рослинної сировини, на практиці масштабне впровадження ресурсозберігаючих технологій, направлених на зменшення кількості використання природних ресурсів і покращення екологічного стану довкілля, стикається з рядом труднощів. Основними з них є економічні виклики, через які значна частина компаній не розглядають такі технології. Зазвичай, впровадження таких технологій передбачає великі капітальні й операційні витрати, що робить технологію переробки нерентабельною (Rebolledo-Leiva та ін., 2024). По-друге, виникає ряд технічних проблем, які потребують вирішення для ефективної вторинної переробки рослинної сировини. Серед них: висока вологість сировини, складність її стандартизації, транспортування та зберігання. А великі масштаби її виробництва потребують дуже швидкої обробки для запобігання її гниття чи зброджування (Sobczak, Nadulski, Kobus, & Zawislak, 2022).

З огляду на ці виклики перспективою подальших досліджень є оптимізація процесів валоризації залишків рослинної сировини з метою підвищення економічної доцільності процесу. Для цього слід зосередити увагу на удосконаленнях існуючих технологій, розробці нових процесів, а також на пошуку додаткових побічних продуктів, що можна отримати під час переробки сировини для підвищення економічної вигоди та збільшення зацікавленості компаній. Крім того, державні кампанії та державна підтримка могли б значно прискорити впровадження ресурсозберігаючих технологій на підприємствах.

Іншим перспективним напрямком є дослідження та розробка нових ферментованих напоїв і снеків з використанням яблучних вичавок для покращення органолептичних та функціональних властивостей продукту.

Таблиця. Приклади валоризації яблучних відходів (мезги та вичавок)

Напрямок валоризації	Конкретний продукт	Технологія	Ефект/вихід	Джерело
Харчова промисловість	Ферментований сидр з підвищеним вмістом антиоксидантів	Додавання вичавок до яблучного соку перед ферментацією	+30—60% фенольних сполук; покращений смак/аромат	Castro et al., 2025
	Екструдовані снеки (батончики, сухі сніданки)	Екструзія з додаванням мезги	+ харчові волокна, антиоксиданти; краща вологостримувальна здатність	Thomas et al., 2025
	Гелеутворювач (для варення/желе)	Екструзія пектину з вичавок	Висока гелеутворювальна здатність	Thomas et al., 2025
Екстракція біоактивних речовин	Пектин (харчовий/фармацевтичний)	Мікрохвильова екстракція: 20,8 хв, pH 1,01, 499,4 Вт	+20% вихід (порівняно з традиційною)	Putra et al., 2023; оригінальний аналіз
	Поліфеноли/антиоксиданти	Ультразвукова екстракція	+30% ефективність vs Сокслет; час ↓ у 3—5 разів	Putra et al., 2023
Біоенергетика	Біоетанол + біогаз (каскад)	1) ферментація → біоетанол; 2) анаеробне зброджування винаси → біогаз	Вуглецевий слід: 1,13 кг CO ₂ ·кг ⁻¹ (–70% vs традиційна утилізація)	Rebolledo-Leiva et al., 2024
	Тверде біопаливо	Сушіння вичавок + спалювання	Енергія: 10—30 Вт/м ³	Tulej, & Gtowacki, 2022
Біоматеріали	Біопластик (чашки, посуд)	Змішування з 30% гліцерину → пресування	Висока механічна міцність; 100% біорозкладний	Gotebiewska et al., 2022
Тваринництво	Кормова добавка	Обробка 0,8 М оцтовою кислотою → зберігання 14 діб	Покращення травлення, стресостійкості, продуктивності	Harratt et al., 2025; Neshovska, 2024

Висновки

Проведений аналіз сучасних тенденцій виробництва ферментованих рослинних напоїв на основі яблучної сировини свідчить про значний потенціал цієї галузі для задоволення зростаючого попиту на функціональні продукти, орієнтовані на здорове харчування. Яблука, як доступна сировина з оптимальним хімічним складом (вуглеводи, фенольні сполуки, харчові волокна), забезпечують стабільність ферментаційного процесу та високу біологічну цінність напоїв, що робить їх конкурентоспроможними на глобальному ринку. В Україні цей потенціал посилюється

великими обсягами виробництва яблук, що дозволяє розвивати стале виробництво з урахуванням локальних ресурсів.

Ключовою проблемою традиційних технологій є утворення значної кількості відходів (мезги та вичавок), які становлять 8—10% глобальних викидів парникових газів і призводять до економічних втрат. Валоризація цих субстратів через інноваційні методи — зелену екстракцію (мікрохвильову, ультразвукову), біоконверсію для біопалива (біоетанол, біогаз з вуглецевим слідом $1,13 \text{ кг CO}_2 \text{ екв} \cdot \text{кг}^{-1}$), виробництво біополімерів, кормових добавок і харчових інгредієнтів, дає змогу перетворювати відходи на продукти з доданою вартістю, відповідаючи принципам циркулярної економіки.

Впровадження ресурсозберігаючих підходів сприяє зменшенню екологічного навантаження, енергоспоживання та підвищення конкурентоспроможності підприємств, особливо в контексті постпандемійних змін споживацьких уподобань. Однак обмеженнями є економічна недоцільність (високі інвестиції), технічні бар'єри (вологість сировини, стандартизація) та проблеми масштабування, що вимагають подальшої оптимізації.

Перспективи досліджень полягають у розробці інтегрованих технологій каскадної переробки, державній підтримці впровадження інновацій та створенні нових продуктів (наприклад, ферментованих напоїв з додаванням вичавок для підвищення антиоксидантної активності на 30—60%). Це дасть змогу забезпечити сталий розвиток харчової промисловості України та внести вклад у глобальні зусилля зі зменшення харчових відходів.

Література

- Aghili, A., Toghyani, M., & Tabeidian, S. A. (2019). Effect of incremental levels of apple pomace and multi enzyme on performance, immune response, gut development and blood biochemical parameters of broiler chickens. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8(1), 321—334. <https://doi.org/10.1007/s40093-019-00305-8>.
- Castro, L. F., Affonso, A. D., & Perry, K. P. (2025). Effect of Apple Pomace Addition During Fermentation on the Phenolic Content, Chemical Composition, and Sensory Properties of Cider. *Beverages*, 11(4), 95. <https://doi.org/10.3390/beverages11040095>.
- Calugar, P. C., Coldea, T. E., Salanță, L. C., Pop, C. R., Pasqualone, A., Burja-Udrea ..., Mudura, E. (2021). An Overview of the Factors Influencing Apple Cider Sensory and Microbial Quality from Raw Materials to Emerging Processing Technologies. *Processes*, 9(3), 502. <https://doi.org/10.3390/pr9030502>.
- Cela, N., & Bertolino, M. (2025). Sustainable brewing: Valorization of apple pomace and its impact on beer quality and consumers' acceptability. *Future Foods*. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100450>.
- Ciftci, D., Genc, S., & Genc, Y. (2025). Evaluation of energy and exergy analysis of apple juice production and waste valorization processes. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1594745>.
- Deziderio, M. A., de Souza, H. F., Kamimura, E. S., & Petrus, R. R. (2023). Plant-based fermented beverages: Development and characterization. *Foods*, 12(22), 4128. <https://doi.org/10.3390/foods12224128>.
- Gotebiewska, E., Kalinowska, M., & Yildiz, G. (2022). Sustainable use of apple pomace (AP) in different industrial sectors. *Materials*, 15(5), 1788. <https://doi.org/10.3390/ma15051788>.
- Guiné, R. P. F., Barroca, M. J., Coldea, T., & Bartkiene, E. (2021). Apple fermented products: An overview of technology, properties and health effects. *Processes*, 9(2), 223. <https://doi.org/10.3390/pr9020223>.

Harratt, A., Wu, W., Strube, P., Ceravolo Jr., J., Beattie, D., Pukala, T., ..., Blencowe, A. (2025). Comparison of Preservatives for the Prevention of Microbial Spoilage of Apple Pomace During Storage. *Foods*, 14(14), 2438. <https://doi.org/10.3390/foods14142438>.

Hidalgo-Fuentes, B., de Jesús-José, E., Cabrera-Hidalgo, A. d. J., Sandoval-Castilla, O., Espinosa-Solares, T., González-Reza, R. M., ..., Aguilar-Toalá, J. E. (2024). Plant-Based Fermented Beverages: Nutritional Composition, Sensory Properties, and Health Benefits. *Foods*, 13(6), 844. <https://doi.org/10.3390/foods13060844>.

Keşa, A-L., Pop, C. R., Mudura, E., Salanță, L., Pasqualone, A., Dărab, C., ..., Coldea, T. E. (2021). Strategies to Improve the Potential Functionality of Fruit-Based Fermented Beverages. *Plants*. 10(11): 2263. <https://doi.org/10.3390/plants10112263>.

Li, Q., Li, N., Cai, W., Xiao, M., Liu, B., & Zeng, F. (2022). Fermented natural product targeting gut microbiota regulate immunity and anti-inflammatory activity: A possible way to prevent COVID-19 in daily diet. *Journal of Functional Foods*, 97, 105229. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105229>.

Neshovska, H. (2024). Determination of the chemical and mineral composition of apple pomace in relation to its utilisation as an innovative feed raw material. *Tradition and Modernity in Veterinary Medicine*, 9(1[16]), 72—80.

Pal, P., Singh, A. K., Srivastava, R. K., Rathore, S. S., Sahoo, U. K., Subudhi, S., ..., Prus, P. (2024). Circular Bioeconomy in Action: Transforming Food Wastes into Renewable Food Resources. *Foods*, 13(18), 3007. <https://doi.org/10.3390/foods13183007>.

Putra, N. R., Rizkiyah, D. N., Abdul Aziz, A. H., Che Yunus, M. A., Veza, I., Harny, I., & Tirta, A. (2023). Waste to Wealth of Apple Pomace Valorization by Past and Current Extraction Processes: A Review. *Sustainability*, 15(1), 830. <https://doi.org/10.3390/su15010830>.

Rebolledo-Leiva, R., Estévez, S., Hernández, D., Feijoo, G., Moreira, M. T., & González-García, S. (2024). Apple pomace integrated biorefinery for biofuels production: A techno-economic and environmental sustainability analysis. *Resources*, 13(11), 156. <https://doi.org/10.3390/resources13110156>.

Selmi, H., Presutto, E., Totaro, M., Spano, G., Capozzi, V., & Fragasso, M. (2025). Apple waste/by-products and microbial resources to promote the design of added-value foods: A review. *Foods*, 14(10), 1450.

Sobczak, P., Nadulski, R., Kobus, Z., & Zawislak, K. (2022). Technology for apple pomace utilization within a sustainable development policy framework. *Sustainability*, 14(9), 5470. <https://doi.org/10.3390/su14095470>.

Thomas, F., Abebe, G., Emenike, C., & Martynenko, A. (2025). Sustainable utilization of apple pomace: Technological aspects and emerging applications. *Food Research International*, 220, 117149. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.117149>.

Tulej, W., & Gtowacki, S. (2022). Modeling of the drying process of apple pomace. *Applied Sciences*, 12(3), 1434. <https://doi.org/10.3390/app12031434>.

MODELLING OF PHASE EQUILIBRIUM IN THE ETHYL ALCOHOL-WATER SYSTEM FOR OPTIMISING THE OPERATION OF DISTILLATION EQUIPMENTYu. Bulii, <https://orcid.org/0000-0002-1905-3706>

National University of Food Technologies

Key words:

Phase equilibrium
Rectification column
Plates
Ethyl alcohol
Controlled cycles

Article history:

Received 03.11.2025
Received in revised form
17.11.2025
Accepted 04.12.2025

Corresponding author:

Yu. Bulii
E-mail:
yvbulyi@gmail.com

Citation: Булій Ю. В. (2025). Моделювання фазової рівноваги в системі етиловий спирт—вода для оптимізації роботи брагоректифікаційних установок. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 88—98.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-8

ABSTRACT

The design and implementation of highly efficient energy-saving distillation units requires a sufficient amount of reliable data on phase equilibrium in the ethyl alcohol-water system. There was not found experimental data on phase equilibrium in the pressure range from 103 to 50.6 kPa in scientific articles. Of particular interest are data on phase equilibrium in the ethanol—water system in the low ethyl alcohol concentration zone (less than 3.0 mol. %), where the lower parts of the distillation and rectification columns operate. The existing data is contradictory and requires thorough verification and supplementation.

There was developed the devise design of which made it possible to increase the accuracy of results and reduce the time required to achieve phase equilibrium to 30—40 min. Experimental data on phase equilibrium in the above pressure range were obtained and modelled to optimize the operation of the distillation unit. The Tsuboko-Katayama equation was used as the modelling equation. Thermodynamic verification of the results showed a satisfactory degree of agreement between the calculated and experimental data. Phase equilibrium curves were constructed, the dependence of ethyl alcohol evaporation coefficients on pressure was established, and the inversion of equilibrium curves was determined.

Methods for mass exchange between liquid and vapour in controlled cycles mode of liquid delay and overflow have been developed, as well as designs of column apparatus to implement them. The hydrodynamic operating modes of the plates in cyclic mode were established. It has been experimentally proven that increasing the contact time between phases on the plates to 30—60 seconds significantly improved the efficiency of the plates and reduced steam consumption by 40%. When designing distillation and alcohol columns operating under vacuum, it is necessary to take into account the instantaneous decrease in ethanol evaporation coefficients in the concentration range below 1.2—1.4 mol. %.

МОДЕЛЮВАННЯ ФАЗОВОЇ РІВНОВАГИ В СИСТЕМІ ЕТИЛОВИЙ СПИРТ—ВОДА ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ БРАГОРЕКТИФІКАЦІЙНИХ УСТАНОВОК

Ю. В. Булій, <https://orcid.org/0000-0002-1905-3706>

Національний університет харчових технологій

Проектування і впровадження високоефективних енергозберігаючих брагоректифікаційних установок потребує достатньої кількості достовірних даних щодо фазової рівноваги в системі етиловий спирт—вода. В літературних джерелах відсутні експериментальні дані щодо фазової рівноваги в діапазоні значень тиску від 103 до 50,6 кПа. Особливий інтерес представляють дані щодо фазової рівноваги в системі етанол—вода в зоні низьких концентрацій етилового спирту — менше 3,0 мол. %, в яких працюють нижні частини бражних і ректифікаційних колон. Існуючі дані суперечливі і потребують ретельної перевірки та доповнення.

Для проведення досліджень був розроблений прилад, конструкція якого дала змогу підвищити точність результатів і скоротити час досягнення рівноважного стану між рідиною і парою до 30—40 хв. Отримані експериментальні дані щодо фазової рівноваги у вищевказаному діапазоні тиску і проведено її моделювання для оптимізації роботи брагоректифікаційної установки. Як моделююче рівняння використано рівняння Цубоко-Катаями. Термодинамічна перевірка результатів показала задовільний ступінь узгодженості розрахункових і експериментальних даних. Побудовані криві фазової рівноваги, встановлена залежність коефіцієнтів випаровування етилового спирту від тиску, визначена інверсія кривих рівноваги.

Розроблені способи масообміну між рідиною і парою в режимі контрольованих циклів затримки і переливу рідини та конструкції масообмінних апаратів для їх реалізації. Встановлені гідродинамічні режими роботи тарілок в циклічному режимі. Експериментально доведено, що подовження часу контакту фаз на тарілках до 30—60 с дає змогу наблизитись до рівноважного стану фаз і скоротити витрати гріючої пари на 40%. При проектуванні бражних і спиртових колон, що працюють під розрідженням, необхідно враховувати миттєве зменшення коефіцієнтів випаровування етанолу в зоні концентрацій, нижчих від 1,2—1,4% мол.

Ключові слова: фазова рівновага, ректифікаційна колона, тарілки, етиловий спирт, контрольовані цикли.

Постановка проблеми. Технічний прогрес у спиртовій промисловості нерозривно пов'язаний з розробкою і впровадженням високоефективних енергозберігаючих брагоректифікаційних установок (БРУ) (Українець, Шиян, & Сосницький, 2006). Розділення багатокомпонентних сумішей відбувається шляхом ступінчастого контакту пари та рідини на тарілках колон. Тарілки виготовляють різної конструкції: зі зливними пристроями (ковпачкові, сітчасті, клапанні, односпрямовані), без зливних пристроїв або провальні (гратчасті, трубчасті, клапанні), інжекційні, насадкові, плівкові, розпилювальні, пристрої із зовнішнім введенням енергії

тощо. Коефіцієнт їх корисної дії (ККД) залежить від конструкції, діаметра і вільного перерізу колони, її завантаження, міжтарілкової відстані, швидкості пари, фізичних властивостей суміші, яка підлягає розділенню тощо (Маринченко та ін., 2003; Марценюк, Малежик, & Зоткіна, 2019).

Зусилля дослідників спрямовані на удосконалення конструкції тарілок з метою забезпечення найбільш інтенсивного контакту пари та рідини, ефективність якого визначають за ступенем досягнення фазової рівноваги. Технологічні розрахунки бражної і ректифікаційної колон припускають миттєве перенесення летких компонентів пари та рідини, не враховуючи інтервал контакту фаз або часу перебування рідини на тарілках. Існує межа, нижче якої час контакту рідини та пари недостатній для досягнення фазової рівноваги, тому ККД відомих типів тарілок не перевищують 0,4—0,6 (Цыганков, 2010; Українець, Шиян, & Сизько, 2010).

Проектування і впровадження високоефективних енергозберігаючих брагоректифікаційних установок, що працюють за атмосферного тиску та під розрідженням, потребує достатньої кількості достовірних даних щодо фазової рівноваги в системі етиловий спирт—вода.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню фазової рівноваги між рідиною та парою присвячені праці відомих вітчизняних і зарубіжних дослідників: В. М. Стабнікова, Т. Б. Процюк, Н. М. Юценка, В. Б. Когана, В. М. Фрідмана, В. В. Кафарова, Б. Д. Метюшева, С. Уейлеса, Е. Хала та ін. (Шиян, Сосницький, & Олійнічук, 2009; Kang та ін., 2010). Результати їх роботи не втратили актуальності і в теперішній час. Методи розрахунку фазової рівноваги пройшли тривалий шлях розвитку від графічних і математичних до аналітичних, що базуються на сучасних теоріях розчинів. Для моделювання фазової рівноваги останнім часом використовують моделі розчинів, відомі під назвою групових (Cristino та ін., 2013). Як найбільш вдалі слід відзначити моделі UNIFAC, UNIQUAC, SUPERFAC, DISQUAC (Пупена, 2007; Farajnezhad, Afshar, Khansary, Shirazian, & Ghadiri, 2016).

Відомо, що фазова рівновага в системі етанол—вода за атмосферного тиску добре вивчена, але ця залежність недостатньо вивчена для тиску, нижчого за атмосферний в діапазоні значень від 103 до 50,6 кПа (Guevara, Guevara, & Belalcázar, 2018). Особливий інтерес представляють дані щодо фазової рівноваги в зоні низьких концентрацій етилового спирту — менше 3,0 мол. %, в яких працюють нижні частини бражних і ректифікаційних колон. Існуючі дані суперечливі і потребують ретельної перевірки та доповнення (Jin Zhao та ін., 2006; Liaposhchenko та ін., 2021). Крім того, для теорії і практики ректифікації важливо знати область інверсії кривої фазової рівноваги за тиску, нижчого за атмосферний, щодо аналогічної кривої за атмосферного тиску. Результати різних авторів не збігаються через недосконалість експериментальних установок і обраних методів досліджень. Наявність достовірних даних щодо фазової рівноваги дасть змогу більш обґрунтовано вирішити питання розподілу тиску між колонами в БРУ.

Дотепер для досліджень використовували прилади циркуляційного типу Отмера, Свентославського, Бушмакіна та їх модифікації, які мають ряд суттєвих недоліків: слабе перемішування рідини, наявність бризковиносу, подовжена у часі тривалість досягнення фазової рівноваги, конденсація пари на внутрішній поверхні приладів (ефект дефлегмації) тощо (Булій, 2024).

Мета дослідження: аналіз фазової рівноваги між рідиною і парою в системі етиловий спирт—вода в діапазоні значень тиску від 103 до 50,6 кПа в зоні низьких концентрацій спирту у розчинах; вибір методів термодинамічної перевірки і обробки експериментальних даних для контролю їх достовірності; оптимізація роботи БРУ шляхом досягнення наближеного до рівноважного стану фаз на тарілках; дослідження ефективності роботи ректифікаційної колони циклічної дії в процесі розгонки спиртовмісних фракцій у виробничих умовах.

Матеріали і методи. Для дослідження використовували прилад, розроблений співробітниками КТІХП (нині НУХТ), конструкція якого дозволяла виключити недоліки, притаманні відомим моделям (А. с. 1226229 ССРСР. Устройство для исследования фазовых равновесий жидкость—пар). Його основною особливістю було те, що прилад приєднувався до системи регулювання тиску, а стабілізація температури внутрішньої поверхні здійснювалась не паром, а стікаючою плівкою рідини, яка знаходилась у рівновазі з паром (рис. 1).

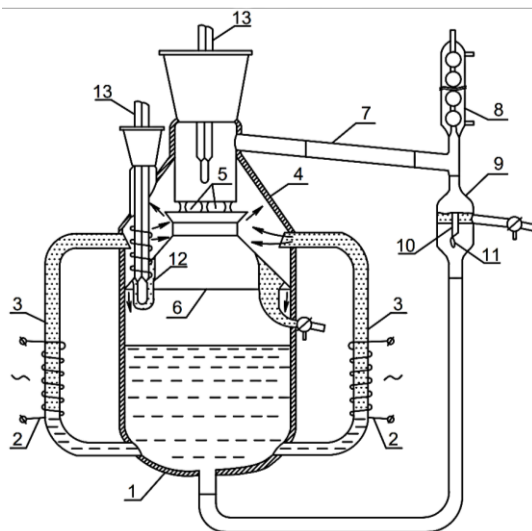


Рис. 1. Прилад для дослідження фазової рівноваги: 1 — термостійка колба; 2 — електрична спіраль; 3 — циркуляційні труби; 4 — кільцевий відбійник; 5 — отвори; 6 — зонт; 7 — відвідна трубка; 8 — холодильник; 9 — збірник конденсату; 10 — лічильник крапель; 11 — краплі конденсату; 12 — термометрична кишеня; 13 — термометри

Таке технічне рішення забезпечувало рівномірне кипіння водно-спиртової рідини, усувало її випаровування, запобігало коливанню тиску і температури і дозволяло досягати фазової рівноваги протягом 30—40 хв. Схема включення приладу в роботу показана на рис. 2.

Методи досліджень — аналітичні, фізико-хімічні, хроматографічні та розрахункові, що застосовуються у виробництві ректифікованого етилового спирту.

Концентрацію етилового спирту у водно—спиртових розчинах визначали стандартними ареометричним, пікнометричним, флотаційним, біхроматно-йодометричним і колориметричним методами (Янчевський, Ковальчук, Кравчук, Попова, & Олійник, 1999; Янчевский, Олийничук, Кравчук, Ковальчук, & Михайло, 2002).

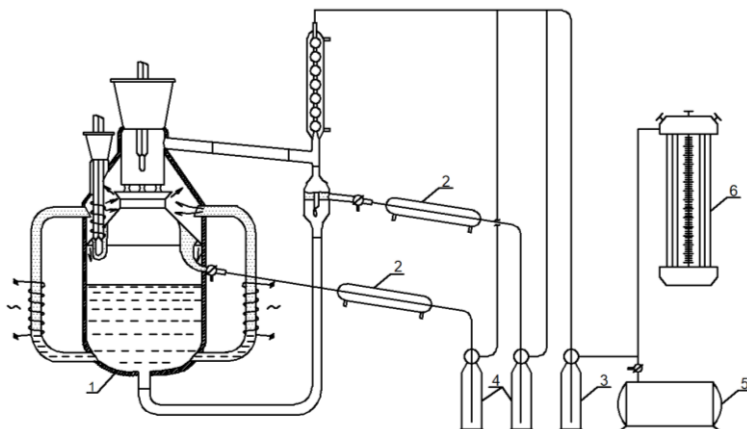


Рис. 2. Установка для дослідження фазової рівноваги в системі етанол—вода за тиску, нижчого за атмосферний: 1 — ебуліометр; 2 — холодильник проб; 3 — вловлювач крапель; 4 — пробовідбірники; 5 — вакуум-насос; 6 — диференційний манометр. Концентрацію летких домішок спирту (естерів, альдегідів, вищих спиртів сивушної олії і метанолу) визначали на газовому хроматографі з колонкою HP FFAP 50 м×0,32 м (Plutowska, & Wardenski, 2008; Steven, & Lehotay, 2002; Dewulf, 2002).

Виклад основних результатів досліджень. Достовірність результатів досліджень значною мірою залежить від обраної методики визначення концентрації спирту в розчинах. Встановлено, що вибір методу аналізу залежить від концентрації водно-спиртового розчину. Так, у зоні низьких концентрацій (до 0,5 мас. %) доцільно використовувати колориметричний метод, в інтервалі концентрацій від 0,5 до 3 мас. % — біхроматно-йодометричний, в інтервалі від 3 до 35 мас. % — рефрактометричний, а в зоні більш високих концентрацій — пікнометричний методи. Відносна похибка досліджень не перевищувала 0,5%.

У процесі досліджень температуру пари і рідини визначали термометрами з ціною поділки 0,1 °С, тиск вимірювали з точністю до 0,133 кПа. Були досліджені водно-спиртові розчини концентрацією 0,006—88,1 мол. % з кроком 0,02—0,1 мол. % в зоні концентрацій дослідних розчинів від 0 до 3,0 мол. % і з кроком 2,0 мол. % в зоні більш високих концентрацій. Значення тиску змінювали в діапазоні 99,21—15,27 кПа з середнім кроком 13,33 кПа.

Головним завданням контролю достовірності отриманих результатів був вибір методів термодинамічної перевірки й обробки експериментальних даних. Для цього використовують методи Вільсона, Маргулеса, Редліха-Кістера, Ренона-Празуниці та ін. (Privat, Jaubert, & Kontogeorgis, 2024). За результатами досліджень проводилось моделювання фазової рівноваги для значень тиску в обраному діапазоні. Як моделююче рівняння використовували найбільш просте із числа вдалих варіантів модифікації рівняння Вільсона — рівняння Цубоко-Катаями, яке було вихідним для розрахунку коефіцієнтів активності компонентів бінарної системи j_1 і j_2 і концентрації етанолу в парі в умовах рівноважного стану фаз. Це рівняння надає можливість визначати ступінь узгодженості D експериментальних і розрахункових даних. Рівняння має такий вигляд:

$$\ln j = \ln \frac{X_1 + V_2 X_2 / V_1}{X_1 + \lambda_{1,2} X_2} + (\beta - \beta_v) X_2; \quad (1)$$

$$\ln j = \ln \frac{X_2 + V_1 X_1 / V_2}{X_2 + \lambda_{2,1} X_1} + (\beta - \beta_v) X_1, \quad (2)$$

де V_1, V_2 — молярні об'єми спирту і води; X_1, X_2 — молярні долі компонентів спирту і води; $\lambda_{1,2}, \lambda_{2,1}$ — параметри бінарної взаємодії компонентів; β, β_v — змінні величини.

$$\beta_v = \frac{V_2/V_1}{X_1 + V_2 X_2 / V_1} - \frac{V_1/V_2}{X_1 V_1 / V_2 + X_2}; \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\lambda_{1,2}}{X_1 + \lambda_{1,2} X_2} - \frac{\lambda_{2,1}}{\lambda_{2,1} X_1 + X_2}; \quad (4)$$

$$V_{1,2} = V_2/V_1; \quad V_{2,1} = V_1/V_2. \quad (5)$$

Міжмолекулярна взаємодія компонентів суміші залежить передусім від локальних концентрацій a_{ij} , виражених в об'ємних долях. Ці концентрації входять у ймовірні члени енергетичного розподілу Больцмана:

$$\frac{P_{1,1}}{P_{2,1}} = \frac{X_1 \exp\left(-\frac{a_{1,1}}{RT}\right)}{X_2 \exp\left(-\frac{a_{2,1}}{RT}\right)}; \quad \frac{P_{1,2}}{P_{2,2}} = \frac{X_1 \exp(-a_{1,2}/RT)}{X_2 \exp(-a_{2,2}/RT)}, \quad (6)$$

де $P_{1,1}$ — імовірність знаходження молекул типу 1 поблизу одне одного; $P_{2,2}$ — імовірність знаходження молекул типу 2 поблизу одне одного; $P_{1,2}$ — імовірність знаходження молекул типу 1 і 2 поблизу одне одного.

Об'ємні долі спирту Z_1 і води Z_2 , виражені через цю імовірність, дорівнюють:

$$Z_1 = \frac{P_{1,1} V_1}{P_{1,1} V_1 + P_{2,1} V_2} = \frac{1}{1 + \frac{X_2 V_2}{X_1 V_1} \exp[-(a_{2,1} - a_{1,1})/RT]} = \frac{X_1}{X_1 + \lambda_{1,2} X_2}; \quad (7)$$

$$Z_2 = \frac{1}{1 + \frac{X_1 V_1}{X_2 V_2} \exp[-(a_{1,2} - a_{2,2})/RT]} = \frac{X_2}{\lambda_{2,1} X_1 + X_2}. \quad (8)$$

Звідки:

$$\lambda_{1,2} = \frac{V_2}{V_1} \exp[-(a_{2,1} - a_{1,1})/RT] = \frac{V_2}{V_1}; \quad (9)$$

$$\lambda_{2,1} = \frac{V_1}{V_2} \exp[-(a_{1,2} - a_{2,2})/RT] = \frac{V_1}{V_2} \exp\left(-\frac{\lambda_{2,1}}{RT}\right). \quad (10)$$

Отримані параметри рівняння Цубоко-Катаями дають досить задовільні апроксимації для аналізу процесів, в яких можливе встановлення фазової рівноваги. Параметри рівняння розраховували методом нелінійних регресій (Miller, & James, 2016). Оскільки $\lambda_{1,2}$ і $\lambda_{2,1}$ незалежні від температури (тиску) як мінімум до першої апроксимації, а тиск під час досліджень змінювався в порівняно вузьких межах (99,21—15,27 кПа), розрахункові параметри для етилового спирту і води були сталими для всіх значень тиску: $\lambda_{1,2} = 416,045$ і $\lambda_{2,1} = 184,058$. Ці значення використовували для моделювання фазової рівноваги. Метод Цубоко-Катаями дав змогу визначити ступінь узгодженості D шляхом розв'язання інтеграла Редліха-Кістера:

$$D = \frac{\int_0^1 \ln dX_1}{\int_0^x \ln \frac{j_1}{j_2} dX_1 + \int_x^1 \ln \frac{j_1}{j_2} dX_1} \leq 0,02. \quad (11)$$

Результати розрахунку підтвердили задовільний ступінь узгодженості експериментальних і розрахункових даних. На їх основі були побудовані графічні залежності, наведені нижче.

На рис. 3 показано криві фазової рівноваги системи етанол—вода за тиску P , нижчого за атмосферний, в зоні концентрацій 0—3,0% мол.

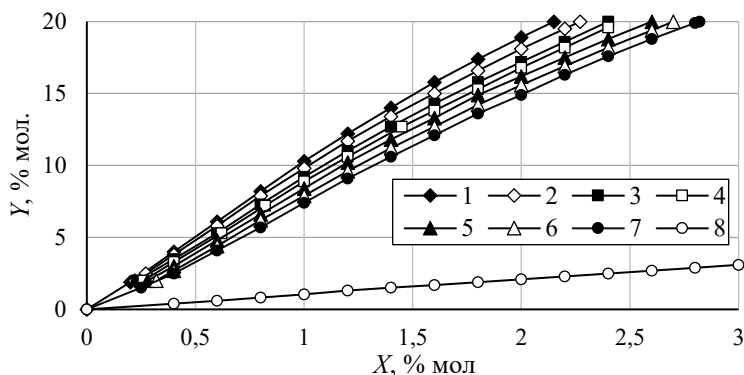


Рис. 3. Криві фазової рівноваги системи етанол-вода за тиску P , кПа: 1 — 99,21; 2 — 85,74; 3 — 71,37; 4 — 57,27; 5 — 43,43; 6 — 29,33; 7 — 15,23

Із представлених графіків видно, що зі зменшенням тиску леткість етилового спирту в цій зоні суттєво зменшується і досягає мінімальної величини при концентрації етанолу, близької до нуля.

На рис. 4 показано зміну коефіцієнтів випаровування етанолу K залежно від тиску P при концентрації етанолу, нижчій за 3,0% мол. Із представлених графіків видно, що при концентрації етанолу, нижчій за 1,2—1,4 мол. %, коефіцієнт K зменшується, причому тим швидше, чим нижчий залишковий тиск у системі. Так, при зменшенні тиску від 99,21 до 15,23 кПа і концентрації етанолу 0,006 мол. % коефіцієнт випаровування зменшується від 10,5 до 3,9.

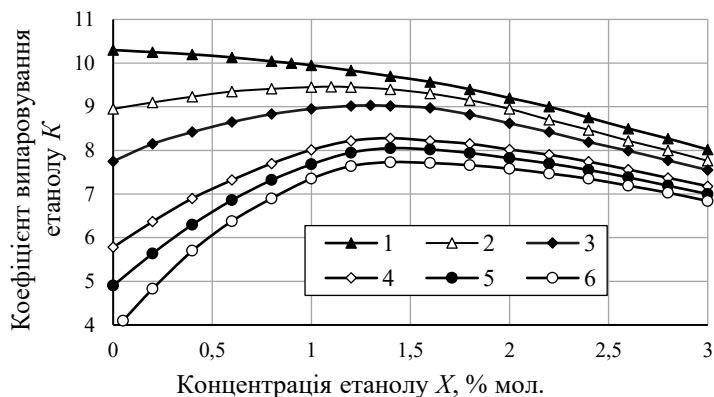


Рис. 4. Зміна коефіцієнтів випаровування етанолу K залежно від тиску P в зоні концентрацій етанолу до 3% мол.

Аномальна або асимптотична поведінка коефіцієнта випаровування при зменшенні концентрації спиртового розчину нижче 1,2—1,4 мол. % і залишкового тиску в системі нижчого за атмосферний пояснюється тим, що в таких умовах фазова рівновага бінарної системи етанол—вода наближається до критичного стану, в якому більшість фізико-хімічних характеристик можуть зазнавати різкої зміни, аж до кількох порядків, що характерно для коефіцієнта K .

На рис. 5 показана інверсія кривих фазової рівноваги за тиску P , нижчого за атмосферний, щодо аналогічної кривої за атмосферного тиску. Інверсія кривих фазової рівноваги в контексті фазових діаграм означає зміну напрямку кривої рівноваги при зміні тиску. Із представлених на рис. 5 графіків видно, що в зоні значень тиску 15,23—99,21 кПа інверсія кривих рівноваги відбувається в інтервалі концентрацій етанолу від 4,30 до 13,15% мол.

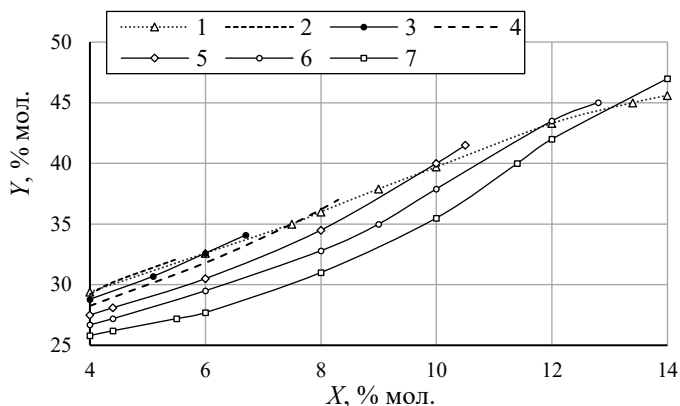


Рис. 5. Інверсія кривих фазової рівноваги за тиску, нижчого за атмосферний

Враховуючи результати фундаментальних досліджень, в НУХТ у співробітництві з ТОВ «ТІСЕР» були розроблені способи циклічної ректифікації, використання яких дає змогу наблизитись до рівноважного стану фаз на тарілках колон (патент UA на винахід № 123917. Спосіб масообміну між рідиною і паром в колонному апараті). Для забезпечення максимально можливого ККД відомих типів тарілок необхідно було створити умови, за яких відбувалася задана в часі примусова затримка рідини на тарілках до повного насичення пари легколеткими компонентами рідини, а рідини — важколеткими компонентами пари. Для реалізації способу ректифікаційна колона була оснащена тарілками з рухомими сегментами, з'єднаними з приводними механізмами (пневмоциліндрами двобічної дії) компанії FESTO, дія яких відбувалися відповідно до програми контролера (патент UA на винахід № 124733. Колонний масообмінний апарат циклічної дії). Фрагменти ректифікаційних колон циклічної дії з рухомими сегментами, закріпленими на тягах, і поворотними сегментами тарілок показано на рис. 6(а) і 6(б).

Система управління включала щит, в якому був розташований контролер, і комп'ютер. Контролер M340 включав процесор, мережевий модуль, блоки аналогових і дискретних входів/виходів. На комп'ютері була виконана умовна візуалізація технологічного процесу та надані необхідні засоби управління процесом. Для створення програмного управління пневмоциліндрами було використано програмне середовище Unity Pro. Текст програми розроблений на двох мовах — FBD та ST. Для віддаленого управління виконавчим механізмом пневмоциліндрами та збору інформації від дискретних датчиків про їх положення через послідовний інтерфейс зв'язку, простоти монтажу пневматичної системи управління за рахунок підключення виконавчих механізмів шлангами через швидко роз'ємні з'єднання

щита управління в системі автоматизації було передбачено використання стандартної електропневматичної шафи серії ЕРСВ-RIO-MPA-32/32 з типом інтерфейсу зв'язку Profibus-DP з блоком підготовки повітря.

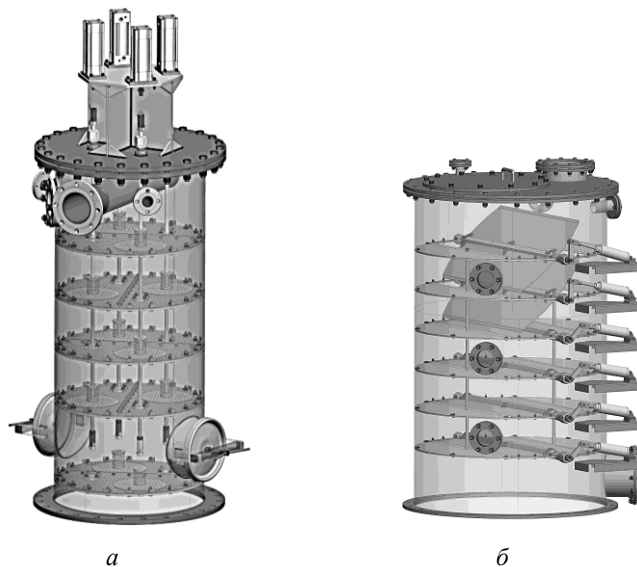


Рис. 6. Фрагменти ректифікаційних колон циклічної дії

Встановлені гідродинамічні режими роботи тарілок: швидкість пари у вільному перерізі колони, оснащеної сітчастими тарілками, не повинна перевищувати 0,7 м/с, лускоподібними 1,2 м/с; оптимальна швидкість пари в отворах сітчастої тарілки становить 7,5—8,0 м/с, лускоподібної 12—14 м/с; для інтенсивного переливу рідини швидкість пари в отворах не повинна перевищувати 1,5—1,0 м/с (Булій, Ободович, & Сидоренко, 2019).

Дослідження проводили у виробничих умовах ТОВ «Сторонибаський спиртовий завод» у процесі розгонки спиртовмісних фракцій. Час перебування рідини на тарілках розгінної колони становив 30—40 с. Встановлено, що в циклічному режимі альдегіди, естери і акролеїн видалялися в повній мірі, ступінь вилучення вищих спиртів сивушної олії зріс на 38%, а метилового спирту — на 15,6%. При цьому кратність концентрування головних домішок збільшилась на 25%, вищих спиртів на 40%, метанолу на 34%, акролеїну — на 36%, ізопропілового спирту на 42%, витрати гріючої пари зменшились на 40% порівняно з типовою колоною стаціонарної дії.

Висновки

1. Термодинамічна перевірка фазової рівноваги бінарної системи етиловий спирт—вода за тиску, нижчого за атмосферний, підтвердила достовірність отриманих експериментальних даних за обраною методикою.

2. Враховуючи те, що леткість етанолу при зниженні тиску в зоні низьких концентрацій зменшується, при проектуванні БРУ, що працюють під розрідженням, доцільно вакуумувати епюраційну, розгінну колони і колону кінцевого очищення.

3. При проектуванні бражних і спиртових колон, що працюють під розрідженням, необхідно враховувати миттєве зменшення коефіцієнтів випаровування етанолу в зоні концентрацій, нижчих від 1,2—1,4% мол.

4. Встановлено, що фазова рівновага між рідиною і парою на теоретичній тарілці в ідеальних умовах досягається протягом 30—40 хв.

5. Подовження часу контакту пари і рідини на тарілках до 30—60 с дає змогу наблизити ефективність кожної реальної тарілки до ефективності теоретичної шляхом створення умов, близьких до досягнення рівноважного стану фаз, та оптимізувати роботу БРУ завдяки підвищенню ступеня розділення багатокомпонентних сумішей і скороченню енерговитрат на 40 %.

Література

Булій, Ю. В. (2024). Прилад для дослідження фазової рівноваги в системі етанол—вода. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції: «*Біотехнології продовольчих продуктів: проблеми і перспективи*», Київ: ДНУ «УкрНДспиртбіопрод».

Булій, Ю. В., Ободович, О. М., Сидоренко, В. В. (2019). Визначення гідродинамічних характеристик роботи масообмінних колонних апаратів в циклічному режимі. *Теплофізика та теплоенергетика*, 41(4), 65—69. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PTT_2019_41_4_10.

Маринченко, В. О., Домарецький, В. А., Шиян, П. Л., Швець, В. М., Цыганков П. С., & Жолнер, І. Д. (2003). *Технологія спирту*. Вінниця: «Поділля-2000».

Марценюк, О. С., Малежик, І. Ф., Зоткіна, Л. В. (2019). Тарілчасті апарати та їх удосконалення. *Наукові праці НУХТ*, 2, 121—133.

Пупена, О. М. (2007). Використання модифікованого методу UNIFAC (Дортмунд) для розрахунку паро-рідинної рівноваги при моделюванні процесів ректифікації у виробництві харчового етилового спирту. *Наукові праці НУХТ*, 22, 61—63.

Українець, А. І., Шиян, П. Л., Сизько, В. Б. (2010). Сучасне обладнання спиртового виробництва. *Науково-технічні розробки та інноваційні технології*, 81—82.

Українець, А. І., Шиян, П. Л., Сосницький, В. В. (2006). Перспективні напрямки енергозбереження в спиртовому виробництві. *Харчова і переробна промисловість*, 4, 4—12.

Цыганков, С. П. (2010). *Биоэтанол*. Киев: ООО «НПП «Интерсервис».

Шиян, П. Л., Сосницький, В. В., & Олійничук, С. Т. (2009). *Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика*: монографія. Київ: Видавничий дім «Асканія».

Янчевський, В. К., Олійничук, С. Т., Кравчук, З. Д., Ковальчук, В. П., Михайло, В. Н. (2002). *Таблицы спиртометрические. Справочное пособие*. Киев: УкрНИИспиртбіопрод.

Янчевський, В. К., Ковальчук, В. П., Кравчук, З. Д., Попова, В. М., Олійник С. І. (1999). *Інструкція по хіміко-технологічному контролю лікєро-горілкового виробництва*. Київ: УкрНДспиртбіопрод.

Cristino, A. F., Rosa, S., Morgado, P., Galindo, A., Filipe, E. J. M., Palavra, A. M. F., Nieto de Castro, C. A. (2013). High-temperature vapour-liquid equilibrium for the water-alcohol systems and modeling with SAFT-VR: 1. Water-ethanol. *Fluid Phase Equilib.*, 341, 48—53. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2012.12.014>.

Kang, J. W., Diky, V., Chirico, R. D., Magee, J. W., Muzny, C. D., Abdulagatov, I., Kazakov, A. F., Frenkel, M. (2010). A Quality Assessment Algorithm for Vapor-Liquid Equilibrium Data. *J. Chem. Eng.* 55, 3631—3640. <http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2018.24.3>.

Farajnezhad, A., Afshar, O. A., Khansary, M. A., Shirazian, S., Ghadiri, M. (2016). Correlation of interaction parameters in Wilson, NRTL and UNIQUAC models using theoretical methods. *Fluid Phase Equilib.*, 417, 181—186. DOI:10.1016/J.FLUID.2016.02.041.

Guevara, M. A., Guevara, F. A., Belalcázar, L. C. (2018). Experimental Data and New Binary Interaction Parameters for Ethanol-Water VLE at Low Pressures Using NRTL and UNIQUAC. *TECCIENCIA*, 13(24), 17—26. <http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2017.23.11>.

Jin Zhao, Cong-Cong Dong, Chun-Xi Li, Hong Meng, Zi-Hao Wang. (2006). Isobaric vapor-liquid equilibria for ethanol-water system containing different ionic liquids at atmospheric pressure. *Fluid Phase Equilibria*, 242(2), 147—153. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2006.01.023>.

Liaposhchenko, O., Marenok, V., Skydanenko, M., Pavlenko, I., Ochowiak, M., Mižáková, J., Pitel', J., Storozhenko, V., Smyrnov, V., Shmatenko, V. (2021). Modeling of Technological Processes for a Rectification Plant in Second-Generation Bioethanol Production. *Processes*, 9, 944. <https://doi.org/10.3390/pr9060944>.

Plutowska, B., Wardenski, W. (2008). Application of gas chromatography-olfactometry (GC-O) in analysis and quality assessment of alcoholic beverages — a review. *Food Chemistry*, 110, 449—463. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.08.058>.

Steven Lehotay, S. (2002). Application of gas chromatography in food analysis. *Trends in Analytical Chemistry*, 21(9—10), 686—697. [https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(02\)00805-1](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(02)00805-1).

Dewulf, J. (2002). Analysis of volatile organic compounds using gas chromatography. *Trends in Analytical Chemistry*, 21(9—10), 637—646. <http://hdl.handle.net/1854/LU-158121>.

Privat, R., Jaubert, J., Kontogeorgis, G. (2024). The secret of the Wilson equation. *Fluid Phase Equilibria*, 579, 114018. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2023.114018>.

Miller, K., James, M. (2016). Optimization techniques in nonlinear regression models. *Mathematical analysis and applications*, 432(1), 135—150.

УДК 621.316

AUTOMATED CONTROL OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING WITH OPTIMIZATION OF ELECTRICITY PAYMENT

S. Baliuta, <https://orcid.org/0009-0008-4286-0582>

L. Kopylova, <https://orcid.org/0009-0005-8214-6162>

M. Zhukov, <https://orcid.org/0009-0001-1869-3912>

National University of Food Technologies

Key words:

*Power supply system
Voltage regulator
Regulated transformer
Distributed generation
Distribution electrical
networks*

Article history:

Received 05.11.2025

Received in revised form
19.11.2025

Accepted 04.12.2025

Corresponding author:

S. Baliuta

E-mail:

epp11@ukr.net

Citation: Балюта С. М., Копилова Л. О., Жуков М. Ю. (2025). Автоматизоване керування зарядкою електромобілів з оптимізацією оплати за електричну енергію. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 99—114.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-9

ABSTRACT

When charging electric vehicles (EVs) in the residential sector, payment for electricity is made using electricity tariffs fixed at certain time intervals. This approach creates the problem of group charging of EVs and leads to overloading of the power system and high charging costs. In addition, the random nature of the arrival of EVs and the time they stay at the gas station limits their owners from adhering to a fixed charging time. Thus, using current market prices of electricity to pay for EV charging can help optimize the load of the power system and reduce the cost of electricity charging. A control system that uses the method of optimizing the charging cost of EVs (MOVZ) charged in the residential sector is presented in the article. The developed method provides coordination of EV charging by heuristically studying the change in electricity prices in the retail electricity market in real time and information about the EV being charged. Using the method, the threshold value of the electricity price for charging each EV was determined and the charging process was coordinated with cost optimization for each charging planning time period. The cost of charging the EV was fixed at the end of each individual charging stage, and the total cost was calculated when the desired capacity of the EV battery was reached. Using the developed optimization method, computational studies of EV charging at real electricity prices were carried out by simulation modeling in the MATLAB/Simulink medium. The simulation results showed that the control system with the proposed EV MOVZ showed better control results than uncoordinated charging systems and provided low charging costs without network overload, compared to fixed-rate charging systems and a system based on time of use.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-9

АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ЗАРЯДКОЮ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ОПТИМІЗАЦІЄЮ ОПЛАТИ ЗА ЕЛЕКТРИЧНУ ЕНЕРГІЮ

С. М. Балюга, <https://orcid.org/0009-0008-4286-0582>

Л. О. Копилова, <https://orcid.org/0009-0005-8214-6162>

М. Ю. Жуков, <https://orcid.org/0009-0001-1869-3912>

Національний університет харчових технологій

При заряджанні електромобілів (ЕМ) у житловому секторі оплата за електричну енергію проводиться з використанням тарифів на ЕЕ, що фіксуються на певних проміжках часу. Такий підхід створює проблему групового заряджання ЕМ і призводить до перевантаження енергосистеми та високих витрат на заряджання. Крім того, випадковий характер прибуття ЕМ та час їх перебування на заправці обмежує їх власників у дотриманні фіксованого часу заряджання. Таким чином, використання поточних ринкових цін на електричну енергію для оплати за заряджання ЕМ може сприяти оптимізації навантаження енергосистеми та зниження вартості заряджання ЕМ.

У статті представлена система керування, що використовує метод оптимізації вартості заряджання ЕМ (МОВЗ), які заряджаються в житловому секторі. Розроблений метод забезпечує координацію заряджання ЕМ шляхом евристичного вивчення зміни цін на ЕЕ на роздрібному ринку ЕЕ в режимі реального часу та інформації про ЕМ, що заряджається. З використанням методу визначається порогове значення ціни ЕЕ для заряджання кожного ЕМ і координується процес заряджання з оптимізацією вартості для кожного періоду часу планування заряджання. Вартість заряджання ЕМ фіксується в кінці кожного окремого етапу заряджання, а сукупна вартість розраховується при досягненні бажаної ємності АБ ЕМ. З використанням розробленого методу оптимізації проведені розрахункові дослідження заряджання ЕМ при реальних цінах на ЕЕ шляхом імітаційного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink. Результати моделювання показали, що система керування із запропонованим МОВЗ ЕМ показує кращі результати керування ніж нескоординовані системи заряджання і забезпечує низьку вартість заряджання без перевантаження мережі, порівняно із системами заряджання з фіксованою ставкою та системою, що базується на часі використання.

Ключові слова: заряджання електромобілів, система керування, тарифи на електричну енергію.

Постановка проблеми. З метою скорочення викидів CO₂ та залежності від викопного палива в автомобільній галузі швидко поширюється електрифікований транспорт. Порівняно з традиційними транспортними засобами електромобілі (ЕМ) мають численні потенційні переваги, такі як екологічність, низька вартість палива, безпека, надійність, компактність і мала вага. Також ЕМ можуть використовуватися для підтримання балансу електричної потужності в енергосистемі та мікромережі, особливо в періоди пікового попиту завдяки технології «транспорт—

мережа» (V2G), виступаючи у вигляді розподіленого накопичувача енергії (Lee, & Lukszo, 2016). Однак при широкомасштабному використанні ЕМ виникають перевантаження енергосистеми додатковим споживанням електроенергії на зарядку ЕМ. Це може призвести до перевантаження трансформаторів, фідерів, виникнення несправностей у мережі та нестабільності роботи мережі загалом. Додаткове споживання електроенергії на зарядку ЕМ від мережі обумовлює встановлення нових джерел електроенергії та модернізацію існуючої електричної мережі. Однак це недоцільно через високі витрати на модернізацію інфраструктури електроенергії та зростання вартості ЕЕ через збільшення генеруючих потужностей. Більш економічний варіант — перенесення зарядного навантаження ЕМ з пікового часу енергосистеми на позапіковий час енергосистеми та використання різних тарифних систем на ЕЕ з піковими, середніми й позапіковими ставками та ринкових цін на ЕЕ для зменшення вартості електричної енергії.

Огляд останніх досліджень і публікацій. Зростаюче впровадження в транспортну галузь електромобілів обумовлює можливості для зниження викидів CO₂ та створює складності для енергосистем. Отже, інтеграція станцій зарядки електромобілів до інфраструктури енергосистеми потребує вивчення з різних точок зору та цілей. Для цього використовуються методи, що аналізують профілі потужності навантаження та ціни на ЕЕ з різними цільовими функціями, такими як мінімізація втрат потужності, відхилення напруги й оптимізація вартості зарядки для житлових секторів і парків електромобілів. У праці (Mets, Verschueren, De Turck, & Devellder, 2011) запропонований алгоритм планування зарядки ЕМ для зниження пікового навантаження в житлових районах з використанням технології заряджання ЕМ V2G. У дослідженні розглядалися 63 домогосподарства Бельгії, кожному з яких було призначено випадковий профіль електричного навантаження. Автори розробили модель з трьома різними сценаріями заряджання ЕМ (тобто неконтрольована зарядка, контрольована зарядка без підтримки V2G і з нею), враховуючи різні рівні наявності електромобілів в транспортній галузі (відповідно 15%, 45% та 75%), та виконали оцінку ефективності запропонованого алгоритму заряджання порівняно з методом неконтрольованої зарядки ЕМ. Алгоритм керування зарядкою ЕМ у житловому секторі представлений у праці (Dubey, Santoso, Cloud, & Wacławiak, 2015) де було запропоновано формування графіка зарядки ЕМ з використанням механізму фіксованих у часі цін на ЕЕ для оптимізації електричного навантаження. Ефективність алгоритму підтверджена для різних зарядних сценаріїв, таких як фіксована і випадкова зарядка з урахуванням початку заряджання відповідно до цін у фіксовані моменти часу.

Автори (Lojowska, Kurowicka, Papaefthymiou, & Sluis, 2011) виконали моделювання різних сценаріїв неконтрольованої зарядки ЕМ з використанням методу Монте-Карло для розрахунку енергоспоживання електромобілів при заряджанні в житлових приміщеннях з урахуванням стохастичного характеру кожної поїздки ЕМ (тобто пройденої відстані) та рівня заряду акумулятора.

Дослідження, проведені в статті (Zhang, Qian, Zhou, Stewart, & Hepburn, 2012), розглядають питання оптимізації профілю електричного навантаження побутових електромобілів, що заряджаються з використанням трьох різних систем тарифів на електроенергію. Вказані тарифні системи включають фіксовані тарифи на ЕЕ (тобто постійні тарифи), тарифи на ЕЕ за принципом «час використання» (тобто

тарифи, відповідно, для позапікового та пікового періодів) і тарифи в режимі реального часу (тобто тарифи, що змінюються в часі.). Автори встановили відповідність між відстанню, яку пройшов ЕМ, та тарифною системою для визначення відповідного часу зарядки ЕМ. Також виконано моделювання для чотирьох різних сценаріїв зарядки (відповідно неконтрольована домашня зарядка, неконтрольована домашня зарядка з тарифами для позапікового навантаження, інтелектуальна домашня зарядка та неконтрольована громадська зарядка) у 38-вузловій розподільчій електричній мережі Великої Британії.

У статті (Wang, Li, Duan, & Jia, 2021) запропоновано алгоритм планування зарядки ЕМ у житлових міських районах з використанням декількох видів енергії, що передбачає впорядковану зарядку та розрядку електромобілів. Автори проаналізували питання використання відновлюваних джерел енергії (наприклад, фотоелектричні системи) для оптимізації дисперсії загального навантаження і встановили, що впорядковані сценарії зарядки значно знижують енергетичне навантаження на електричну мережу порівняно зі сценаріями випадкової зарядки.

У (Nimalsiri, Ratnam, Mediawathe, Smith, & Halgamuge, 2021) представлено розроблений алгоритм планування централізованої мережевої зарядки та розрядки ЕМ з урахуванням економічних обмежень та обмежень розподільної мережі. Запропоновано вирішення багатокритеріальної задачі керування, що передбачає підтримання напруги фідера в заданих межах, підвищення якості електроенергії та мінімізацію витрат на зарядку ЕМ. Централізована координована зарядка дозволила оптимізувати зарядне навантаження ЕМ і забезпечити бажані енергетичні потреби електромобілів.

У праці (Alonso, Germain, & Galan, 2014) для координації процесу заряджання парку електромобілів використали генетичний алгоритм (ГА). Автори розраховували оптимальну схему навантаження для агрегованих електромобілів, зважаючи на такі фактори, як навантаження трансформатора, обмеження напруги та доступність паркування. Як вхідні дані для генетичного алгоритму використані потреби в електроенергії за 24 години, розклад паркування (наприклад, час прибуття/відправлення електромобілів) та попит на електромобілі на день вперед.

Мета дослідження: розробити метод керування групою станцій зарядки електромобілів, що забезпечить оптимізацію оплати за електричну енергію та умов зарядки електромобілів.

Матеріали і методи. Методи теорії автоматичного керування, імітаційного моделювання, математичної статистики, прогнозування, які використовуються для розробки методу керування та моделювання процесів у системах керування зарядкою електромобілів.

Викладення основних результатів дослідження. Процес заряджання електромобілів може здійснюватися як нескоординованим, так і координованим способом. Перший варіант залежить від типу підключення електромобіля та починається відразу після підключення електромобілів до зарядних станцій. На відміну від цього, другий варіант координує зарядку електромобілів з урахуванням деяких зовнішніх факторів, таких як вимоги електричної мережі, ступінь зарядки акумулятора електромобіля, його ємність, час зарядки і вартість електричної енергії, а також потужність, що споживається електромобілем.

При нескоординованій зарядці, зазвичай, враховуються енергетичні потреби користувача електромобіля та доступність зарядної станції. Наприклад, електромобілю потрібна підзарядка для забезпечення заряджання перед наступною поїздкою. Шляхом моделювання процесу керування при нескоординованому методі заряджання можна виявити вплив на зарядку з боку електричної мережі, зокрема електричне навантаження при заряджанні та вартість електричної енергії зарядки для клієнта.

Спрощений алгоритм нескоординованої зарядки полягає в тому, що в будь-який час t система керування перевіряє, чи підключений електромобіль до мережі. Якщо підключення не виявлено, система керування збільшує час t і знову повторює процес перевірки. У випадку, коли електромобіль підключений до зарядного пристрою, система отримує дані з електромобіля та звіряє його ступінь зарядки (SoC) з ємністю АБ (BC), а також розраховує електричне навантаження та вартість для кожного процесу заряджання. Цей процес триває до повного заряджання акумулятора. Потім система керування порівнює час заряджання з максимальним лімітом часу i , відповідно, збільшує крок часу, щоб повторити процедуру або завершити процедуру зарядки (алгоритм).

Координоване заряджання. На відміну від некоюординованого заряджання, алгоритм координованої зарядки передбачає визначення моментів часу (тобто графіка зарядки), які відповідають початку і завершенню процесу зарядки акумулятора. Тобто алгоритми формуються на основі зовнішніх факторів, таких як профіль електричного навантаження, відстань поїздки електромобіля, система тарифів на електроенергію, а також профілі електричного навантаження електричної мережі та цін на електричну енергію в режимі реального часу.

Системи тарифів на електричну енергію, що залежать від часу використання. Тарифна система визначає структуру тарифів на електроенергію у різні періоди, які називаються багатотарифними. Ця система прийнята для стимулювання споживачів електричної енергії використовувати електричну енергію (для власників електромобілів заряджати автомобілі) в непікові години навантаження енергосистеми. В Україні пропонуються три різні тарифні системи, такі як фіксована, двозонна і ринкові ціни на електричну енергію (Ткаченко, Бутрім, & Данько, 2021). Відповідно до принципу роботи, стандартна тарифна система використовує фіксований тариф на електроенергію.

За наявності багатотарифної системи вартість електричної енергії C для i -го електромобіля є функцією споживання електричної енергії E та ціни (тарифу) P для цього конкретного періоду використання.

Розглянемо приклад з дискретними кроками часу і отримаємо формулу для розрахунку вартості зарядки B i -го електромобіля. Так, запланований до зарядки EM1 Nissan Leaf E+ (рис. 2, б), що має акумулятор ємністю 62 кВт·год. Електромобіль EM1 має час прибуття $t_a = 3$ і час відправки $t_d = 12$, при цьому вхідний рівень заряду АБ (SoC) становить 30% (18,6 кВт·год). З урахуванням послідовності прибуття та відправлення час перебування на зарядці S_i розраховується як десять кроків часу, тобто $(S_i = t_d - t_a + 1)$, так що прибуття припадає на початок, а відправлення на кінець кроків часу $t_a = 3$ і $t_d = 12$. Передбачається, що кожен крок часу становить 15 хвилин, тому для виконання вимог до зарядки при подачі енергії $E = 7,2$ кВт·год потрібно 6 кроків часу.

Координована зарядка враховує змінну K для EM_1 (тобто K_{EM_1}) для керування процесом зарядки відповідно до трьох тарифних систем, як показано на рис. 1. Перший — це тариф з фіксованою ставкою, при використанні якого електромобіль заряджається за середньою фіксованою ціною P за кожний кВт·год, як показано на рис. 1, а. У цьому випадку вартість кожного кроку часу однаково, а отже, вартість зарядки пропорційна споживаній енергії.

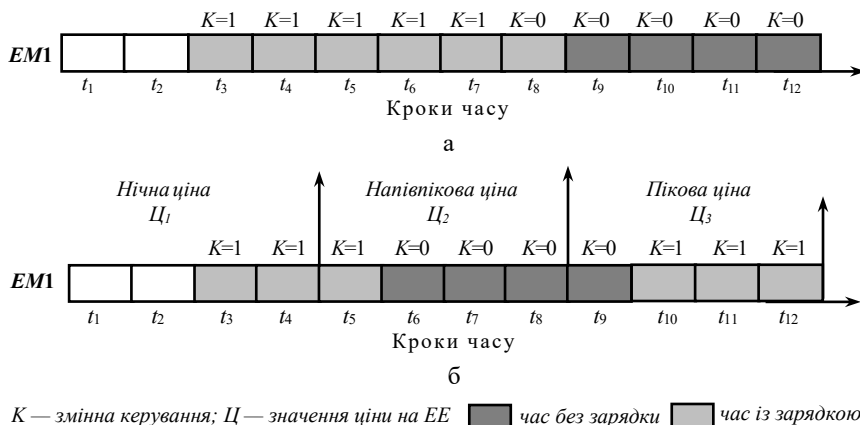


Рис. 1. Ілюстрація процесу заряджання та вартості (а); стандартний тариф із фіксованою ставкою (б); різні системи тарифів на час використання (TOU)

Другий варіант — це багатоставковий тариф, у якому ціни залежать від періоду часу використання енергії та залишаються постійними протягом цього до періоду часу.

Залежно від багато-зонного тарифу можуть бути три різні можливі ціни: Π_1 , Π_2 і Π_3 (Ткаченко, Бугрім, & Данько, 2021).

Вартість зарядки EM_1 можна розрахувати як сума добутку потужності зарядки (енергії зарядки) E , ціни (тарифу) на електричну енергію Π та змінної керування зарядкою K для кожний момент часу t .

Нехай B_{EM_1} означає вартість заряджання EM_1 за спожиту енергію E з ціною заряджання P на кожному кроці часу t . Вартість зарядки за фіксованим тарифом можна розрахувати так:

$$B_{EM_1} = (E \cdot \Pi \cdot K(t_3)) + (E \cdot \Pi \cdot K(t_4)) + (E \cdot \Pi \cdot K(t_5)) + (E \cdot \Pi \cdot K(t_6)) + (E \cdot \Pi \cdot K(t_7)) + (E \cdot \Pi \cdot K(t_8)). \quad (1)$$

Вартість зарядки за багатозонним тарифом складає:

$$B_{EM_1} = (E \cdot \Pi_1 \cdot K(t_3)) + (E \cdot \Pi_1 \cdot K(t_4)) + (E \cdot \Pi_2 \cdot K(t_5)) + (E \cdot \Pi_3 \cdot K(t_{10})) + (E \cdot \Pi_3 \cdot K(t_{11})) + (E \cdot \Pi_3 \cdot K(t_{12})). \quad (2)$$

Це означає, що при постійному споживанні енергії E на кожному кроці часу t вартість зарядки S_{EM_i} для i -го електромобіля розраховується для кожної тарифної системи з допомогою рівняння (1). При цьому фіксована ціна ЕЕ Π_i це середня постійна вартість зарядки на кожному кроці часу t і, зазвичай, задається у відповідному тарифі.

Аналогічним чином багатозонна тарифна система встановлює різні ціни залежно від напівпікового та пікового періодів часу при постійній середній вартості за

відповідні години зони (нічна зона з 23:00 до 7:00 з тарифом 1,728 грн/кВт·год; пікова зона з 8:00 до 11:00 та з 20:00 до 22:00 з тарифом 6,48 грн/кВт·год; напівпікова зона з 7:00 до 8:00, з 11:00 до 20:00 та з 22:00 до 23:00) з тарифом 4,32 грн/кВт·год.).

Однак динамічний характер поведінки власників електромобілів при прибутті, від'їзді та перебуванні на зарядці, а також різні потреби в енергії для зарядки ЕМ є основними перешкодами використання багатозонних тарифних систем.

Водночас погодинні ціни купівлі-продажу електроенергії в реальному часі є більш природним варіантом для оптимізації вартості зарядки, але становлять складність і проблеми при роботі з численними вхідними даними як від електромобілів, так і від електромережі на кожному кроці часу.

Система керування електрозабезпеченням станцій зарядки електромобілів з оптимізацією вартості зарядки. Забезпечення електроенергією житлових будинків зі станціями зарядки електромобілів відбувається від низьковольтної розподільчої електричної мережі (рис. 2). Основним джерелом енергії для житлових будинків є енергосистема. В енергосистемі встановлені традиційні електростанції QSX, в яких як джерело енергії використовуються вугілля, природний газ, атомна енергія, а також електростанції з відновлюваними джерелами енергії (тобто сонячні, вітрові, біогазові).

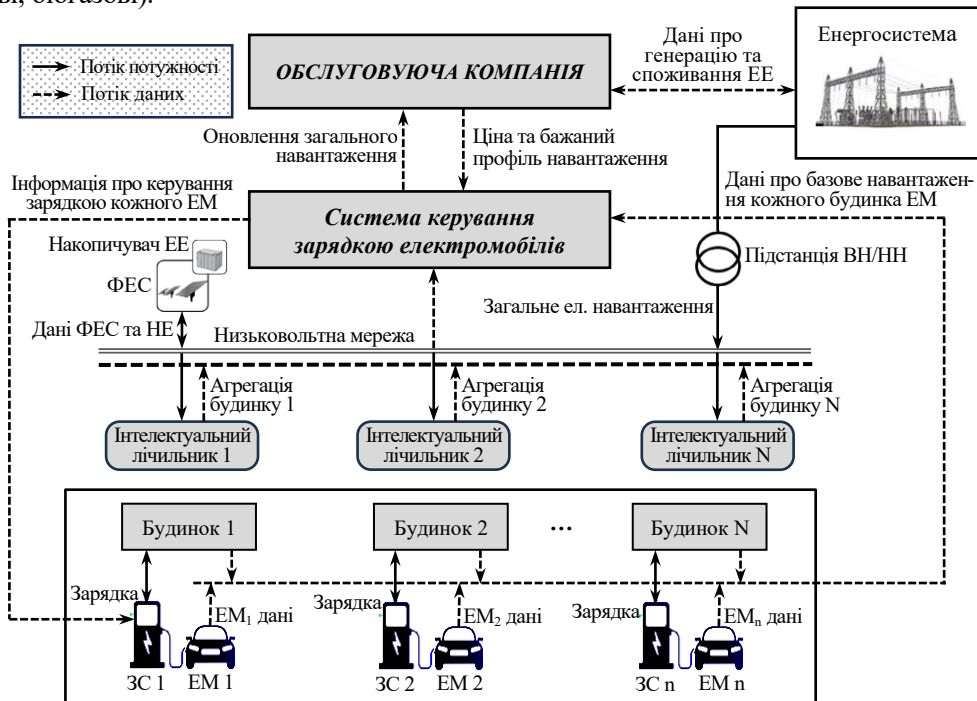


Рис. 2. Системна модель запропонованої системи керування заряджанням електромобілів у житловому секторі

Розподільні електричні мережі та комунальне підприємство, що обслуговує будинки, взаємодіють двосторонньо та обмінюються енергією через оптовий ринок

електричної енергії. При цьому електроенергія продається побутовим споживачам через інтелектуальну систему електрозабезпечення з використанням цін роздрібногo ринку електричної енергії. У будинках мають бути встановлені фотоелектростанції (ФЕС), накопичувачі електричної енергії (НЕ), зарядні станції електромобілів (ЗС) та інтелектуальні лічильники електричної енергії. Лічильники фіксують дані про електричну енергію, генеровану ФЕС, потужності від НЕ, електроспоживання домогосподарств, потужності ЕМ та передають їх у систему керування електрозабезпечення. При цьому через локальні та глобальні комунікаційні мережі передаються дані про актуальні роздрібні ціни на ЕЕ.

Система керування електрозабезпеченням відіграє вирішальну роль у зборі даних про електричне навантаження будинків, зарядних станцій, ФЕС та НЕ, даних про ціни на ЕЕ від постачальника комунальних послуг та даних від електромобілів, а також використанні підсистеми оптимізації вартості зарядки для розрахунку оптимальних графіків заряджання підключених електромобілів.

У підсистемі оптимізації вартості зарядки ЕМ аналізуються модель ціноутворення, базове навантаження та вхідні дані від електромобілів і обчислюються узагальнені значення електроспоживання. Отже, у підсистемі вирішується завдання оптимізації з використанням узагальненого значення потужності та обчислюється оптимальний набір рішень для заряджання електромобілів.

Система керування зарядкою збирає інформацію з мережі електрозабезпечення, домогосподарств, НЕ, ФЕС, електромобілів і з використанням запропонованого методу забезпечує оптимальне заряджання електромобілів, що запитують послугу зарядки, на кожному кроці часу, як показано на рис. 3.

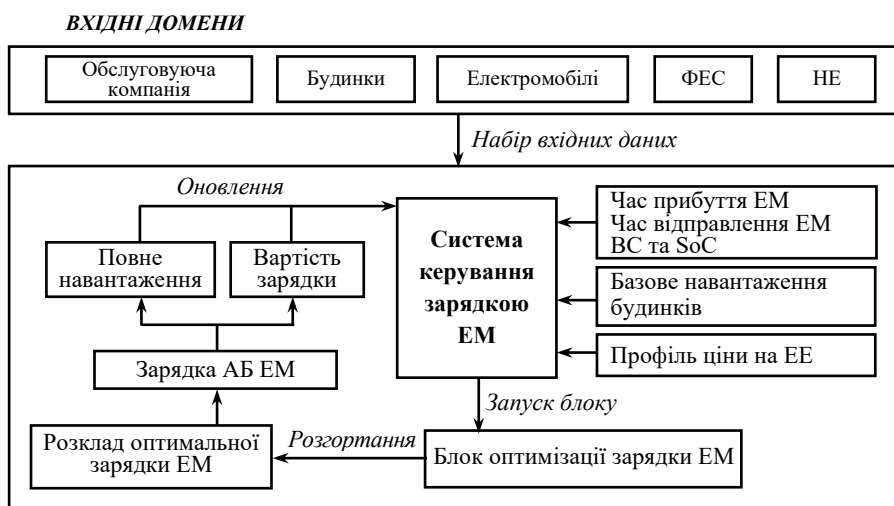


Рис. 3. Ілюстрація вхідних доменів і процедури керування зарядкою ЕМ

Метод керування. Метою керування є мінімізація цільової функції вартості зарядки B_i для i -го електромобіля, яка визначається як сума добутку енергоспоживання E_i і ціни на ЕЕ $C_i(t)$ на всіх кроках часу Δt зарядки електромобіля, рівняння (3):

$$\min B_i = \sum_{t=t_{ni}}^{t_{ki}} E_i(\Delta t) \times K_i(\Delta t) \times \Pi(\Delta t). \quad (3)$$

Величина електричної енергії зарядки i -го ЕМ на кроці часу Δt :

$$E_i(\Delta t) = (SoC_i(\Delta t - 1) \times BC_i) + (\eta \times K_i(\Delta t) \times V_{ri}), \quad (4)$$

де $K_i(t)$ — бінарна змінна керування зарядкою i -го ЕМ зі значеннями $[0, 1]$, які відповідають операціям відтермінування і зарядки.

Цільова функція (рівняння (3)) має такі лінійні обмеження на змінні:

- необхідний час Z_{Ti} для зарядки i -го ЕМ повинен бути менший за час перебування ЕМ на зарядці T_i (нерівність (5));

- ціна ЕЕ $\Pi(t)$ на будь-якому кроці часу t повинна бути меншою за розраховане граничне значення ціни Π_{gi} (нерівність (6));

- швидкість зарядки АБ $V_{ri}(t)$ і ступінь зарядки АБ $SoC_i(t)$ i -го ЕМ не повинні перевищувати допустимих граничних значень (нерівності (7) та (8)).

$$Z_{Ti} \leq T_{ti}; \quad (5)$$

$$\Pi(t) \leq \Pi_{gi}; \quad (6)$$

$$V_{ri}^{min} \leq V_{ri}(\Delta t) \leq V_{ri}^{max}; \quad (7)$$

$$SoC_{imin} \leq SoC_i(\Delta t) \leq SoC_{imax}. \quad (8)$$

Перед початком зарядки з i -го ЕМ отримують такі дані: час прибуття t_{pri} та час відправлення t_{vpi} , ступінь зарядки АБ $SoC_i(t_{pr})$, ємність АБ BC_i , максимально-допустимий ступінь зарядки АБ SoC_{imax} , мінімальну та максимальну допустиму швидкість заряджання АБ V_{ri}^{min} та V_{ri}^{max} . Від оператора електричної мережі отримують вектор даних про ціни на електричну енергію Π та максимально допустиме значення потужності від енергосистеми P_{Mmax} .

Метод керування зарядкою ЕМ з оптимізацією вартості електричної енергії на зарядку.

1. Зарядка ЕМ від відновлювальних джерел енергії, що встановлені у будинках:

1) на основі даних, отриманих з i -го ЕМ, розраховують час перебування i -го ЕМ на зарядці:

$$T_{ti} = t_{vpi} - t_{pri}; \quad (9)$$

2) визначають електричну енергію, необхідну для заряджання i -го ЕМ:

$$E_i^r = \begin{cases} (1 - SoC_i(\Delta t)) \times BC_i & \text{при повній зарядці АБ;} \\ (SoC_i^r(\Delta t) - SoC_i(\Delta t)) \times BC_i & \text{при зраядці АБ до заданого рівня;} \end{cases} \quad (10)$$

3) розраховують кількість кроків часу K_{Ti} заряджання i -го ЕМ при номінальній швидкості заряджання V_{ri} :

$$K_{Ti} = E_i^r / V_{ri}; \quad (11)$$

4) перевіряють, щоб кількість кроків часу K_{Ti} не перевищувала час перебування ЕМ на зарядці:

$$K_{Ti} \leq T_{ti}; \quad (12)$$

5) для кожного i -го ЕМ розраховують потужність зарядки:

$$P_i(\Delta t_j) = V_{ri}(\Delta t_j) / \eta; \quad (13)$$

6) для всіх N ЕМ, які одночасно заряджаються, визначають потужність, що витрачається на зарядку:

$$P_{\Sigma}(\Delta t_j) = \sum_{i=1}^N P_i(\Delta t_j); \quad (14)$$

7) перевіряють можливість зарядки N ЕМ від ФЕС та НЕ, встановлених у будинках:

$$P_{\Sigma}(\Delta t_j) \leq P_{\text{ФЕС}}(\Delta t_j) + P_{\text{НЕ}}(\Delta t_j) - P_{\text{BL}}(\Delta t_j), \quad (15)$$

де $P_{\text{BL}}(\Delta t_j)$ — базове навантаження будинку; $P_{\text{ФЕС}}(\Delta t_j)$ — потужність, що генерована ФЕС; $P_{\text{НЕ}}(\Delta t_j)$ — потужність, що надходить від накопичувача енергії.

Цей варіант зарядки можна вважати найбільш економічним (оптимальним), оскільки ЕЕ з електричної мережі не купується.

У випадку, коли умова (15) не виконується, для зарядки ЕМ необхідно використати електричну енергію, що купується в енергосистемі.

2. Зарядка ЕМ з використанням відновлювальних джерел енергії та накопичувачів ЕЕ, що встановлені у будинках, та електричної енергії від електричної мережі:

1) для розрахунку використовуються значення змінних, отримані у пп. 1—4 методу зарядки ЕМ від ВДЕ та НЕ;

2) для кожного i -го електромобіля розраховують порогове значення ціни ЕЕ Π_{hi} , яка забезпечить мінімальну вартість оплати за ЕЕ:

$$\Pi_{hi} = \frac{1}{T_{ti}} \sum_{t=t_{\text{нп}i}}^{t_{\text{вп}i}} \Delta t_i \cdot \Pi(\Delta t_i); \quad (16)$$

3) на основі порогового значення ціни Π_{hi} для кожного i -го електромобіля для поточної ціни на ЕЕ $\Pi(\Delta t)$ визначають набір кроків часу DTSi можливої зарядки i -го ЕМ з використанням умови (18):

$$\Pi(\Delta t_i) \leq \Pi_{hi}; \quad (18)$$

4) на основі набору кроків часу можливої зарядки ЕМ DTSi (допустимі рішення) для кожного i -го ЕМ формують набір інтервалів часу проведення зарядки ITSi і задають відповідну змінну керування зарядкою i -го ЕМ:

$$K_i(t_j) = 1.$$

5) під час проведення керування зарядкою i -го ЕМ на інтервалі часу Δt_j з набору ITSi, зважаючи на реальне значення ціни на ЕЕ $\Pi(t_j)$, виконують такі дії:

- перевіряють допустимість швидкості зарядки АБ i -го ЕМ $V_{ri}(\Delta t_j)$:

$$(V_{ri}^{\text{min}} \leq V_{ri}(\Delta t_j) \leq V_{ri}^{\text{max}}); \quad (19)$$

- зіставляють поточний рівень зарядки АБ $\text{SOC}_i(t_j)$ з допустимими рівнями зарядки $\text{SOC}_{i\text{min}}$ та $\text{SOC}_{i\text{max}}$:

$$(\text{SOC}_{i\text{min}} \leq \text{SOC}_i(\Delta t_j) \leq \text{SOC}_{i\text{max}}); \quad (20)$$

- перевіряють етапи оптимальної зарядки, зіставляючи поточні значення ціни ЕЕ ($\Pi(\Delta t_i)$), граничне значення ціни (Π_{hi}) і значення керуючої змінної $K_i(t_j)$;

- розраховують поточний запас енергії в АБ i -го ЕМ:

$$E_i(\Delta t_j) = \text{SOC}_i(\Delta t_{j-1}) \cdot \text{BC}_i + \eta \cdot V_{ri}(\Delta t_j) \Delta t; \quad (21)$$

- визначають на кроці часу t_j :

електричну енергію, спожиту для зарядки АБ i -го ЕМ:

$$E_i(\Delta t_j) = E_i(\Delta t_{j-1}) + \eta \cdot V_{ri}(\Delta t_j) \Delta t; \quad (22)$$

потужність зарядки:

$$P_i(\Delta t_j) = V_{ri}(\Delta t_j) / \eta; \quad (23)$$

вартість ЕЕ, спожитої на зарядку i -го ЕМ:

$$B(\Delta t_j) = B(\Delta t_{j-1}) + C(\Delta t_j) \cdot \eta \cdot V_{ri}(\Delta t_j); \quad (24)$$

6) для всіх N ЕМ, які одночасно заряджаються, визначають потужність, що витрачається на зарядку:

$$P_{\Sigma}(\Delta t_j) = \sum_{i=1}^N P_i(\Delta t_j); \quad (25)$$

7) визначають потужність зарядки, що споживається від мережі:

$$P_M = P_{\Sigma}(\Delta t_j) + P_{BL}(\Delta t_j) - P_{\text{ФЕС}}(\Delta t_j) \mp P_{\text{НЕ}}(\Delta t_j); \quad (26)$$

8) перевіряють можливість перевантаження електричної мережі:

$$P_{M\max} \geq P_M. \quad (27)$$

У разі невиконання умови (27), з використанням пунктів 5 і 6 проводиться коректування кроків часу зарядки ЕМ для забезпечення виконання умови (27).

Таким чином, формується графік зарядки ЕМ з оптимальною вартістю електричної енергії.

Сформований графік зарядки передається в систему керування зарядкою ЕМ. У системі керування з використанням поточних значень параметрів ЕМ, значень потужності та поточних цін на ЕЕ проводиться перевірка оптимальних етапів зарядки, формуються значення змінної керування і проводиться керування зарядкою електромобілів відповідно до їх оптимального графіка.

Результати моделювання та обговорення. Моделювання проводимо у середовищі Matlab/Simulink (Босак, Босак, Чермалих, & Дубовик, 2021).

Для моделювання використані три типи цінових профілів, включаючи ціни на ЕЕ в реальному часі (ціни на ЕЕ на роздрібному ринку ЕЕ) (ЗРЦ), базову ціну ЕЕ за одноставковим (базовим) тарифом (ЗБТ) для населення та ціни за двозонним тарифом для населення (ЗДТ) (Ткаченко, Бугрім, & Данько, 2021), як показано на рис. 4.

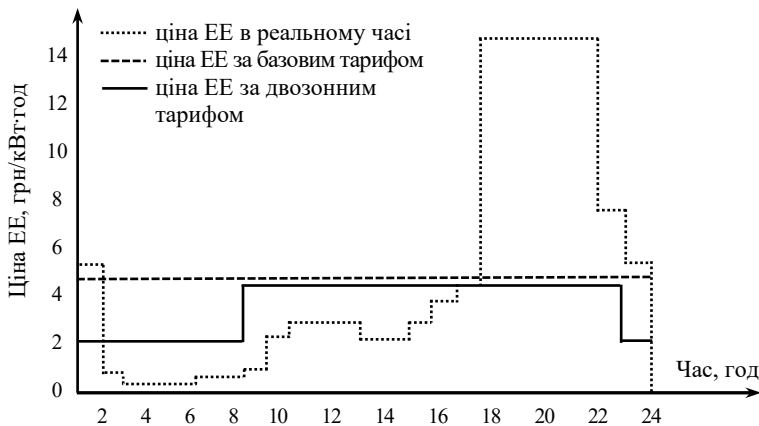


Рис. 4. Цінові профілі в реальному часі за фіксованою ставкою та за часом використання

Проведено моделювання заряджання електромобіля з фіксованими послідовностями прибуття та відправлення, щоб оцінити ефективність запропонованого методу керування зарядкою ЕМ (ОКР) порівняно із зарядкою за ЗБТ, ЗДТ та оптимальною зарядкою з використанням реальних цін на ЕЕ (ЗРЦ) відповідно. Для

всіх сценаріїв зарядки приймаємо такі параметри зарядного пристрою: ККД $\eta = 0,95$, швидкість заряджання ($V_r = 7$ кВт·год) та крок у часі $t = 15$ хв.

Сценарій індивідуальної зарядки ЕМ. У цьому сценарії розглядаємо окремих будинок з профілем базового електричного навантаження (Малогулко, Поліщук, & Томашевський, 2023), показаним на рис. 5. Зарядка проводиться для електромобіля з параметрами, наведеними в табл. 1.

Таблиця 1. Параметри ЕМ, який заряджається

Параметр	Величина, значення
Марка ЕМ	Audi eQ3
Напруга, V	220 В
Струм, I	31,8 А
Швидкість зарядки АБ, V_r	7 кВт·год
Ємність АБ, BC	60 кВт·год
Час прибуття, t_{np}	17,45
Час відправлення, t_{en}	8,00
Ступінь зарядження АБ, SoC	0,4
Мінімальний ступінь зарядження АБ, SoC_{min}	0,2
Ступінь повної зарядки АБ, SoC_{max}	1,0
Потрібна кількість кроків часу, Δt	21

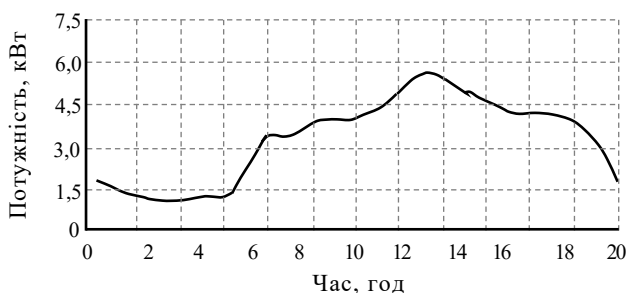


Рис. 5. Профіль електричного навантаження (тобто базового навантаження) типового домогосподарства

Процес заряджання акумулятора з керуванням за тарифами показано на рис. 6. Акумулятор заряджається в різні моменти часу відповідно до тарифів. Враховуючи час підключення, відключення ЕМ та постійну вартість ЕЕ, процес заряджання починається негайно за схемою заряджання ЗБТ.

При використанні тарифу ЗДТ процес зарядки відкладається до періоду пільгового (позапикового) періоду, тоді як при використанні ЗРЦ за запропонованою методикою знаходяться інтервали часу з найнижчою ціною ЕЕ та проводиться заряджання відповідно до цінової моделі в реальному часі.

Усі варіанти зарядки ЕМ передбачають зростання пікового навантаження будинку. При цьому керуванні з використанням базового тарифу (ЗБТ) пікове наван-

таження становить 11, 2 кВт, при використанні двозонного тарифу (ЗДТ) пікове навантаження становить 9,7 кВт, а при керуванні за поточними цінами на ЕЕ (ЗРЦ) пікове навантаження становить 8,8 кВт.

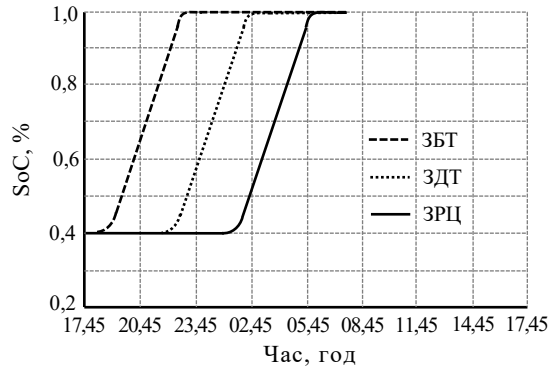


Рис. 6. Процес заряджання акумулятора за базовим тарифом (ЗБТ), заряджанням на основі двозонного тарифу (ЗДТ), заряджання з оптимізацією вартості з використанням роздрібних цін на ЕЕ (ЗРЦ)

Ефективність оптимального керування залежить від необхідних кроків часу RT для заряджання, і таким чином при використанні ЗБТ і ЗДТ відбувається суттєве зростання навантаження мережі. В той же час при використанні ЗРЦ проводиться аналіз ціни ЕЕ в режимі реального часу, щоб знайти найоптимальніші моменти часу для заряджання та уникнути перевантаження мережі.

Під час заряджання повне електричне навантаження будинку змінюється (рис. 7).

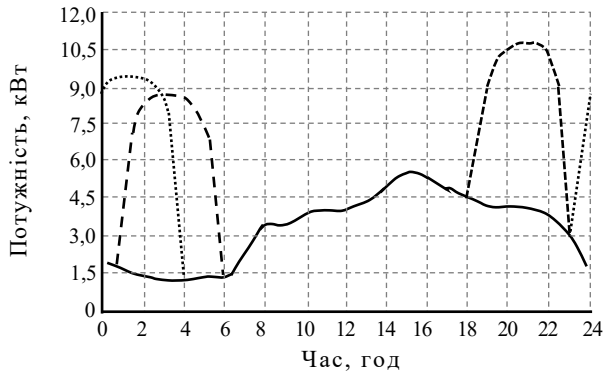


Рис. 7. Профілі електричного навантаження будинку при керуванні зарядкою ЕМ з використанням різних цін на ЕЕ

З використанням графіків заряджання та навантаження мережі виконано порівняння вартості ЕЕ на заряджання ЕМ з використанням схем ЗБТ, ЗДТ і ЗРЦ, які наведені на рис. 8.

Порівняно із зарядкою за різними тарифами ЗРЦ забезпечує оптимальну вартість заряджання і зменшує вартість заряджання на 60 та 15 грн порівняно з методами ЗБТ та ЗДТ відповідно.

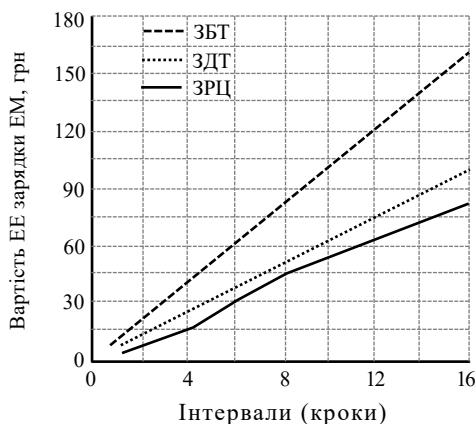


Рис. 8. Вартість заряджання з керуванням за тарифами ЗБТ, ЗДТ та ЗРЦ

Висновки

Запропоновано метод оптимізації вартості зарядки електромобілів (МОВЗЕ) у житловому секторі з використанням ціни на ЕЕ в режимі реального часу. Представлений метод МОВЗЕ передбачає розрахунок граничного максимального значення ціни ЕЕ для кожної послідовності прибуття та відправлення кожного електромобіля і, відповідно, використовується для керування процесом зарядки ЕМ, забезпечуючи оптимізацію вартості зарядки та уникнення перевантаження електричної мережі на кожному етапі зарядки. Згідно з МОВЗЕ обчислюється загальна вартість ЕЕ при зарядці АБ ЕМ до заданого рівня з урахуванням вартості ЕЕ на кожному етапі зарядки.

У середовищі MATLAB/Simulink виконано імітаційне моделювання керування заряджання ЕМ з використанням цінової моделі вартості ЕЕ в режимі реального часу та керування з використанням ЗБТ, ЗДТ та ЗРЦ. Аналіз результатів показав, що при керуванні з використанням МОВЗЕ знижується вартість заряджання порівняно з іншими методами і забезпечується уникнення перевантаження електричної мережі шляхом планування інтервалів зарядки з урахуванням навантаження електричної мережі, генерації електричної енергії ФЕС та рівня зарядки й потужності НЕ.

При моделюванні споживання і цін ЕЕ використовувалися профілі електричного навантаження домогосподарств та ціни на добу вперед для забезпечення більш точного прогнозування електричного навантаження, генерації ЕЕ на ФЕС і профілів доцільне використання штучних нейронних мереж (ШНМ) (Зінкевич, Балюта, & Куєвда, 2021; Зінкевич, Балюта, & Куєвда, 2022; Зінкевич, & Балюта, 2022). Отже, для підвищення якості керування необхідно удосконалити метод керування шляхом використання ШНМ для прогнозування електричного навантаження та ціни на ЕЕ, узгодження алгоритмів керування зарядкою ЕМ і НЕ з урахуванням потужності ФЕС та електричної мережі.

Література

Босак, А. В., Босак, А. В., Чермалих, О. В., & Дубовик, В. Г. (2021). Моделювання процесу керуваної зарядки електромобілів в умовах обмеженого електропостачання. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 3(128), 91—98. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2021.3.91-98>.

Зінкевич, П. О., Балюта, С. М., & Куєвда, Ю. В. (2021). Порівняльний аналіз методів короткострокового прогнозування електричного навантаження на один крок вперед. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 3(27), 62—77. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2021-27-3-9>.

Зінкевич, П. О., Балюта С. М., & Куєвда Ю. В. (2022). Порівняльний аналіз методів короткострокового багатокрокового прогнозування електричного навантаження. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 1(28), 77—93. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2022-28-1-9>.

Зінкевич, П. О., & Балюта, С. М. (2022). Порівняльний розрахунок потужності та вироблення електроенергії фотоелектричними станціями (ФЕС) для цивільних об'єктів та автостоянок. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 28(6), 37—48. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2022-28-6-5>.

Малогулко, Ю. В., Поліщук, А. Л., & Томашевський Ю. В. (2023). *Методи та засоби аналізу втрат електроенергії в розподільних електричних мережах з використанням пристроїв Smart Metering*. Вінниця: ВНТУ.

Ткаченко, А. М., Бугрім, О., & Данько, А. (2021). Енергоринок України: управління та тенденції розвитку. *Вісник Хмельницького національного університету*, 6(1), 241—248. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2021-30>.

Alonso, M., Amaris, H., Germain, J. G., & Galan, J. (2014). Optimal charging scheduling of electric vehicles in smart grids by heuristic algorithms. *Energies*, 7(4), 2449—2475. <https://doi.org/10.3390/en7042449>.

Andruszkiewicz, J., Lorenc, J., & Weychan, A. (2021). Price-based demand side response programs and their effectiveness on the example of tou electricity tariff for residential consumers. *Energies*, 14(2), 287. <https://doi.org/10.3390/en14020287>.

Ansarin, M., Ghiassi-Farrokhfal, Y., Ketter, W., & Collins, J. (2020). The economic consequences of electricity tariff design in a renewable energy era. *Appl. Energy*, 275, 115317. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115317>.

Dubey, A., Santoso, S., Cloud, M., & Wacławski, M. (2015). Determining time-of-use schedules for electric vehicle loads: A practical perspective. *IEEE Power Energy Technol. Syst. J.*, 2(1), 12—20. <https://doi.org/10.17023/rbfn-0s61>.

Haider, R., D'Achiardi, D., Venkataramanan, V., Srivastava, A., Bose, A., Annaswamy, A. (2021). Reinventing the utility for distributed energy resources: A proposal for retail electricity markets. *Adv. Appl. Energy*, 2, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100026>.

Hussain, S., Thakur, S., Shukla, S., Breslin, J., Jan Qasim, K., Faisal, A., Ibrar, M., & Madden, M. (2022). A heuristic charging cost optimization algorithm for residential charging of electric vehicles. *Energies*, 15(4), 1—18. <https://doi.org/10.3390/en15041304>.

Kongjeen, Y., & Bhummikittipich, K. (2018). Impact of plug-in electric vehicles integrated into power distribution system based on voltage-dependent power flow analysis. *Energies*, 11 (6), 1571. <https://doi.org/10.3390/en11061571>.

Lee, E. H. P., & Lukszo, Z. (2016). Scheduling fuel cell electric vehicles as power plants in a community microgrid. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 1—6. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2016.7856256>.

Lojowska, A., Kurowicka, D., Papaefthymiou, G., & Sluis, L. (2011). From transportation patterns to power demand: Stochastic modeling of uncontrolled domestic charging of electric vehicles. *IEEE Power and Energy Society General Meeting. IEEE*, 1—7. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039187>.

Mahmud, K., Sahoo, A., & Fernandez, E. (2020). Computational tools for modeling and analysis of power generation and transmission systems of the smart grid. *IEEE Syst. J.*, 14(3), 3641—3652. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.2964436>.

Mets, K., Verschueren, T., De Turck, F., & Develder, C. (2011). Exploiting V2Gto optimize residential energy consumption with electrical vehicle (dis) charging. IIEEE first international workshop on smart grid modeling and simulation (SGMS). *IEEE*, 7—12. <https://doi.org/10.1109/SGMS.2011.6089203>.

Nguyen, H., Song, J., Han, Zh. (2012). Demand side management to reduce peak-to-average ratio using game theory in smart grid. Proceedings IEEE INFOCOM Workshops. *IEEE*, 91—96. <https://doi.org/10.1109/INFCOMW.2012.6193526>.

Nimalsiri, N., Ratnam, E., Mediwaththe, C., Smith, D., & Halgamuge, S. (2021). Coordinated charging and discharging control of electric vehicles to manage supply voltages in distribution networks: Assessing the customer benefit. *Appl. Energy*, 291, 116857. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116857>.

Qian, K., Zhou, C., Allan, M., & Yuan, Y. (2010). Modeling of load demand due to ev battery charging in distribution systems. *IEEE Trans. Power Syst.*, 26(2), 802—810. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2057456>.

Shao, S., Pipattanasomporn, M., & Rahman, S. (2012). Grid integration of electric vehicles and demand response with customer choice. *IEEE Trans. Smart Grid*, 3(1), 543—550. <https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2164949>.

Soltani, N., Kim, S., & Giannakis, G. (2014). Real-time load elasticity tracking and pricing for electric vehicle charging. *IEEE Trans. Smart Grid*, 6(3), 1303—1313. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2363837>.

Tookanlou, M., Ali Pourmousavi Kani, S., & Marzband, M. (2021). A comprehensive day-ahead scheduling strategy for electric vehicles operation. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 131, 106912. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106912>.

Verzijlbergh, R., Lukszo, Z., & Ilic, M. (2012). Comparing different ev charging strategies in liberalized power systems. *9th International Conference on the European Energy Market*. IEEE, pp. 1—8. <https://doi.org/10.1109/EEM.2012.6254807>.

Viegas, J., Vieira, S., Sousa, J., Melicio, R., & Mendes, V. (2015). Electricity demand profile prediction based on household characteristics. *12th International Conference on the European Energy Market (EEM)*. IEEE, 1—5. <https://doi.org/10.1109/EEM.2015.7216746>.

Wang, D., Guan, X., Wu, J., & Gao, J. (2014). Analysis of multi-location pev charging behaviors based on trip chain generation. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 151—156. <https://doi.org/10.1109/CoASE.2014.6899319>.

Wang, Y., Gao, Q., Wang, G., Lu, P., Zhao, M., & Bao, W. (2018). A review on research status and key technologies of battery thermal management and its enhanced safety. *Int. J. Energy Res.*, 42(13), 4008—4033. <https://doi.org/10.1002/er.4158>.

Wang, N., Li, B., Duan, Y., & Jia, S. (2021). A multi-energy scheduling strategy for orderly charging and discharging of electric vehicles based on multi-objective particle swarm optimization. *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 44, 101037. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101037>.

Xiang, Y., Hu, S., Liu, Y., Zhang, X., & Liu, J. (2019). Electric vehicles in smart grid: a survey on charging load modelling. *IET Smart Grid*, 2(1), 25—33. <https://doi.org/10.1049/iet-stg.2018.0053>.

Yu, K., Kawabe, T., & Liang, Q. (2015). Model predictive control of plug in hybrid electric vehicles using for commuting. *54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japa (SICE)*. IEEE, 1453—1458. <https://doi.org/10.1109/SICE.2015.7285455>.

Zhang, P., Qian, K., Zhou, C., Stewart, B., & Hepburn, D. (2012). Demand response for optimisation of power systems demand due to ev charging load. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. IEEE, pp. 1—4. <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2012.6307523>.

Zhang, H., Zhao, F., Fang, K., & Sutherland, J. (2014). Energy-conscious flow shop scheduling under time-of-use electricity tariffs. *CIRP Ann.*, 63(1), 37—40. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.011>.

THE MULTI-CRITERION EVALUATION OF THE TECHNICAL LEVEL OF EQUIPMENT FOR FILLING SHELLS WITH VISCO-PLASTIC FOOD MASS

V. Musiichuk, <https://orcid.org/0009-0008-0436-0069>

O. Gavva, <https://orcid.org/0000-0003-2938-0230>

O. Chepeliuk, <https://orcid.org/0000-0001-6295-6305>

O. Chepeliuk, <https://orcid.org/0000-0002-5417-9398>

National University of Food Technologies

Key words:

Multicriterial choice

Spectral analyze

Distance to the goal

Vacuum filler

Visco-plastic food mass

Article history:

Received 04.11.2025

Received in revised form
17.11.2025

Accepted 05.12.2025

Corresponding author:

V. Musiichuk

E-mail:

almeat@ukr.net

Citation: Мусійчук В. М., Гавва О. М., Чепелюк О. М., Чепелюк О. О. (2025). Багатокритеріальне оцінювання технічного рівня обладнання для наповнення оболонки в'язко-пластичними харчовими масами. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 115—125.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-10

ABSTRACT

The selection of equipment for technological lines is a classic multi-criteria selection task. In this case, the technical and economic performance indicators of alternative equipment options are used as key criteria for decision-making. MADM methods for selecting the best alternative among modern options for machines for vacuum filling with viscous-plastic food products are discussed in the article. Six criteria were analyzed — the technical characteristics of this equipment (productivity, power, hopper capacity, weight, pressure, portioning speed) — for nine samples of equipment from leading manufacturers in Germany, Austria, Italy, etc.

To comprehensively take into account all criteria characterizing the technical level of the equipment and its operational efficiency, and to reduce the subjectivity of the assessment, two methods of multi-criteria selection were used: spectral analysis and distance to the target. Their advantages are the ability to provide a generalized mathematical assessment by comparing all specified combinations of characteristics.

The result obtained by both methods was the same: based on the selected parameters, preference should be given to the VF838S machine from Albert Handtmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG.

The correctness of the decision on the choice of equipment critically depends on the correct determination and selection of the indicators being compared. In the future, they should include not only the technical and economic characteristics declared by the equipment manufacturers, but also the performance indicators obtained during its operation — reliability, durability, and maintainability. Taking into account only technical and economic aspects can lead to the purchase of equipment that is unreliable or produces poor-quality products, especially when working with delicate materials such as natural casings.

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ НАПОВНЕННЯ ОБОЛОНОК В'ЯЗКО-ПЛАСТИЧНИМИ ХАРЧОВИМИ МАСАМИ

В. М. Мусійчук, <https://orcid.org/0009-0008-0436-0069>

О. М. Гавва, <https://orcid.org/0000-0003-2938-0230>

О. М. Чепелюк, <https://orcid.org/0000-0001-6295-6305>

О. О. Чепелюк, <https://orcid.org/0000-0002-5417-9398>

Національний університет харчових технологій

Підбір обладнання для технологічних ліній є класичною задачею багатокритеріального вибору. При цьому техніко-економічні показники роботи альтернативних варіантів обладнання використовуються як ключові критерії для прийняття рішення. В статті розглянуто методи MADM з метою вибору найкращої альтернативи серед сучасних варіантів машин для наповнення оболонок харчовими в'язко-пластичними продуктами. Проаналізовано шість критеріїв — технічних характеристик цього обладнання (продуктивність, потужність, місткість бункера, маса, тиск, швидкість порціонування), для дев'яти зразків обладнання провідних виробників Німеччини, Австрії, Італії, Словаччини. Для комплексного врахування всіх критеріїв, які характеризують технічний рівень обладнання й ефективність його роботи, та зменшення суб'єктивності оцінки застосовано два методи багатокритеріального вибору — спектрального аналізу та відстані до мети. Їх перевагами є здатність забезпечувати узагальнену математичну оцінку, порівнюючи всі визначені комбінації ознак.

Результат, отриманий обома цими методами, однаковий: за обраними параметрами перевагу слід надати машині VF838S компанії «Albert Handtmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG».

Правильність рішення щодо вибору обладнання критично залежить від коректного визначення та вибору показників, що порівнюються. В подальшому до їх числа треба включати не лише заявлені виробниками обладнання техніко-економічні характеристики, а й показники роботи, отримані при його експлуатації — надійність, довговічність, ремонтпридатність. Врахування лише технічних та економічних аспектів може призвести до придбання обладнання, яке є ненадійним або виробляє неякісну продукцію, особливо при роботі з делікатними матеріалами — натуральними оболонками. Комплексний підхід, що включає надійність, ефективність та якість продукції, забезпечує прийняття найбільш зваженого й економічно доцільного рішення в довгостроковій перспективі.

Ключові слова: багатокритеріальний вибір, метод спектрального аналізу, метод відстані до мети, обладнання для наповнення оболонок, в'язко-пластичні харчові маси.

Постановка проблеми. При компонуванні технологічних ліній для харчової промисловості потрібно обґрунтовано обирати відповідне обладнання. Його технічний рівень є характеристикою якості, а вибір обладнання з кількох альтернативних варіантів базується на зіставленні критеріїв, які характеризують технічну

довершеність. Вирішення цієї задачі багатокритеріального вибору, коли одні критерії, наприклад, продуктивність, потрібно максимізувати, а інші — мінімізувати, при цьому намагаючись досягти об'єктивності особою, яка приймає рішення, викликає складнощі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для наповнення натуральних і штучних ковбасних оболонок фаршем на м'ясопереробних підприємствах, пакування в оболонки плавленого сиру, масла та згущеного молока на молокопереробних підприємствах широко використовуються машини — вакуумні шприци, від ефективності роботи яких суттєво залежить якість отриманого продукту. Обираючи обладнання для наповнення оболонок, потрібно враховувати властивості продукту, технічні характеристики обладнання та вимоги, які висувають до виробництва.

Вибір типу дозуючого механізму — поршневий, гвинтовий, роторний (ексцентрико-лопатевий) або шестеренчастий, безпосередньо залежить від характеристик продукту (його в'язкості і консистенції, наявності та розміру включень), для формування якого потрібен певний тиск (Конюкевич, 2020). А за наявності включень (наприклад, шматочків м'яса, шпигу, сиру тощо) слід забезпечити наповнення без пошкодження структури продукту. Критичним для якості та тривалості зберігання багатьох виробів, насамперед ковбас, є мінімізація повітряних включень, що здатні забезпечити шприци з вакуумною системою (Schrader, 2024) та інтенсивним перемішуванням маси при нагнітанні (наприклад, шприци з вимішуючими шнеками). Це позитивно впливає на колір, текстуру, реологічні характеристики продукту, його дозрівання і терміни зберігання, зменшуючи окислювальні процеси у жировій тканині, а також бактеріальне зараження, покращуючи щільність батона (Kuzmin, Pasichnyi, Levkun, & Riznyk, 2017). Ще одна функція вакуумної системи — інтенсифікація надходження продукту з бункера в нагнітальний механізм і його рівномірне заповнення, що сприяє сталості дозування.

У роботі передбачено наповнення оболонок структурно однорідним продуктом, в тому числі фаршем, тому обмеження щодо типу дозуючого механізму не накладалися. Розглянуто різноманітні машини — шприци шнекові, гвинтові, спіральні, роторні тощо. Завдяки періодичності роботи і малому об'єму робочого циліндра поршневі шприци мають невелику продуктивність і не можуть забезпечити вакуумування маси, тому в цьому аналізі їх не брали до уваги. На відміну від поршневих, шприци з ексцентрико-лопатевим (роторним), гвинтовим (шнековим, спіральним) і шестеренчастим витискувачами забезпечують високу продуктивність, вакуумування маси та відсутність допоміжних операцій.

Підприємство формує плани випуску конкретної продукції з урахуванням місткості ринку збуту, вимог споживачів і бажаної ефективності, а отже, потребує обладнання відповідної продуктивності, яке забезпечує задану точність дозування та можливість роботи з різними оболонками (матеріали, розміри, формати). Досить нестандартним і перспективним є спосіб виробництва ковбасних виробів в оболонці з альгінату замість традиційних оболонок (Романюк, 2011; Marcos, Gou, Arnau, Guàrdia, & Comaposada, 2020). При цьому застосовується процес коекструзії, для реалізації якого використовують два вакуумних шприци: один для нагнітання маси продукту, інший — для оболонки.

Важливою є гігієнічність конструкції та можливість виконання якісного миття і дезінфекції обладнання. Даними, які не виносять назагал і якими володіють розробники обладнання та ті, хто його експлуатує, є показники надійності і довговічності обладнання, зручність і вартість обслуговування, доступність запчастин. Оцінити важливість цієї інформації дає можливість робота (Smirnov, & Abdilova, 2021), в якій на основі даних щодо продуктивності, доступності обладнання та якості продукції розраховано загальну ефективність роботи вакуумного шприца для виробництва ковбас — OEE становить 57%.

Обираючи обладнання для наповнення оболонок серед пропонуваного на ринку альтернатив, доводиться досягати складного компромісу між декількома критеріями, шлях до якого може полягати у використанні структурованого підходу багатокритеріального прийняття рішень MCDM — Multi-Criteria Decision Making. Його методи та інструменти для оцінки, порівняння та ранжування альтернатив роблять саму процедуру прийняття рішень й отримуваний результат більш об'єктивним та надійним.

MCDM вирішує задачі двох класів (Sahoo, & Goswami, 2023):

1) багатокритеріальне прийняття рішень (MADM — Multi-Attribute Decision Making) — вибір найкращого варіанта з дискретного набору попередньо визначених альтернатив;

2) багатокритеріальна оптимізація (MCO — Multi-Criteria Optimization) — пошук найкращого рішення в неперервному просторі можливих рішень, де альтернативи не визначені заздалегідь, а шукаються шляхом оптимізації математичних моделей.

У літературі (Belton, & Stewart, 2002; Ковальчук, 2010; Odu, & Charles-Owaba, 2013) описані методи розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації і багатокритеріального вибору, в кожного з яких є обмеження і недоліки (табл. 1), а також їх практичне застосування.

Таблиця 1. Методи розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації/вибору

Назва методу	Суть методу	Недоліки / обмеження
Метод скаляризації сукупності критеріїв, в тому числі метод аналітичних ієрархій (англ. AHP — Analytic Hierarchy Process)	Перехід до суперкритерію — вектор цільових функцій об'єднується в одну скалярну цільову функцію. Складна задача з кількома суперечливими цілями перетворюється на єдину однокритеріальну	Неможливість знайти всі оптимальні рішення для негладких або неоптимальних задач, невірні підходи до формування суперкритеріїв, а також складність адекватного визначення важливості критеріїв, яка б точно відображала вподобання особи, що приймає рішення (ОПР)
Метод головного критерію (метод пріоритетів, метод домінуючої цілі)	Один, найважливіший критерій, приймається за основний, саме за ним і ухвалюється рішення. Інші критерії переводяться в розряд обмежень із заздалегідь визначеними допустимими пороговими значеннями	Ризик прийняття неоптимальних рішень, оскільки менш важливі критерії можуть бути проігноровані або недооцінені — рішення, яке трохи гірше за головним критерієм, але значно краще за всіма іншими, не досягається. Складно визначати жорсткі порогові значення для обмежень

Метод послідовних поступок	Ітеративний підхід, при якому здійснюється поетапне звуження області допустимих рішень шляхом встановлення все більш жорстких обмежень на значення критеріїв. Процес триває доти, доки не залишиться одне або бажана кількість рішень. Відхилення від оптимального рішення за більш важливими критеріями вимагає поліпшення значень менш важливих таким чином, щоб сумарний виграв за менш важливими критеріями істотно перевищував втрату ефективності за більш важливими	Висока імовірність відсікання дійсно оптимальних варіантів, якщо початкові вимоги були необґрунтовано високими. Залежність результату від встановленої пріоритетності критеріїв. Метод не дозволяє повернутися назад і переглянути раніше прийняті обмеження без перезапуску всього процесу. Висока суб'єктивність методу
Парето-оптимальність	Набір компромісних варіантів, для яких неможливо покращити значення жодного критерію без погіршення значення принаймні одного іншого критерію. Ці рішення утворюють множину Парето або фронт Парето, який представляє найкращі можливі компроміси	Метод не надає єдиного оптимального рішення, а лише звузить коло вибору до набору непорівнянних варіантів, з яких кінцевий вибір вимагає додаткових суб'єктивних переваг ОІПР або використання інших методів
Метод ідеальної точки (реалізовано в TOPSIS, VIKOR, MOORA) (Roszkowska, & Filipowicz-Chomko, 2024)	Найкраща альтернатива повинна бути якомога ближче до позитивної ідеальної точки та якомога далі від негативної ідеальної точки	Чутливість до вибору параметрів, методу нормалізації та інтерпретації результатів
Методи переваги (реалізовано в ELECTRE, PROMETHEE)	Будують бінарне відношення переваги між парами альтернатив, використовуючи логіку згоди/незгоди	Складність реалізації та використання, чутливість до порогових значень, певна суб'єктивність

Методи порівняння альтернатив у багатокритеріальному середовищі є універсальними для вирішення багатьох типів завдань у різних галузях промисловості і сферах діяльності та дають можливість знизити рівень суб'єктивності й прискорити процес прийняття рішень. Огляд методів та інструментів MCDA для комплексного енергетичного планування в містах та територіях наведено у (Mirakyan, & Guio, 2013). Методами Парето-ефективних рішень і головного критерію вирішена задача управління в ланцюгах поставок обладнання або деталей на виробництво, завдяки чому спрощується проведення ремонтів і загалом управління технологічним процесом (Івченко, & Купін, 2021). Інтегральні оцінки альтернатив, отримані шляхом агрегування оцінок за окремими критеріями, застосовні при прийнятті стратегічних рішень у фінансовій сфері (Буряченко, & Куць, 2018). Ідеологію методу ідеальної точки задіяно при побудові плану проєкту в контексті розподілу виконавців між завданнями (Mulesa et al., 2023), визначення місця розміщення полігону твердих побутових відходів (Кузніченко, & Бучинська, 2021). У (Moretti et al., 2024) виявлено, що найбільш використовуваним методом вибору обладнання є метод аналітичного ієрархічного процесу (АІП). Методом ELECTRE ІІІ, який не допускає приховування критичних недоліків обладнання загальною високою оцінкою, обрано найбільш доцільний варіант обладнання для пакування у гнучку упаковку з урахуванням критеріїв вартості, продуктивності, якості та безпеки продукції (Cristea, & Cristea, 2017).

У більшості методів MCDM результати дуже чутливі до суб'єктивних оцінок особи, яка приймає рішення, зокрема, ваг, присвоєних різним критеріям, що може спотворити кінцевий результат багатокритеріальної оптимізації.

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні доцільності запровадження методології багатокритеріального вибору для вирішення завдань підбору технологічного обладнання при компонуванні технологічних ліній, що надасть можливість обґрунтовано приймати рішення, враховуючи найбільш важливі технічні характеристики і показники роботи.

Матеріали і методи. Об'єктом досліджень є технологічне обладнання для наповнення оболонки в'язко-пластичними харчовими масами — фаршем, сиром, маслом тощо. Для комплексного оцінювання технічного рівня такого обладнання використано методи багатокритеріального вибору — методи спектрального аналізу і відстані до мети, перевагами яких є менший суб'єктивний вплив ОНР. Технічні характеристики обладнання отримано шляхом аналізу технічної літератури, проспектів та паспортів обладнання («Vacuum filling technology VF 838 S», «PSS SFV 701/705/720», «F-line F222 F260 F266», «Omet Foodtech. Continuous vacuum filler»).

Комплексне оцінювання технічних характеристик (продуктивності, потужності, місткості завантажувального бункера, тиску, швидкості порціонування, маси обладнання) (табл. 2) проводилася для дев'яти варіантів вакуумних шприців із роторним і шнековим нагнітанням в'язко-пластичних харчових мас таких компаній, як «Albert Handtmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG», «VEMAG Maschinenbau GmbH», «Heinrich Frey Maschinenbau GmbH», «REX Technologie GmbH & Co KG», «RISCO S.p.A.», «Omet Foodtech srl», «HTS Fleischereimaschinen Reparatur und Handel Ges.mbH» та інших.

Таблиця 2. Технічні характеристики вакуумних шприців

Характеристика машини	Марка обладнання								
	Handtmann VF 838 S	Vemag HP15	Frey F-LINE F260	Rex RVF 761	Risco RS 501	Omet F20B	HTS 250	PSS SFV 705	K-Опті 2000
Номер варіанта	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉
Продуктивність, кг/год	9000	9800	7300	6100	6500	6000	5800	5020	7500
Потужність, кВт	20	15	18,3	15	12	9,5	12	8,2	9,1
Місткість бункера, л	350	350	300	350	350	260	250	120	250
Маса, кг	1550	1450	1120	1400	1120	800	630	573	695
Тиск, МПа	7,0	2,5	4,5	7,0	6,0	5,0	5,0	2,3	2,5
Швидкість порціонування, шт./хв	1000	450	1120	1200	700	800	500	350	300

Вирішення багатокритеріальної задачі оцінювання технічного рівня обладнання та вибору найбільш доцільного варіанта методом спектрального аналізу передбачає заміну множини варіантів, які порівнюються, їх моделями. Величина збіжності об'єктів обчислюється не послідовним зіставленням окремих параметрів, а зіставленням усіх можливих комбінацій параметрів, що характеризують об'єкт.

Вплив характеристик на ефективність функціонування і якість досліджуваних конструкційних виконань обладнання визначають, зважаючи на навантаження рядків (значимість об'єкта) і стовпців (значимість характеристики об'єкта) спектральної матриці. За теорією апарата тупикових тестів навантаження рядків визначають з урахуванням навантаження стовпців, а навантаження стовпців — з урахуванням навантаження рядків (Васильков, Чепелюк, & Чепелюк, 2019).

Надалі розрахунок повторюють з урахуванням знайдених значень. Обчислення припиняють при отриманні заданої збіжності ітераційного процесу.

Метод відстані до мети полягає в порівнянні кожного з альтернативних варіантів з ідеальним — гіпотетичною системою, де кожен критерій досягає свого найкращого можливого значення (теоретично обґрунтованого або реально досягнутого). Обрані критерії для кожного варіанта наносяться на радіальні шкали, причому кращі значення критерію прямують до центральної точки цієї пелюсткової діаграми. На ній з'єднанням точок для кожного конкретного варіанта, а також ідеалізованого, будують багатокутники. Шляхом порівняння площ реальних та ідеалізованого варіанта обґрунтовується вибір найбільш доцільного варіанту обладнання.

Викладення основних результатів дослідження. При розгляді ряду варіантів конструкційного виконання обладнання представимо його у вигляді матриці прийняття рішень:

$$M_{np}(S) = \begin{matrix} & k_1 & k_2 & k_3 & k_4 & k_5 & k_6 \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \\ S_8 \\ S_9 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 9000 & 20 & 350 & 1550 & 7 & 1000 \\ 9800 & 15 & 350 & 1450 & 2.5 & 450 \\ 7300 & 18.3 & 300 & 1120 & 4.5 & 1120 \\ 6100 & 15 & 350 & 1400 & 7 & 1200 \\ 6500 & 12 & 350 & 1120 & 6 & 700 \\ 6000 & 9.5 & 260 & 800 & 5 & 800 \\ 5800 & 12 & 250 & 630 & 5 & 500 \\ 5020 & 8.2 & 120 & 573 & 2.3 & 350 \\ 7500 & 9.1 & 250 & 695 & 2.5 & 300 \end{vmatrix} \end{matrix}$$

Нормуючи технічні характеристики, отримуємо матрицю рішень $M_p(S)$:

$$M_p(S) = \begin{matrix} & k_1 & k_2 & k_3 & k_4 & k_5 & k_6 \\ \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \\ S_8 \\ S_9 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0.92 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.83 \\ 1.00 & 0.75 & 1.00 & 0.94 & 0.36 & 0.38 \\ 0.74 & 0.92 & 0.86 & 0.72 & 0.64 & 0.93 \\ 0.62 & 0.75 & 1.00 & 0.90 & 1.00 & 1.00 \\ 0.66 & 0.60 & 1.00 & 0.72 & 0.86 & 0.58 \\ 0.61 & 0.48 & 0.74 & 0.52 & 0.71 & 0.67 \\ 0.59 & 0.60 & 0.71 & 0.41 & 0.71 & 0.42 \\ 0.51 & 0.41 & 0.34 & 0.37 & 0.33 & 0.29 \\ 0.77 & 0.46 & 0.71 & 0.45 & 0.36 & 0.25 \end{vmatrix} \end{matrix}$$

На основі аналізу технічних характеристик машин для наповнення оболонок (табл. 2) і матриці рішень $M_p(S)$ приймаємо критичні рівні характеристик:

$$k_{кр}^1 = 0.7, k_{кр}^2 = 0.4, k_{кр}^3 = 0.75, k_{кр}^4 = 0.5, k_{кр}^5 = 0.65, k_{кр}^6 = 0.59.$$

Тоді спектральна матриця має вигляд:

$$M_c(S) = \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \\ S_8 \\ S_9 \end{matrix} \left\| \begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} \right\|$$

Подальша схема розрахунку за отриманою матрицею наведена на рис. 1 (числа в колах позначають послідовність виконаних кроків розрахунку).

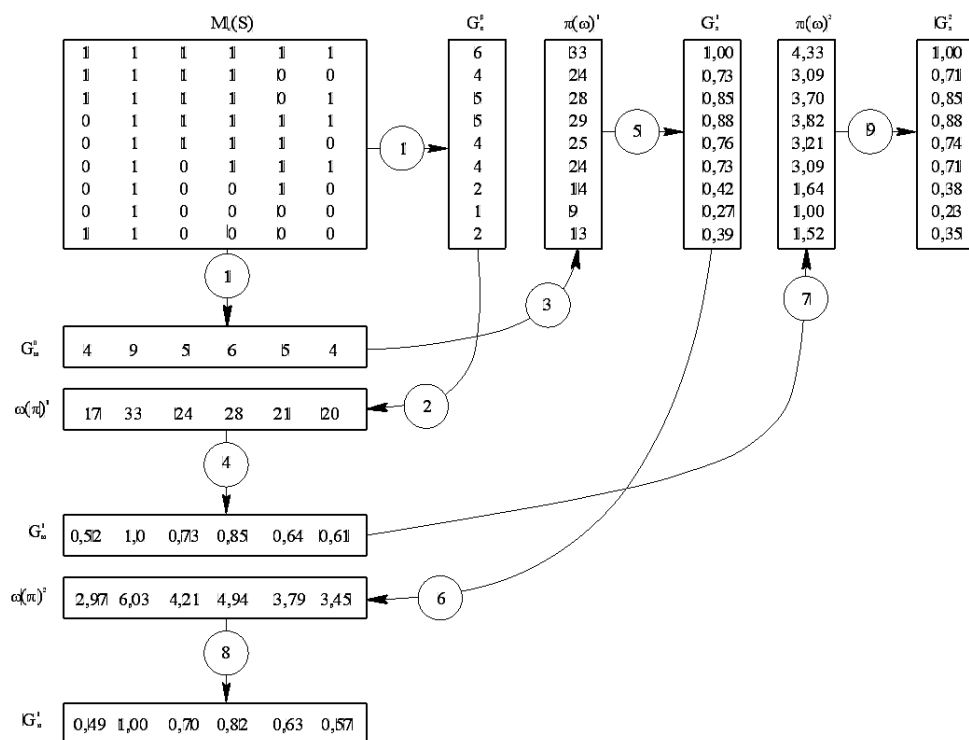


Рис. 1. Розрахункова схема вибору оптимального варіанта машини для наповнення оболонок харчовим продуктом з використанням методу спектрального аналізу

На основі проведених обчислень зроблено висновок, що при виборі шприца для наповнення оболонок в'язко-пластичними харчовими масами з варіантів, представлених в табл. 2, найкраща інтегрована оцінка 1 характерна для S_1 — машини VF838S компанії «Albert Handtmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG».

Для вирішення задачі вибору найкращого варіанта обладнання з вихідної множини дев'яти альтернативних варіантів обладнання для наповнення оболонок в'язко-пластичними харчовими масами іншим методом — відстані до мети, визначені критерії k_i відкладені на радіально розташованих шкалах (рис. 2).

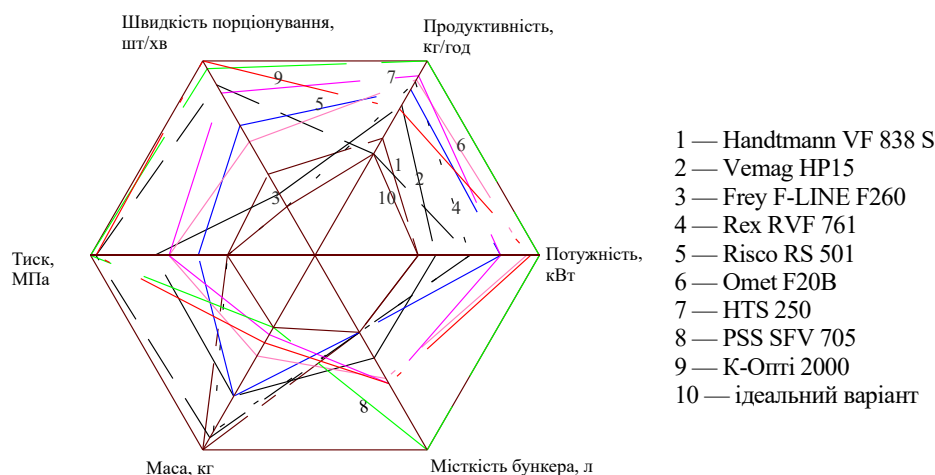


Рис. 2. Багатокритеріальний вибір технологічного обладнання методом відстані до мети

На основі графічної інформації (рис. 2) обчислені площі утворених багатокутників (табл. 3).

Таблиця 3. Узагальнений критерій відстані до мети

№ варіанта	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9
μ	1,76	3,43	2,20	2,04	2,78	3,21	3,35	4,95	4,06

Найменший узагальнений критерій відстані до мети ($\mu=1,76$) — співвідношення площ реального та ідеалізованого варіантів — має варіант S_1 — машина VF838S компанії «Albert Handtmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG». Саме вона може вважатися найкращим варіантом серед розглянутих альтернатив.

Висновки

На ринку обладнання представлено широкий спектр вакуумних шприців, які відрізняються конструктивними особливостями, продуктивністю, функціональністю та ефективністю роботи.

Процес прийняття рішень, в тому числі вибору обладнання для наповнення оболонки в'язко-пластичними харчовими масами, ускладнюється проблемами пошуку інформації, невизначеністю, суперечливістю потреб. Щоб обґрунтовано обрати найкращий у певному сенсі варіант серед множини альтернативних, варто використовувати кілька методів багатокритеріального вибору і намагатися зменшувати вплив на результат суб'єктивності оцінки.

Найдоцільнішим є застосування методів спектрального аналізу та відстані до мети як таких, що надають можливість комплексно врахувати всі критерії, які характеризують технічний рівень обладнання та ефективність його роботи.

Результати, отримані двома розглянутими методами багатокритеріального вибору (спектрального аналізу і відстані до мети), однакові: проаналізувавши шість показників (продуктивність, потужність, місткість бункера, маса, тиск, швидкість порціонування) дев'яти зразків обладнання для наповнення оболонки в'язко-пластичними харчовими масами різних виробників, встановили, що за обраними параметрами перевагу слід надати машині VF838S компанії «Albert Handtmann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG».

Правильність рішення насамперед залежить від коректного вибору показників, що порівнюються. До їх складу в подальшому обов'язково слід включати показники надійності і безвідмовності роботи обладнання, ефективність роботи з натуральними оболонками, а також якісні показники готової продукції, зокрема наявність включень повітря та збереження структури продукту.

Література

Буряченко, А. Є., & Куць, Н. В. (2018). Застосування методів багатокритеріального аналізу у стратегічному плануванні діяльності фінансових установ. *Економіка та підприємництво: збірник наукових праць*, 41, 224—236.

Васильков, В. В., Чепелюк, О. М., & Чепелюк, О. О. (2019). Багатокритеріальний вибір обладнання для формування котлетних виробів. *Наукові праці НУХТ*, 25(1), 104—115.

Івченко, Р. А. & Купін, А. І. (2021). Дослідження методів багатокритеріальної оптимізації для вибору обладнання або деталей на виробництві. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 32(71), 1(1), 67—72. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.1-1/11>.

Ковальчук, В. М. (2010). Особливості розв'язання багатокритеріальних задач прийняття рішень у нечіткому середовищі. *Наукові записки Національного університету «Острозька академія»*, 14, 447—456.

Конюкевич, В. В. (2020). Особливості вакуумних ковбасних шприців. Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». Тернопіль: ТНТУ. https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/34635/2/AZST_2020v2_Koniukevych_V_V-Vacuum_sausage_filler_149.pdf.

Кузнichenko, С. Д., & Бучинська, І. В. (2021). *Моделі, методи та інструментальні засоби багатокритеріального аналізу рішень в геоінформаційних системах*: монографія. Житомир: ТОВ «505».

Романюк, А. М. (2011). ConPro — нова реальність. *World Meat Technologies/М'ясні технології світу*, 5—6, 22—25.

Belton, V., & Stewart, T. (2002). *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Boston: Kluwer Academic Publishers.

Cristea, C., & Cristea, M. (2017). A multi-criteria decision making approach for the selection of a flexible packaging equipment. *MATEC Web of Conferences*, 94, 06003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179406003>.

Omet Foodtech. Continuous vacuum filler. Взято з: <https://paragonpsl.com/wp-content/uploads/2017/02/F20-F300-Brochure.pdf>.

F-line F222 F260 F266. Взято з: https://www.frey-maschinenbau.de/files/UPLOAD/PDFs/F222_F260_F266%20-%20EN.pdf.

Kuzmin, O., Pasichnyi, V., Levkun, K., & Riznyk, A. (2017). Determination of the factor space of the process of extrusion of sausage products. *Ukrainian Journal of Food Science*, 5(1), 54—62. <https://doi.org/10.24263/2310-1008-2017-5-1-8>.

Marcos, B., Gou, P., Armau, J., Guàrdia, M. D., & Comaposada, J. (2020). Co-extruded alginate as an alternative to collagen casings in the production of dry-fermented sausages: Impact of coating composition. *Meat Science*, 169. <https://doi.org/108184>. 10.1016/j.meatsci.2020.108184.

Mirakyan, A., & Guio, R. (2013). Integrated energy planning in cities and territories: A review of methods and tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 289—297. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.033>.

Moretti, V., Luiz, A., Alves, B., Hluszko, C., Kovaleski, J., & Colmenero, J. (2024). *Multi-criteria decision-making for equipment selection: A review*. Materiais do XIV Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção (CONBREPRO). Ponta Grossa: APREPRO.

Mulesa, O., Horvat, P., Radivilova, T., Sabadosh, V., Baranovskiy, O., & Duran, S. (2023). Design of mechanisms for ensuring the execution of tasks in project planning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 16—22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277585>.

Odu, G. O., & Charles-Owaba, O. E. (2013). Review of Multi-criteria Optimization Methods — Theory and Applications. *IOSR Journal of Engineering*, 3(10), 1—14. <https://doi.org/10.9790/3021-031020114>.

PSS SFV 701/705/720. Взято з <https://www.compass-tr.com/wp-content/uploads/2022/08/PSS-Speed-Fillers-Vacuum-2018-EN.pdf>.

Roszkowska, E., & Filipowicz-Chomko, M. (2024). A Multi-Criteria Method Integrating Distances to Ideal and Anti-Ideal Points. *Symmetry*, 16(8), 1025. <https://doi.org/10.3390/sym16081025>.

Sahoo, S. K., & Goswami, S. S. (2023). A Comprehensive Review of Multiple Criteria Decision-Making (MCDM) Methods: Advancements, Applications, and Future Directions. *Decision Making Advances*, 1(1), 25—48. <https://doi.org/10.31181/dma1120237>.

Schrader, K. D. (2024). *A Marlen technical review: Implications of Insufficient Air Removal in Meat and Poultry Products*. Downers Grove: Marlen. Взято з: https://marlen.com/wp-content/uploads/2024/05/Technical-Review_Implications-of-Insufficient-Air-Removal-in-Meat-and-Poultry-Products.pdf.

Smirnov, M., & Abdilova, G. (2021). Ways of improvement of technological equipment performance. *Theory and practice of meat processing*, 6(1), 87—96. <https://doi.org/10.21323/2414-438X-2021-6-1-87-96>.

Vacuum filling technology VF 838 S. Взято з: https://www.pl.processing.handtmann.com/_Resources/Persistent/2/7/4/2/274244f2605c4486fdebcdd1d3cfb30ee477bada2/668_20160407135331_2_Ei_nzelprospekt_VF838S_A4_EN_RZ.pdf.

ADVANCING CARNOT BATTERIES FOR LONG-DURATION RENEWABLE ENERGY STORAGE

V. Chubenko, <https://orcid.org/0009-0000-9722-9335>

Odesa National University of Technologies

N. Ivashchenko, <https://orcid.org/0009-0006-9561-062X>

V. Bondar, <https://orcid.org/0009-0000-9722-9335>

National University of Food Technologies

Key words:

*Renewable energy storage
Carnot batteries
Energy conversion
Renewable energy
systems integration*

Article history:

Received 13.11.2025

Received in revised form
25.11.2025

Accepted 16.12.2025

Corresponding author:

V. Bondar

E-mail:

ivanovish976@gmail.com

Citation: Чубенко В. В.,
Івашченко Н. В., Бондар В. І.
(2025). Перспективи вдосконалення батарей Карно для довготривалого зберігання відновлюваної енергії. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 126—146.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-11

ABSTRACT

Renewable energy storage represents a complex set of technologies for medium- and long-term electricity storage, based on the conversion of electrical energy into heat, accumulation of thermal energy, and subsequent reconversion of heat into electricity when required. Although these energy conversion concepts have been known since the nineteenth century, only recent years have been characterized by intensive development of this field, driven by the increasing penetration of renewable energy sources into power systems and the growing demand for large-scale electricity storage.

Compared to traditional storage methods, such as pumped hydro energy storage and electrochemical batteries, these technologies generally exhibit lower round-trip efficiency. However, they offer significant advantages, including low-cost large-scale thermal energy storage, high scalability, and a long service life comparable to that of conventional thermal power plants. These features make thermal-based storage technologies particularly attractive for future energy systems with a high share of variable renewable generation.

Of particular interest in current research are Carnot batteries, which integrate heat pumps, thermal energy storage units, and heat engines into a single closed energy cycle. It is the level of their commercial maturity and technical and economic indicators that largely determine the prospects for the widespread implementation of such technologies in modern and future energy systems with a high share of renewable generation, which will allow for more efficient energy storage, make renewable energy more reliable, and move closer to a sustainable, decarbonized future. The fundamental principles, classification approaches, and system-level implications of Carnot battery concepts are stated in the paper.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-11

ПЕРСПЕКТИВИ ВДОСКОНАЛЕННЯ БАТАРЕЙ КАРНО ДЛЯ ДОВГОТРИВАЛОГО ЗБЕРІГАННЯ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ

В. В. Чубенко, <https://orcid.org/0009-0000-9722-9335>

Одеський національний технологічний університет

Н. В. Іващенко, <https://orcid.org/0009-0006-9561-062X>

В. І. Бондар, <https://orcid.org/0009-0000-9722-9335>

Національний університет харчових технологій

Акумуляція енергії відновлюваних джерел — це складний комплекс технологій середньо- та довготривалого зберігання електроенергії, що базуються на перетворенні електричної енергії в теплову, акумуляованні теплової енергії та подальшому зворотному перетворенні теплової енергії в електричну в разі необхідності. Незважаючи на те, що технології перетворення широко відомі ще з XIX століття, лише останні роки характеризуються інтенсивним розвитком цієї галузі, що зумовлено зростанням використання відновлюваних джерел енергії в енергосистемах і зростаючою потребою в масштабному зберіганні електроенергії.

Порівняно з традиційними методами накопичення, зокрема насосними гідро-акумулявальними електростанціями й електрохімічними батареями, зазначені технології вирізняються нижчою ефективністю, однак мають суттєві переваги у вигляді низької вартості акумуляування теплової енергії у великих масштабах, високої масштабованості й тривалого терміну служби, порівнянного з тепловими електростанціями.

Особливу увагу в сучасних дослідженнях привертають батареї Карно, які поєднують теплові насоси, системи теплового акумуляування й теплові двигуни в єдиний енергетичний цикл. Саме рівень їх комерційної зрілості та техніко-економічні показники значною мірою визначають перспективи широкого впровадження таких технологій у сучасні та майбутні енергетичні системи з високою часткою відновлюваної генерації, що дозволить ефективніше зберігати енергію, зробити відновлювану енергію надійнішою та наблизитися до сталого, декарбонізованого майбутнього. У статті основну увагу приділено фундаментальним принципам функціонування, підходам до класифікації та системним аспектам реалізації концепцій батарей Карно, а також аналізу їх ролі у формуванні енергетичних систем з високою часткою відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова: акумуляція енергії відновлюваних джерел, батареї Карно, перетворення енергії, інтеграція відновлюваної енергетики.

Постановка проблеми. За прогнозами аналітиків (IEA, 2025), джерела чистої енергії у світовому виробництві електроенергії мають усі шанси побити нові рекорди протягом прогнозованого періоду 2025—2027 років. Очікується, що джерела з низьким рівнем викидів — відновлювані джерела енергії (ВДЕ) та ядерна енергетика, задовольнять усе зростання світового попиту до 2027 року.

Однак така принципова зміна може призвести до нової проблеми, пов'язаної з нестабільністю енергопостачання: виробництво сонячної, вітрової та гідроенергії

є періодичним (залежить від часу доби, сезонності, наявності опадів тощо), тому обсяг постачання є непостійним, і, як наслідок, виникають невідповідності між пропозицією та попитом на енергію в години максимального споживання. Зважаючи на це, зростання частки відновлюваних джерел у виробництві теплової та електричної енергії супроводжується зростанням вимог до систем зберігання (накопичення) енергії. Наприклад, літєві батареї забезпечують високу ефективність (до 95%) накопичення енергії, однак для мережевого застосування вони економічно вигідні при короткотривалій роботі — не більше, ніж на кілька годин через високу вартість одиниці потужності. Термін служби електрохімічних батарей додатково підкреслює необхідність пошуку інших рішень.

З огляду на зростаючу потребу в накопиченні значного обсягу енергії на довготривалій період батареї Карно пропонуються як потенційно економічно ефективне рішення для енергетичних систем різного масштабу та розглядаються в перспективі наукових досліджень технологій акумуляції енергії відновлювальних джерел.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Окремим напрямом у наукових дослідженнях є порівняння батарей Карно з іншими технологіями зберігання енергії. У літературі відзначається, що на фоні таких традиційних методів, як гідроакумлюючі станції, електрохімічні батареї та механічні накопичувачі, Pumped Thermal Electricity Storage (PTES) вирізняються потенційно нижчою вартістю зберігання у випадку тривалих циклів, використанням доступних матеріалів і можливістю інтеграції з існуючою тепловою інфраструктурою (Dumont та ін., 2020; Benato, & Stoppato, 2018). Дослідники часто підкреслюють, що гідроакумлюючі системи залишаються найбільш зрілими й масштабними, проте їхній подальший розвиток обмежений географічними умовами (Connolly, Lund, & Mathiesen, 2020). Натомість літій-іонні акумулятори забезпечують високу швидкість реагування (Stanchev, & Hinov, 2025), але мають обмежену тривалість зберігання та високу вартість у масштабах довготривалого накопичення (Denholm, 2023). У цьому контексті батареї Карно розглядаються як перспективна альтернатива довготривалого накопичення енергії — від годин до діб і більше, що зумовлює їхній зростаючий науковий і практичний інтерес (Vecchi та ін., 2022).

За останні роки тема батарей Карно (Carnot Batteries, CB) привертає дедалі більше уваги дослідників у контексті розвитку відновлюваної енергетики та потреби в надійному довготривалому зберіганні електроенергії. Якщо перші дослідження мали переважно теоретичний характер і були зосереджені на аналізі термодинамічних циклів, то публікації останнього десятиріччя демонструють поступовий перехід від теоретичних моделей до експериментальних і демонстраційних установок (Novotny, Basta, Smola, & Spale, 2022; Hu, Yang, Li, & Duan, 2021).

У більшості сучасних оглядів зазначається, що найбільш усталеним підходом до класифікації Carnot Batteries є поділ на чотири основні групи, який адекватно відображає різноманіття технічних рішень і дозволяє простежити вплив різних термодинамічних підходів на ефективність та можливості практичного застосування систем (Dumont та ін., 2020; Benato, & Stoppato, 2018).

Найбільший масив публікацій присвячений системам Brayton-PTES, у яких основна увага приділяється рекуперації тепла, оптимізації параметрів стиснення та вибору робочого газу, зокрема систем на основі надкритичного CO₂ (Guo, Zhang,

Xu, Zhou, & Chen, 2024; Chen, Wang, & Zhu, 2022). Системи Rankine-PTES розглядаються ширше, оскільки охоплюють як водяні пари, так і органічні робочі тіла. Дослідження останніх років фокусуються на підвищенні температур робочого тіла, удосконаленні теплообмінників і підвищенні загальної ефективності циклу (Erpinger та ін., 2021). Попри активний розвиток, більшість реалізованих проєктів у цих напрямках залишаються на демонстраційному рівні.

Системи Liquid Air Energy Storage (LAES) вирізняються тим, що вже мають приклади реальних промислових впроваджень, підтверджуючи технічну здійсненість концепції довготривалого зберігання енергії (O'Callaghan, & Donnellan, 2021; Agyekum, & Odoi-Yorke, 2024).

Праці, віднесені до категорії «Other concepts», охоплюють інноваційні підходи, що виходять за межі класичних термодинамічних циклів і спрямовані на підвищення енергетичних характеристик систем, однак наразі ці дослідження перебувають на початкових стадіях і впровадження (Airò Farulla, Motta, & Zunino, 2020).

Підсумовуючи аналіз наукових публікацій, можна відзначити, що сфера PTES активно розвивається, поєднуючи класичні та інноваційні термодинамічні підходи. Хоча окремі напрями, насамперед LAES та Brayton-PTES, демонструють реальні кроки в напрямі практичного впровадження, більшість концепцій усе ще перебуває на стадії досліджень, що визначає актуальність подальших досліджень, спрямованих на підвищення ефективності, масштабування систем та обґрунтування їх економічної доцільності в реальних умовах.

Метою дослідження є аналіз сучасного стану розвитку батарей Карно як технології довготривалого зберігання енергії, узагальнення основних термодинамічних підходів і визначення перспектив їх практичного впровадження в енергетичних системах з високою часткою відновлюваних джерел енергії.

Матеріали і методи. Для проведення огляду використано публікації, присвячені технологіям акумулювання енергії на основі батарей Карно, опубліковані переважно у 2020—2025 роках. Матеріалами слугували статті з рецензованих наукових журналів, аналітичні звіти міжнародних організацій і відкриті інженерні джерела. Пошук здійснювався у базах Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect та SpringerLink за ключовими словами: Carnot batteries, pumped thermal energy storage, Brayton PTES, Rankine PTES, LAES, long-duration energy storage.

До аналізу включали праці, що містили опис принципів функціонування систем, характеристик робочих середовищ, параметрів ефективності, а також дані щодо демонстраційних або промислових впроваджень.

Аналіз здійснювався методом систематизації, відібрані дані узагальнювалися за ключовими технологічними напрямками: Brayton-PTES, Rankine-PTES, LAES та Other concepts. Для порівняння розглядалися такі параметри, як енергоефективність, температурні режими, енергетична щільність, масштабованість і рівень технологічної готовності.

Результати дослідження. Динамічний розвиток енергетичного ринку є результатом економічних, технологічних і політичних факторів. Сегмент органічного палива є однією з основних його частин, що має свої технічні та економічні фактори. Необхідність переходу від викопних до відновлювальних джерел зумовлена вичерпністю ресурсів, потребою скорочення викидів парникових газів і глобальним

трендом на формування сталої низьковуглецевої енергетичної системи (Serrano, & Zaveri, 2020; Holecchek, Geli, Sawalhah, & Valdez, 2022; Wolf та ін., 2025).

Акумуляція енергії ВДЕ — це низка технологій, що дозволяють суттєво збільшити термін зберігання (накопичення) електроенергії.

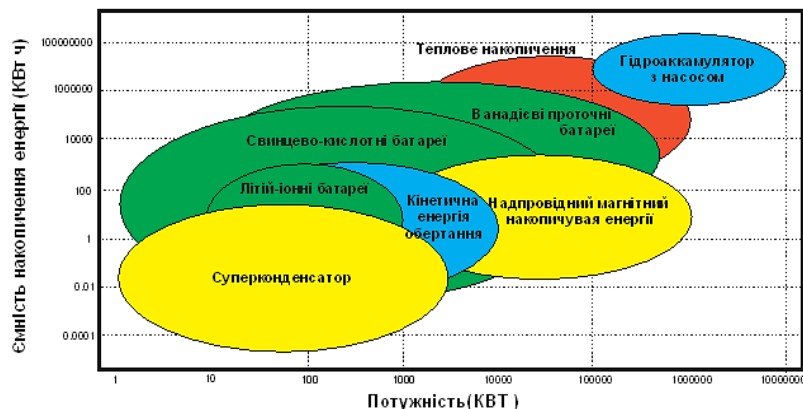


Рис. 1. Існуючі технології акумуляції

В останні роки ця галузь переживає активний розвиток, який пов'язують, головним чином, із швидко зростаючим сегментом відновлюваних джерел енергії на ринку енергопостачання та необхідністю зберігання електроенергії у складних умовах (Ember, 2025; DNV, 2025). Наразі доступно кілька рішень для зберігання електроенергії (рис. 1) в мережевому масштабі (McTigue, 2019).

Технології накопичення енергії (ТНЕ) охоплюють різноманітні механізми і принципи, а їх класифікація, зазвичай, залежить від форми, в якій енергія зберігається, перетворюється та передається (Liu та ін., 2025). Як правило, ці технології можна систематично розділити на механічні, електромагнітні, електрохімічні, теплові та хімічні методи зберігання енергії, як показано на рис. 2.

Механічні технології зберігання енергії зберігають енергію за допомогою фізичних механізмів, таких як гравітаційний потенціал, кінетичний рух або стислі гази. Електромагнітні системи зберігання енергії використовують електричні або магнітні поля для швидкого заряджання та розряджання. Електрохімічне зберігання енергії включає хімічні реакції всередині акумуляторів або осередків, що забезпечує ефективне перетворення та зберігання електроенергії.

Теплові методи зберігання енергії ґрунтуються на теплоємності, прихованій теплоті або термохімічних процесах, що дозволяє тимчасово зберігати теплову енергію за різних температур.

Хімічне зберігання енергії використовує хімічні зв'язки, яскравим прикладом яких є водень, що дозволяє зберігати енергію за допомогою процесів хімічного синтезу та розкладання. Кожна категорія цих технологій має різні технічні характеристики, діапазони ефективності, експлуатаційну гнучкість, масштабованість та економічні наслідки. Розуміння цих характеристик полегшує вибір оптимальних рішень щодо зберігання енергії, що відповідають конкретним сценаріям застосування та вимогам.

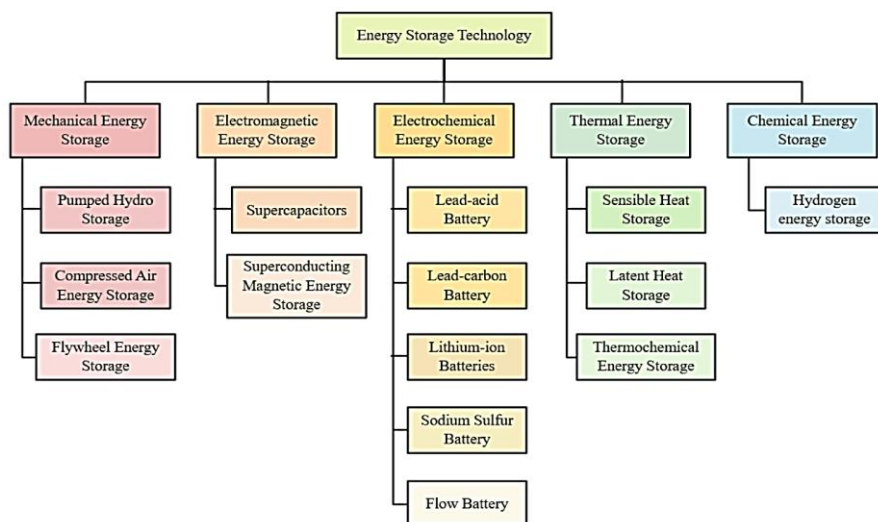


Рис. 2. Класифікація технологій накопичення енергії

Класифікація ТНЕ, упорядкована за ступенем їх поточної технологічно-комерційної готовності («зрілості», доступності) до впровадження, представлена в табл. 1 (Фіалко, & Тимченко, 2017; Мирутенко, & Лістовщик, 2022). За прогнозами Bloomberg NEF, до 2040 року потужності систем накопичення енергії у світі перевищать 1 ТВт. Завдання накопичувачів енергії — оптимізація виробництва електроенергії за рахунок вирівнювання навантаження в енергомережі в періоди пікового та зниженого споживання. За даними International Hydropower Association (ІНА), станом на сьогодні у світі встановлено до 9 000 ГВт·год накопичувальної енергії на гідро-акумулювальних електростанціях (PSH), які забезпечують понад 94% глобальної потужності систем зберігання енергії, але подальше розгортання прив'язане до сприятливих географічних локацій (International Hydropower Association, 2024).

Таблиця 1. Основні технології і засоби накопичення енергії

1.	ГАЕС
2.	Акумуляторні батареї Рb-кислотні
3.	«Ямні» накопичувачі
4.	Накопичення холодної води
5.	Підземні накопичувачі
6.	Побутові нагрівачі з накопичувачами ГВ
7.	Накопичення енергії стиснутого повітря (CAES)
8.	Акумуляторні батареї Na-S
9.	Накопичення льоду
10.	Маховики низькошвидкісні
11.	Розплавлена сіль
12.	Акумуляторні батареї на основі Li
13.	Акумуляторні батареї проточні
14.	Маховики високошвидкісні
15.	Іоністори (суперконденсатори)
16.	Надпровідниковий магнітний акумулятор (SMES)
17.	Адіабатичний накопичувач енергії стисненого повітря (CAES)

Серед технологій, що викликають найбільший науковий і практичний інтерес, варто відзначити (Dumont та ін., 2020): акумулювання енергії з використанням стисненого повітря (CAES) (Budt, Wolf, & Span, 2020); гідроакумулювальних електростанцій з використанням морської води (PHES) (Connolly, Lund, & Mathiesen, 2020); батареї на основі розплавлених солей натрію та рідких електролітів (так звані проточні батареї) (Zhang та ін., 2018); акумулювання енергії з використанням зрідженого повітря (LAES) (O'Callaghan, & Donnellan, 2021); батареї Карно (Benato, & Stoppato, 2022; Dumont та ін., 2020).

Основою роботи батарей Карно є процеси перетворення енергії в теплову енергію, збереження її в середовищах-накопичувачах, таких як вода або сольовий розчин, і подальше перетворення теплової енергії в електричну за вимогою. Технологія, що має понад сторічну історію, і раніше була відома як «накопичування теплової електроенергії з перекачуванням» (PTES) або «накопичування теплової електроенергії з перекачуванням» (PHES), отримала оновлену назву «батареї (акумулятори) Карно» у 2018 році на International Workshop on Carnot Batteries і з тих пір розглядається як окремий напрямок досліджень та розвитку (Vandersickel та ін., 2024). Використання таких батарей — це не стільки нова технологія, скільки новий варіант використання та поєднання існуючих технологій.

Потужність батарей Карно охоплює діапазон систем від кВт до ГВт. Зокрема, в літературі наведені приклади лабораторних прототипів Carnot Battery потужністю 10—100 кВт, розроблених провідними науковими установами (Benato, & Stoppato, 2022). Поряд із цим уже реалізуються та проєктуються промислові системи в діапазоні десятків мегават, наприклад, рішення компанії Stolect для інтеграції з відновлюваними джерелами енергії (Novotny, Basta, Smola, & Spale, 2022). У стратегічних дослідженнях Міжнародного енергетичного агентства зазначено, що технологія має потенціал масштабування до сотень мегават і навіть гігават, що ставить її в один ряд із традиційними системами гідроакумулювання та CAES (Manz та ін., 2024). У звіті International Energy Agency Technology Collaboration Programme on Energy Storage (2023) аналітики відмічають, що ця технологія є не тільки варіантом реалізації недорогого зберігання електроенергії в середніх і великих масштабах, а наголошують на тому, що вона є географічно та кліматично незалежною, оскільки не потребує специфічних природних умов, таких як рельєф місцевості чи наявність водойм. Така універсальність забезпечує можливість її впровадження у будь-яких регіонах, включно з територіями із суворими кліматичними умовами.

Такий варіант технічного рішення буде актуальним в умовах воєнних дій і криз, коли енергосистема стикається з руйнуваннями й перебоями. Приклади реалізації децентралізованих енергетичних систем (микрогридів) в Україні довели свою ефективність у підтриманні безперебійного живлення під час атак на інфраструктуру. Carnot Batteries можуть доповнювати ці підходи, забезпечуючи стабільне, автономне енергоживлення, підвищуючи таким чином енергетичну безпеку (Solar Impulse Foundation, 2024; German Aerospace Center, 2022; Baineson, 2024).

В останніх публікаціях LDES Council (Ради з довготривалого зберігання енергії) зазначається, що технології СВ (PTES, Pumped-Thermal Energy Storage) розглядаються як перспективний напрям довготривалого накопичення енергії (LDES Council, & McKinsey, & Company, 2021; LDES Council, 2024; LDES Council, 2025). Відмічено, що їх застосування охоплює:

1. Функціональне призначення:
 - балансування генерації відновлюваних джерел енергії;
 - забезпечення тривалості віддачі потужності понад 10 годин;
 - потенційна заміна газових пікових електростанцій;
 - електрифікація промислових теплових навантажень на основі циклу «тепловий насос → теплове акумулювання → виробництво тепла/ електроенергії».
2. Основні ринки застосування:
 - електричні мережі (з коефіцієнтом корисної дії 30—60%);
 - промислові технологічні процеси;
 - системи теплопостачання та водопостачання;
 - когенераційні системи.
3. Ключові переваги:
 - відносно низька вартість використовуваних матеріалів;
 - відсутність географічних обмежень;
 - висока масштабованість;
 - можна використовувати дешеві, стійкі, нетоксичні матеріали для зберігання;
 - можливість комбінованого виробництва теплової та електричної енергії, гарна інтегрованість з іншими системами.

Як згадувалося вище, термін «батареї Карно» (Carnot batteries, CB) охоплює сукупність технологій, що ґрунтуються на спільному принципі: електрична енергія перетворюється на теплову ексергію, накопичується в системах теплового зберігання енергії (TES), а за потреби знову перетворюється на електричну енергію. Відповідно до цього принципу, в літературі також застосовують альтернативні назви, зокрема: power-to-heat-to-power (P2H2P) або electro-thermal/electric-thermal energy storage (ETES). Але треба точно розуміти, що CB є технологією саме електричного накопичення енергії (EES). Відтак вона повинна обов'язково мати щонайменше електричний вхід та електричний вихід. Її ефективність може бути підвищена шляхом використання додаткових теплових джерел енергії під час фаз заряджання або розряджання, але це не повинно змінювати її основної мети накопичення електричної енергії (Dumont та ін., 2020).

Узагальнений принцип роботи CB (рис. 3) полягає в тому, що електрична енергія (на вході) використовується для створення різниці температур між двома середовищами — резервуаром низької температури (LT) і високої температури (HT). У такий спосіб відбувається заряджання накопичувача, і електрична енергія зберігається у формі теплової ексергії. Під час руху теплового потоку проти температурного градієнта виконується робота для заряджання накопичувача. На етапі розряджання CB тепла ексергія вивільняється завдяки теплопередачі від резервуара високої температури (HT) до резервуара низької температури (LT). Тепловий потік приводить у дію теплову машину (HE), яка перетворює його на роботу та відводить залишок теплоти до низькотемпературного резервуара. Таким чином частина електричної енергії, поданої на вхід, повертається.

На практиці описаний процес може реалізовуватися за допомогою різних технологій. Резервуари високої та низької температури можуть бути фізичними ємностями, заповненими газом, рідиною, твердими або фазооборотними матеріалами.

В окремих випадках один із резервуарів може бути відсутнім, і його функцію виконуватиме навколишнє середовище.

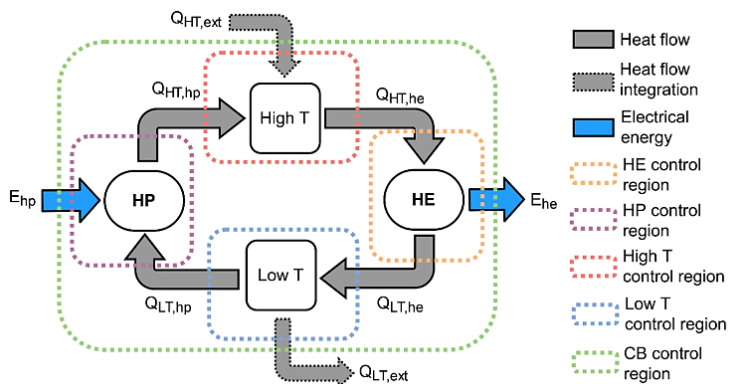


Рис. 3. Загальний принцип акумуляторних систем Carnot batteries

Отже, процеси заряду та розряду СВ включають, відповідно, пряме та зворотне перетворення між електроенергією й теплою, тоді як фаза накопичення складається зі зберігання теплової енергії (TES).

Існує декілька концепцій термомеханічного накопичення теплової енергії, таких як накопичувач енергії в рідкому повітрі (LAES), насосний накопичувач теплової енергії (PTES) та його варіації (Olympios та ін., 2021), накопичувач Ламма-Хонігмана (LHS) (Thiele, Jahnke, & Ziegler, 2020), системи, засновані на циклі Ренкіна (Meroueh, & Chen, 2020) тощо, що утворюють розгалужену варіацію видів Carnot batteries.

Різноманітність концепцій СВ потребує чітких критеріїв класифікації (Lamm, & Honigmann, 2019; Borri, Tafone, Zsembinszki, Comodi, & Romagnoli, 2020; Nunes, 2025). У загальному випадку системи можна класифікувати за кількома ключовими аспектами: 1. Метод зарядки. 2. Систем зберігання теплової енергії. 3. Метод розряду. 4. Конфігурація системи.

На рис. 4 подано одну з можливих класифікацій технологій Carnot Battery (Novotny, Basta, Smola, & Spale, 2022), яка виокремлює чотири основні групи батарей залежно від типу теплового циклу або принципу перетворення енергії.

Carnot Battery (CB)	Brayton PRES
	приклади: оборотні машини, резистивний нагрів
	Rankine PRES
	приклади: транскритичні, субкритичні системи
LAES	LAES
	приклади: автономні, інтегровані
	Інші концепції
	приклади: Lamm-Honigmann, термохімічні

Рис. 4. Класифікація батарей Карно

Теплоакumuлюючі системи типу СВ, реалізовані на основі циклу Брайтона (Brayton PTES), як правило, поєднують тепловий насос Брайтона з тепловим двигуном Брайтона (рис. 5).

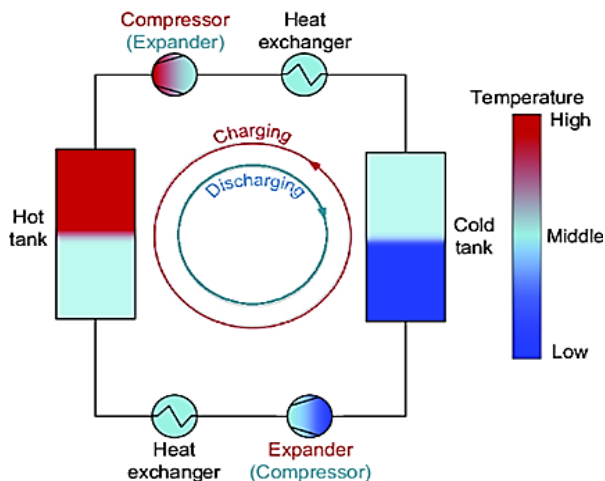


Рис. 5. Конфігурація PTES на основі циклу Брайтона

У режимі заряджання система функціонує як інверсний цикл Брайтона, що передбачає взаємодію двох резервуарів — високотемпературного (HT) та низькотемпературного (LT). У базовій (класичній) конфігурації Brayton PTES містить чотири турбомашини — два компресори та два розширювачі, а також два терморезервуари. Також можливими варіантами є система з використанням лише двох турбомашин або застосування двопоршневого приводу.

Принцип роботи такої системи: під час зарядки тепла енергія переноситься з LT- до HT-резервуара внаслідок стиснення газу, при цьому споживання енергії компресором перевищує вироблення її розширювачем.

Різні системи зберігання енергії, отримані з циклу Брайтона з термодинамічним та ексергетичним аналізом представлені в (Guo та ін., 2024). Brayton PTES характеризується максимальною температурою робочого середовища $\sim 1000^\circ\text{C}$ (HT-резервуар) та мінімальною $\sim -70^\circ\text{C}$ (LT-резервуар); ступінь стиснення/розширення $\sim 4,6$, ефективність $\sim 60\text{—}70\%$.

Найпоширенішим робочим середовищем є аргон, однак дослідження циклів з використанням повітря як робочого середовища показали вищі показники ефективності (Benato, & Stoppato, 2018; Krüger, 2024).

Надкритичний sCO_2 у циклі Брайтона почали активно застосовувати в системах акумулювання енергії (TES/PTES) з початку 2020-х років, коли з'явилися перші термодинамічно й економічно обґрунтовані конфігурації на основі sCO_2 (Chen, Wang, & Zhu, 2022; Gokon, Ozawa, & Yamamoto, 2022). У 2022—2023 роках було продемонстровано, що поєднання надкритичного CO_2 з тепловими акумуляторами суттєво підвищує ефективність технології Brayton-PTES, зокрема завдяки можливості інтеграції з відхідним теплом промислових процесів і високотемпературними TES-середовищами (Khalilpour, & Wang, 2023; Tang, Li, Wang, & Yu, 2024).

Надкритичний CO₂ забезпечує високу густину, низьку стискуваність і ефективну міжпотокову регенерацію тепла, що зменшує втрати при стисканні та підвищує загальний термічний ККД системи. Завдяки цьому системи на основі sCO₂ характеризуються високою енергоефективністю, компактністю обладнання та стабільністю роботи в широкому діапазоні температур заряду й розряду (You, Tatli, & Metghalchi, 2025; Liu, Zhang, Xu, Han, & Shen, 2025).

Найбільш повний техніко-економічний огляд Brayton PTES представлений у (McTigue, Farres-Antunez, Sundarnath, Markides, & White, 2022), де виконано аналіз для кожного компонента, з особливим акцентом на теплообмінниках, наведені економічні показники, зокрема капітальні витрати на електроенергію (тобто витрати на кВт потужності та кВт·год енергоемності), а також приведена вартість акумулювання. Показано, що використання теплообмінників з ефективністю до 0,95 є економічно виправданим, тоді як подальше зростання цього показника призводить до швидкого збільшення розмірів компонентів і вартості системи. Розглянуто декілька видів рідин для акумулювання, в тому числі ті, що працюють за найвищих температур (хлоридні солі), і проаналізована доцільність їх використання. Автори зазначають, що в цьому циклі можливо досягнути ефективність повного циклу в діапазоні 59—72%, а приведена вартість за строк служби є порівнюваною з літій-іонними батареями за тривалості розрядження понад 6 годин за сучасних умов.

Єдиним реалізованим проектом є виготовлена у Великій Британії демонстраційна установка PTES мережевого масштабу на основі циклу Брайтона потужністю 150 кВт/600 кВт·год на замовлення Ньюкаслського університету (Newcastle University, 2017; Utility Week, 2019).

Треба зазначити, що цикли Джоуля—Брайтона в системах акумулювання тепла є обмеженими для альтернативних (низькопотенційних) джерел енергії, оскільки їх ефективність критично залежить від високих робочих температур. Низькотемпературні потоки не здатні забезпечити необхідний температурний рівень, що призводить до значних ексергетичних втрат, зниження ККД та економічної недоцільності.

Система Pumped Thermal Energy Storage (PTES), заснована на циклі Ренкіна, здійснює двостороннє перетворення енергії, а її робота розподіляється на два основні режими: зарядження та розрядження, що об'єднані через високотемпературний (HT) та низькотемпературний (LT) теплові резервуари (рис. 6) (Eppinger, Steger, Regensburger, Karl, Schlücker, & Will, 2021; Petrollese Cascetta, Tola, Cocco, & Cau, 2022; Rabi, Radulovic, & Buick, 2023).

У режимі зарядження система працює як тепловий насос, використовуючи електричну енергію для створення температурного градієнта між тепловими резервуарами. При цьому робочий агент стискається в компресорі, що супроводжується зростанням температури й тиску, а електрична робота перетворюється на теплову енергію. Нагріте робоче тіло в теплообміннику передає теплоту до високотемпературного акумулятора, після чого проходить дроселювання або інший процес декомпресії, що знижує її температуру. У LT-теплообміннику робочий агент поглинає теплоту з низькотемпературного акумулятора, після чого цикл зарядження завершується. Як результат, у системі накопичується теплова ексергія, що визначається різницею між HT- та LT-рівнями температур.

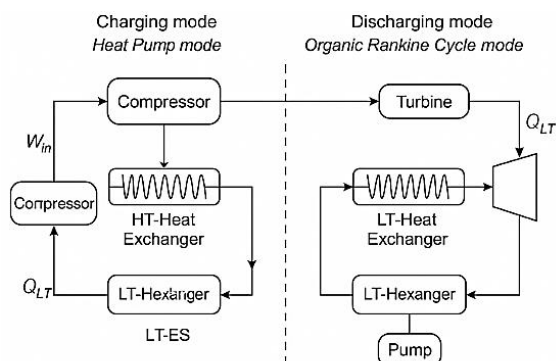


Рис. 6. PTES на основі циклу Ренкіна

У режимі розрядження система функціонує як двигун або органічний цикл Ренкіна (ORC), перетворюючи накопичену теплову енергію на електричну. На першому етапі робочий агент отримує теплоту з НТ-резервуара, випаровується і за потреби перегрівається. Потрапляючи в турбіну, пара розширюється і виконує механічну роботу, яка далі перетворюється на електричну енергію. LT-резервуар отримує теплову енергію внаслідок конденсації робочої речовини, яку насос повертає в парогенератор, завершуючи цикл розрядження; затрати енергії на роботу насоса незначні відносно корисної роботи турбіни. Робочою рідиною можуть бути різні середовища — CO_2 , вода/пара, органічні робочі агенти, NH_3 тощо. У працях (Frate, Ferrari, & Desideri, 2020; Wang та ін., 2022; Chai, & Tassou, 2025) наведено аналіз різних режимів систем, а також зазначається, що ефективність системи значною мірою залежить від ізоентропної (політропної) ефективності компресора й турбіни, теплових втрат і теплофізичних властивостей робочого тіла. Діапазон робочих температур і тиску для PTES Rankine становить від $-30\text{ }^\circ\text{C}$ до $400\text{ }^\circ\text{C}$ і від 1 до 200 бар (Xue, Zhao, & Zhao, 2022; Chai, & Tassou, 2025; Petrollese, Marchionni, Merchán, Migliari, & Cau, 2025). Реалізація моделей представлена в табл. 2 (Theologou та ін., 2024; Zhang та ін., 2025).

Таблиця 2. Реалізація моделей PTES на основі циклу Ренкіна

№ п/п	Проект/робота	Локація/Група	Електрична потужність	Робочі рідини	Статус
1.	CHESTER/CHEST PTES	Європа, Німеччина	~10 кВт	HFO R-1233zd(E) (HP), органічний (ORC)	Лабораторний прототип, експериментальна демонстрація
2.	Reversible HP	Європа, Німеччина	~15/9 кВт	HFO/HFC (R-1233zd (E), R245fa)	Пілотний стенд, експериментальні результати
3.	CHEST — HTHP module	DLR + консорціум CHEST	—	HFO R-1233zd(E)	Випробувано модульно
4.	Reversible HP-ORC for WHR (marine)	Kosmadakis G., ЄС	10—50 кВт	синтетичні ORC	Аналіз + моделі

Продовження таблиці 2

5.	TI-PTES (waste flue gas)	Китай	—	CO ₂ , NH ₃ + ORC	Моделювання/ стенди
6.	Working-fluid pair selection for TI-PTES	Китай	—	NH ₃ , CO ₂ ; R-1233zd(E), R245fa	Моделювання
7.	ORC-Carnot Battery — HP↔ORC	Karlsruhe/FAU	—	HFO/HFC; NH ₃ /CO ₂	Експеримент (частк.)
8.	Reversible HTHP-ORC (industrial WHR)	Intl. collab.	—	природні + синтетичні	Ранній прототип

Такі системи можуть забезпечити вищу енергетичну щільність і здійснити акумулювання теплоти за істотно нижчих температур, ніж у циклах PTES на основі циклу Брейтона (табл. 3) (Trebilcock та ін., 2020; McTigue, Farres-Antunez, & White, 2022; Weitzer, Kolb, Müller, & Karl, 2024).

Таблиця 3. Порівняльні характеристики Rankine-PTES та Brayton-PTES

Критерій	Rankine-PTES	Brayton-PTES
Робочі температури/умови	Середні/помірні температури — ~100 °C до ~250 °C для Rankine/PTE	Високі температури ~500 °C і вище
Енергетична щільність* і матеріали	Нижчі робочі температури означають менші вимоги до матеріалів, можливість використання середовищ з фазовим переходом, менші теплові втрати	Високі робочі температури призводять до жорсткіших вимог до матеріалів, більших втрат теплоти, складнішої конструкції елементів
ККД (повного циклу), %	~50—60	~60—65
Інтеграція низькопотенційних або утилізаційних джерел тепла	Краще підходить для низькопотенційних/відходячих джерел теплоти завдяки нижчим робочим температурам	Інтеграція складна через високі робочі температури та високі технологічні вимоги
Складність/технологічні виклики	Потребує оптимізації робочих агентів, насосів, турбін, теплообмінників	Через великі тискові та теплові навантаження підвищенні вимоги до турбомашин, матеріалів, теплообмінників
Робочі середовища накопичення енергії (TES)	Можливе застосування робочих речовин із фазовим переходом	Переважають чутливі (sensible) теплові накопичувачі
Технологічна зрілість/економіка	Потребує подальшого техніко-економічного обґрунтування	Системи потребують значні капітальні витрати

Примітка: * у контексті PTES термін «енергетична щільність» визначає, скільки енергії може бути накопичено в одиниці об'єму/маси матеріалів, що зберігають тепло (PCM, розплави, камінь, ґрунт тощо).

Найпоширенішими моделями Rankine-PTES є транс- та надкритичні цикли на CO₂. У дослідницьких пропозиціях розглядається широкий спектр варіантів оптимізації базової конфігурації, що стосуються компонування таких систем (Wu та ін., 2024).

У наукових джерелах не згадано використання твердих матеріалів як теплоакмулювального середовища для Rankine-PTES. Робочі температури та характер теплових процесів сприяють застосуванню робочих речовин із фазовим переходом.

Перспективними вважаються реалізації Rankine-PTES з використанням природних (окрім CO₂) або синтетичних холодоагентів (Eppinger, Zigan, Karl, & Will, 2020; Sharma, & Mortazavi, 2023). Усі такі системи базуються на використанні теплових насосів (НП) та органічних циклів Ренкіна (ORC), що дозволяє застосовувати комерційно доступне обладнання. Такий підхід потенційно спрощує масштабування до мегаватних потужностей, а модульність — організувати паралельну роботу декількох НП та ORC.

Технологія зберігання енергії LAES (Liquid Air Energy Storage — зберігання енергії в зрідженому повітрі) раніше розглядали лише як удосконалення системи CAES (Compressed Air Energy Storage), спосіб підвищення енергетичної щільності. Але на відміну від CAES, де електроенергія зберігається переважно у вигляді механічної енергії стисненого газу, LAES накопичує енергію у вигляді теплового потенціалу, отже, її слід вважати повноцінною батареєю Карно. Завдяки значно вищій густині зрідженого повітря порівняно зі стисненим, LAES має переваги в енергетичних характеристиках і режимах зберігання — відносно низький тиск дозволяє зменшити вартість і підвищити компактність резервуарів.

Принцип роботи такої системи можна описати таким чином: під час зарядки системи відбувається процес зрідження повітря (навколишнє повітря стискається, охолоджується до криогенних температур і зріджується, а газова несконденсована фракція повертається для забезпечення охолодження в процесі). Рідке повітря зберігається під тиском, близьким до навколишнього, у посудині з вакуумною ізоляцією. Під час розрядки рідке повітря нагнітається до високого тиску, випаровується і розширюється в турбіні. Завдяки дуже низькій температурі робочого тіла навколишнє середовище може виступати як гарячий резервуар, що забезпечує процес розширення. Для автономних LAES заявлений оптимальний тиск заряджання знаходиться в діапазоні 10—18 МПа, а рекомендований тиск нагнітання — 7—12 МПа. Діапазон температур від −196 °C (точка насичення повітря при тиску навколишнього середовища) до 400 °C (Lu, Xu, Chen, Tian, & Zhang, 2023).

Серед основних переваг відзначають модульність таких систем, що не потребують чіткого геологічного розміщення і легко поєднуються з іншими процесами, створюючи гібридні цикли.

Оскільки підсистеми заряджання—розряджання незалежні, то для їх реалізації використовуються окремі термодинамічні цикли. Класична конфігурація LAES використовує цикл Лінде або кращі за ефективністю цикли Клода та Капіці (Marchionni, & Cipollone, 2023). Більш сучасні схеми криогенного скраплення здатні забезпечити вищі показники термодинамічної ефективності (Agyekum, & Odoi-Yorke, 2024). Після стадії заряджання існує чотири основні методи відбору: пряме розширення, цикл Ранкіна, цикл Брайтона, комбінація перелічених циклів.

На сьогодні основна увага дослідників приділяється технічному рішенню проблеми максимального використання теплових потоків при розрядженні системи. Саме тому в процес LAES часто включають додаткові гарячі та холодні рецикли,

що накопичують «відкидні» теплові потоки, які утворюються на проміжних етапах циклу.

Прикладами реалізованих систем на основі LAES можна відзначити пілотну LAES-установка Highview (на майданчику Slough Heat & Power, SSE, Велика Британія) з параметрами 350 кВт/2,5 МВт·год, що працювала як пілотний зразок протягом 2011—2014 pp. (Highview Power, 2014; Highview Power, 2015); першу у світі установку рідкоповітряного накопичення енергії (LAES) мережевого масштабу потужністю 5 МВт/15 МВт·год, розташовану в Бері, поблизу Манчестера, що була введена в експлуатацію у 2018 р. (Highview Power, 2018). Офіційно заявлено про початок комерційної роботи у травні 2025 р. проєкту в Hatakaichi, Японія — 5 МВт×4 год (Sumitomo Heavy Industries + Hiroshima Gas) (SFW/Sumitomo SHI FW, 2024; LDES Council, 2025).

У межах класифікації технологій акумулювання електроенергії через теплові процеси (Carnot Battery), окрім основних трьох категорій, розглянутих вище, сформована четверта категорія — «Other Concepts» (Vecchi та ін., 2022; Roger-Lund та ін., 2024; Du, Yang, Du, & Wu, 2025). Ця категорія охоплює всі ті технології, які:

- не охоплюють класичні Brayton PTES/Rankine PTES/LAES;
- використовують нетипові робочі тіла чи термодинамічні цикли в межах класичних Brayton PTES/Rankine PTES/LAES;
- поєднують кілька циклів або комбінацій Brayton PTES/Rankine PTES/LAES;
- мають високий рівень теоретичних і практичних досліджень, але не готові до широкого промислового використання.

До «Other Concepts» можна віднести гібридні термодинамічні цикли: наприклад, поєднання LAES із PTES, яке дозволяє уникнути зберігання в температурному діапазоні дуже холодного рівня (як у чистого LAES) і підвищує гнучкість системи (Bertelsen, 2022) або дослідження (Aalborg CSP, 2025) з пропозицією нової конструкції TES, що виходить за рамки стандартних моделей.

До цієї групи також відносяться варіанти термохімічного накопичення (Thermochemical Energy Storage — TCES), де використовують зворотні хімічні реакції для зберігання/віддачі енергії, що дозволяє досягати високої щільності енергії й довготривалого зберігання (Airò Farulla, Motta, & Zunino, 2020). TCES також згадується як потенційна технологія в майбутніх Carnot-батареях для сезонного накопичення.

Останнім часом пригортають увагу інтегровані/гібридні системи із зовнішніми тепловими джерелами. Наприклад, накопичувачі, що поєднують сонячну теплову енергію (CSP) чи промислове відхідне тепло з PTES-системами. Або технічні рішення пропонують використовувати нестандартні середовища накопичення теплової енергії (наприклад, металеві оксиди, індустріальні відходи) тощо.

Цікаві рішення на фоні глобальної декарбонізації запропонували дослідники Німецького центру досліджень в галузі аерокосмічної техніки, енергетики і транспорту (DLR), які вивчають можливість модернізації вугільних електростанцій (Kraemer, 2019; Kraemer, 2021; Proctor, 2025). Переобладнання існуючих теплових електростанцій в установки з накопиченням енергії за схемою батарей Карно відкриває нову парадигму утилізації промислової інфраструктури.

Замість простого виведення з експлуатації (закриття/ліквідації) такі об'єкти можуть стати активними елементами енергосистеми. У такий спосіб можливе подовження життєвого циклу активів, зменшення капіталовкладень у нове будівництво, збереження підключення до мережі та підтримка стабільності системи з високою часткою відновлюваних джерел.

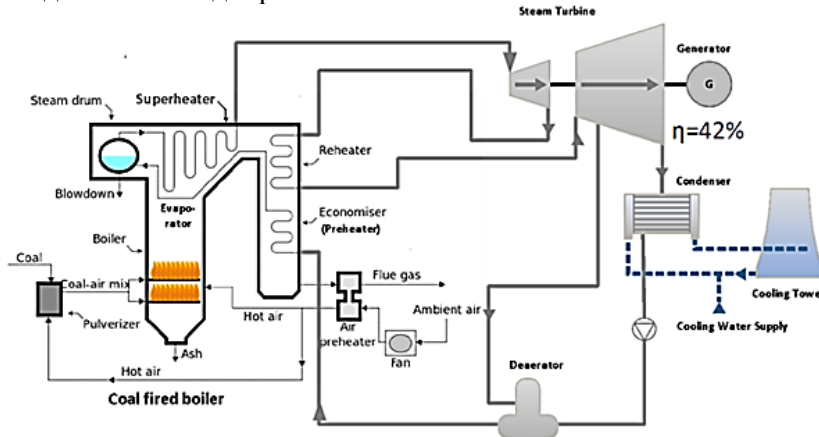


Рис. 7. Перетворення існуючої вугільної установки на теплоакumuлюючу установку Carnot Battery

Одним із варіантів трансформації існуючої теплогенеруючої інфраструктури є технологія Power-to-Salt, розроблена компанією Aalborg CSP та представлена широкому загалу у 2025 р. (Aalborg CSP, 2025). В її основі лежить використання концепції батареї Карно, яка забезпечує перетворення електричної енергії в теплову з подальшим зберіганням у розчині розплавленої солі та можливістю зворотного перетворення на електрику під час пікового навантаження. Надлишкова електроенергія з відновлюваних джерел (сонячних і вітрових електростанцій) використовується для нагрівання солі, яка зберігається у двох ізольованих резервуарах за температури 565 °C. За зростання попиту на електроенергію накопичене тепло використовується для генерування пари високого тиску, що приводить у дію турбіни існуючих енергоблоків. Це надає можливість повністю відмовитися від спалювання викопного палива та забезпечити баланс між виробництвом і споживанням у мережі.

У процесі модернізації традиційний вугільний котел замінюється парогенератором на основі технології Header&Coil, який працює на розплавленій солі. Важливо, що значна частина наявної інфраструктури електростанції може бути збережена та повторно використана, зокрема парові турбіни, генератори, теплообмінники й обладнання високовольтних систем.

Представники AalborgCSP наголошують на високій масштабованості рішення та значному потенціалі його застосування для забезпечення великомасштабного накопичення енергії в електромережах на основі ВДЕ.

Натепер проєкт реалізується AalborgCSP та компанією AESBulgaria на вугільній електростанції, побудованій у 2010 році. Компанія заявила, що в разі успіху

більше 250 вугільних електростанцій у Європі можуть бути виведені з експлуатації в рамках стратегії скорочення викидів за розглянутою технологією.

Висновки

За результатами проведеного огляду можна стверджувати, що стрімке зростання частки відновлюваних джерел у глобальному енергобалансі вимагає розгортання масштабних систем накопичення енергії. Короткотривалі технології, зокрема літій-іонні акумулятори, залишаються ефективними для оперативного балансування, однак їхня економічна доцільність суттєво знижується за тривалості зберігання понад кілька годин. Це зумовлює пошук альтернативних рішень для довготривалого резервування енергії.

У цьому контексті батареї Карно (Carnot Batteries) розглядаються як перспективний напрям розвитку завдяки можливості зберігати значні обсяги електроенергії в тепловій формі з подальшим відновленням у вигляді електричної. Їхня перевага полягає в доступності використовуваних матеріалів, сумісності з існуючою теплотехнічною інфраструктурою та відсутності географічних обмежень. Окрім того, такі системи допускають широке масштабування — від малих демонстраційних установок до проєктів промислового рівня.

Проведений аналіз свідчить, що найбільш детально дослідженими є підходи на основі циклів Brayton PTES та Rankine PTES. Вони демонструють оптимальні технічні параметри й задовільну енергоефективність, проте здебільшого перебувають на етапі експериментальних або демонстраційних рішень. Системи LAES відрізняються помітнішою технологічною зрілістю, про що свідчать реалізовані пілотні установки у Великій Британії та Японії. До групи перспективних, але менш освоєних концепцій, віднесено гібридні термодинамічні цикли та термохімічне накопичення, які наразі здебільшого існують у форматі теоретичних або лабораторних досліджень.

Важливою тенденцією є зростання інтересу до переобладнання існуючої теплової генерації на основі викопного палива в системи накопичення енергії. Такий підхід не лише підтримує декарбонізацію, а й мінімізує капітальні витрати та сприяє збереженню кваліфікованого персоналу.

Загалом CarnotBatteries можна вважати одним з найбільш перспективних напрямів розвитку довготривалого накопичення енергії. Поєднання технологічної гнучкості, потенційно низької вартості зберігання та можливості інтеграції з відновлюваними джерелами робить їх привабливими як для енергосистем, так і для промислових застосувань. Подальші дослідження мають бути спрямовані на підвищення енергоефективності, зниження вартості обладнання, розробку надійних теплоаккумулявальних матеріалів і створення повномасштабних промислових моделей та об'єктів.

Література

Мирутенко, П. П., & Лістовщик, Л. К. (2022). Накопичувачі енергії: Основні типи та перспективи використання. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, (4), 107—116.

Фіалко, Н. М., & Тимченко, М. П. (2017). Технології накопичення енергії у складі інтелектуальних систем енергозабезпечення. *Промышленная теплотехника*, 39(4), 44—54.

Aalborg CSP. (2025). *Aalborg CSP sees great potential in converting coal-fired power plants into thermal storage facilities for renewable energy* [Press release]. Взято з <https://www.aalborgcsp.com/news-events/newstitle/news/aalborg-csp-sees-great-potential-in-converting-coal-fired-power-plants-into-thermal-storage-facilities-for-renewable-energy>.

Aalborg CSP. (2025). *Power-to-Salt*. Взято з <https://www.aalborgcsp.com/business-areas/ptx-technologies/power-to-salt>.

Agyekum, E. B., & Odoi-Yorke, F. (2024). Liquid air energy storage (LAES): Systematic review of two decades of research and future perspectives. *Journal of Energy Storage*, 102, 114022. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114022>.

Airò Farulla, G., Motta, M., & Zunino, P. (2020). A review of thermochemical energy storage systems for power-to-heat applications. *Applied Sciences*, 10(9), 3142. <https://doi.org/10.3390/app10093142>.

Baineson, A. (2024). *Ukraine's renewable energy resilience amid ongoing war challenges*. Energy Curated. Взято з <https://energycurated.com/renewable-energy/ukraines-renewable-energy-resilience-amid-ongoing-war-challenges/>.

Benato, A., & Stoppato, A. (2018). Pumped thermal electricity storage: A technology overview. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 301—315. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.01.017>.

Benato, A., & Stoppato, A. (2018). Heat transfer fluid and material selection for an innovative pumped thermal electricity storage system. *Energy*, 147, 155—168. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.045>

Benato, A., & Stoppato, A. (2022). Carnot battery development: A review on system performance, applications and commercial state-of-the-art. *Journal of Energy Storage*, 51, 104480. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104480>.

Bertelsen, L. (2022). *Aalborg CSP supplies energy storage technology to a PTXSALT plant for green conversion of a coal-fired plant*. DBDH: District Energy News. Взято з <https://dbdh.org/aalborg-csp-supplies-energy-storage-technology-to-a-ptxsalt-plant-for-green-conversion-of-a-coal-fired-plant/>.

Borri, E., Tafone, A., Zsembinszki, G., Comodi, G., & Romagnoli, A. (2020). Recent trends on liquid air energy storage: A bibliometric analysis. *Applied Sciences*, 10(8), 2773. <https://doi.org/10.3390/app10082773>.

Budt, M., Wolf, D., & Span, R. (2020). Compressed air energy storage — Review and recent developments. *Journal of Energy Storage*, 29, 101368. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101368>.

Chai, L., & Tassou, S. A. (2025). A technology review of pumped thermal energy storage based on CO₂ cycles. *Applied Thermal Engineering*, 281, 128586. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128586>.

Chen, H., Wang, X., & Zhu, H. (2022). Thermodynamic design and optimization of pumped thermal electricity storage systems using supercritical carbon dioxide as the working fluid. *Energy Conversion and Management*, 268, 115969. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115969>.

Connolly, D., Lund, H., & Mathiesen, B. V. (2020). Underground pumped hydro storage: A promising option for large-scale energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110450. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110450>.

DNV. (2025). *Energy industry insights 2025: From silos to systems*. Взято з <https://www.dnv.com/energy/insights/energy-industry-insights/short-term-volatility-long-term-optimism/>.

Du, M., Yang, H., Du, X., & Wu, H. (2025). Performance analysis of Carnot battery pumped thermal electricity storage aided with concentrated solar thermal input. *Energy*, 319, 135015. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135015>.

Dumont, O., Frate, G. F., Pillai, A., Lecompte, S., De Paepe, M., & Lemort, V. (2020). Carnot battery technology: A state-of-the-art review. *Journal of Energy Storage*, 32, 101756. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101756>.

Ember. (2025). *Global electricity review 2025*. Взято з <https://ember-energy.org/latest-insights/global-electricity-review-2025/>.

Eppinger, B., Steger, D., Regensburger, C., Karl, J., Schlücker, E., & Will, S. (2021). Carnot battery: Simulation and design of a reversible heat pump-organic Rankine cycle pilot plant. *Applied Energy*, 288, 116650. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116650>.

Eppinger, B., Zigan, L., Karl, J., & Will, S. (2020). Pumped thermal energy storage with heat pump-organic Rankine cycle systems: Comparison of latent and sensible thermal storages for various fluids. *Applied Energy*, 280, 115940. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115940>.

Frate, G. F., Ferrari, L., & Desideri, U. (2020). Multi-criteria economic analysis of a pumped thermal electricity storage system with thermal integration and sensible heat storage. *Frontiers in Energy Research*, 8, 53. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00053>.

German Aerospace Center. (2022). *Storing renewable energy using salt*. Взято з <https://www.dlr.de/en/latest/news/2022/04/storing-renewable-energy-using-salt>.

Gokon, N., Ozawa, Y., & Yamamoto, H. (2022). Techno-economic comparison of Brayton pumped thermal electricity storage systems based on solid and liquid sensible heat storage. *Energies*, 15(24), 9595. <https://doi.org/10.3390/en15249595>.

Guo, H., Zhang, Y., Xu, Y., Zhou, X., & Chen, H. (2024). Derived energy storage systems from Brayton cycle. *iScience*, 27(4), 109460. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.109460>.

Highview Power. (2014, December 5). *Highview's grid-connected 350 kW/2.5 MWh liquid air energy storage pilot plant in Slough demonstrates commercial viability* [Press release]. Взято з <https://www.highviewpower.com/wp-content/uploads/2018/04/14.12.05-FINAL-Highview-ADA-ES-Investment-press-release1.pdf>.

Highview Power. (2015). *Liquid air energy storage: Slough 350 kW/2.5 MWh pilot plant — performance and test results* [Conference presentation]. Взято з https://tdglobal.ksc.nasa.gov/servlet/sm.web.Fetch/NELMES_Highview_Presentation_TEERM_Madrid_Nov15.pdf.

Highview Power. (2018). *World's first liquid air energy storage plant officially launched* [Press release]. Взято з <https://highviewpower.com/news-announcements/world-first-liquid-air-energy-storage-plant/>.

Holechek, J. L., Geli, H. M. E., Sawalhah, M. N., & Valdez, R. (2022). A global assessment: Can renewable energy replace fossil fuels by 2050? *Sustainability*, 14(8), 4792. <https://doi.org/10.3390/su14084792>.

Thermo-economic analysis of pumped thermal energy storage with thermal integration in different application scenarios. *Energy Conversion and Management*, 236, 114072. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114072>.

International Energy Agency. (2025). *Global energy review 2025*. Взято з <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>.

International Hydropower Association. (2024). *2024 world hydropower outlook*. Взято з <https://www.hydropower.org/publications/2024-world-hydropower-outlook>.

Khalilpour, R., & Wang, L. (2023). sCO₂-based thermally integrated pumped thermal energy storage systems valorizing industrial waste heat. *Journal of Energy Storage*, 65, 107408. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107408>.

Kraemer, S. (2019). *Make Carnot batteries with molten salt thermal energy storage in ex-coal plants*. SolarPACES. Взято з <https://www.solarpaces.org/make-carnot-batteries-with-molten-salt-thermal-energy-storage-from-ex-coal-plants/>.

Kraemer, S. (2021). *Aalborg CSP to retrofit coal plants into thermal energy storage*. SolarPACES. Взято з <https://www.solarpaces.org/aalborg-csp-can-retrofit-coal-plants-into-thermal-energy-storage/>.

Krüger, M. (2024). Systematic concept study of Brayton batteries for coupled thermal-electric energy storage applications. *Applied Sciences*, 14(14), 6073. <https://doi.org/10.3390/app14146073>.

Lamm, A., & Honigmann, B. (2019). Electro-thermal energy storage concepts for grid support. *Journal of Energy Storage*, 22, 108—120.

LDES Council. (2024). *2024 LDES annual report*. Взято з <https://ldescouncil.com/2024-ldes-annual-report/>.

LDES Council. (2025). *Deploying LDES: Implementation best practices*. Взято з <https://ldescouncil.com/deploying-ldes-implementation-best-practices/>.

LDES Council. (2025). *Powering the Japanese grid with clean air — Case study: Hatsukaichi LAES plant* [PDF]. Взято з https://ldescouncil.com/wp-content/uploads/2025/10/LDES_CaseStudy_.pdf.

LDES Council, & McKinsey, & Company. (2021). *Net-zero power: Long-duration energy storage for a renewable grid*. Взято з <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/net-zero-power-long-duration-energy-storage-for-a-renewable-grid>.

Liu, H., Zhang, Y., Xu, Q., Han, W., & Shen, J. (2025). A Carnot battery system integrating CaO/Ca(OH)₂ thermochemical energy storage and supercritical CO₂ cycles for long-term energy storage and residential heat supply. *Applied Energy*, 377, 124535. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124535>.

Liu, X., Li, W., Guo, X., Su, B., Guo, S., Jing, Y., & Zhang, X. (2025). Advancements in energy-storage technologies: A review of current developments and applications. *Sustainability*, 17(18), 8316. <https://doi.org/10.3390/su17188316>.

Lu, Y., Xu, J., Chen, X., Tian, Y., & Zhang, H. (2023). Design and thermodynamic analysis of an advanced liquid air energy storage system coupled with LNG cold energy, organic Rankine cycles and natural resources. *Energy*, 275, 127538. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127538>.

Marchionni, M., & Cipollone, R. (2023). Liquid CO₂ and liquid air energy storage systems: A thermodynamic analysis. *Energies*, 16(13), 4941. <https://doi.org/10.3390/en16134941>.

McTigue, J. D. (2019). "Carnot batteries" for electricity storage [Report]. National Renewable Energy Laboratory. Взято з <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75559.pdf>.

McTigue, J. D., Farres-Antunez, P., & White, A. J. (2022). *Integrated heat pump thermal storage and power cycle for concentrating solar power* [Report]. National Renewable Energy Laboratory. Взято з <https://docs.nrel.gov/docs/fy22osti/79806.pdf>.

McTigue, J. D., Farres-Antunez, P., Sundarnath, J. K., Markides, C. N., & White, A. J. (2022). Techno-economic analysis of recuperated Joule-Brayton pumped thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 252, 115016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115016>.

Meroueh, L., & Chen, G. (2020). Thermal energy storage radiatively coupled to a supercritical Rankine cycle for electric grid support. *Renewable Energy*, 145, 604—621. Взято з <https://ideas.repec.org/a/eee/renene/v145y2020icp604-621.html>.

Newcastle University. (2017, November 3). *Hot rock solution to grid-scale energy storage*. Взято з <https://www.ncl.ac.uk/press/articles/archive/2017/11/isentropic>.

Novotny, V., Basta, V., Smola, P., & Spale, J. (2022). Review of Carnot battery technology commercial development. *Energies*, 15(2), 647. <https://doi.org/10.3390/en15020647>.

Nunes, L. J. R. (2025). Carnot batteries for grid-scale energy storage: Technologies and the potential valorization of biomass ash as thermal storage media. *Energies*, 18(16), 4235. <https://doi.org/10.3390/en18164235>.

O'Callaghan, O., & Donnellan, P. (2021). Liquid air energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 146, 111113. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111113>.

Olympios, A. V., McTigue, J. D., Farres-Antunez, P., Tafone, A., Romagnoli, A., Li, Y., ..., Markides, C. N. (2021). Progress and prospects of thermo-mechanical energy storage: A critical review. *Progress in Energy*, 3(2), 022001. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abdbba>.

Petrollese, M., Cascetta, M., Tola, V., Cocco, D., & Cau, G. (2022). Pumped thermal energy storage systems integrated with a concentrating solar power section: Conceptual design and performance evaluation. *Energy*, 247, 123516. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123516>.

Petrollese, M., Marchionni, M., Merchán, R. P., Migliari, L., & Cau, G. (2025). Comparative analysis of different Rankine PTES system configurations. *Journal of Energy Storage*, 114, 115800. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.115800>.

Proctor, D. (2025). *Denmark group: Old coal-fired plants can be converted to thermal energy storage facilities*. POWER Magazine. Взято з <https://www.powermag.com/denmark-group-old-coal-fired-plants-can-be-converted-to-thermal-energy-storage-facilities/>.

Rabi, A. M., Radulovic, J., & Buick, J. (2023). Pumped thermal energy storage technology: Review. *Thermo*, 3(3), 396—411. <https://doi.org/10.3390/thermo3030024>.

Roger-Lund, S., Darkwa, J., Worall, M., Calautit, J., Boukhanouf, R. (2024). A review of thermo-chemical energy storage systems for district heating in the UK. *Energies*, 17(14), 3389. <https://doi.org/10.3390/en17143389>.

Serrano, P. V., & Zaveri, A. (2020). *Venturing the definition of green energy transition: A systematic literature review*. arXiv. Взято з <https://arxiv.org/abs/2004.10562>.

SFW/Sumitomo SHI FW. (2024, July 10). *Sumitomo SHI FW collaborates with Siemens Energy to advance long duration energy storage market with technology that uses clean air* [Press release]. Взято з <https://www.shi-fw.com/insights/news-and-updates/sumitomo-shi-fw-collaborates-with-siemens-energy-to-advance-long-duration-energy-storage-market-with-technology-that-uses-clean-air/>.

Sharma, S., & Mortazavi, M. (2023). Pumped thermal energy storage: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 213, 124286. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124286>.

Solar Impulse Foundation. (2024). *Stolect Carnot battery*. Взято з <https://solarimpulse.com/solutions-explorer/stolect-carnot-battery-1>.

Stanchev, P., & Hinov, N. (2025). Comparative techno-economic and life cycle assessment of stationary energy storage systems: Lithium-ion, lead-acid, and hydrogen. *Batteries*, 11(10), 382. <https://doi.org/10.3390/batteries11100382>.

Tang, J., Li, Q., Wang, L., & Yu, H. (2024). Process integration of supercritical CO₂ cycle and pumped thermal energy storage system. *Chemical Engineering Transactions*, 114, 13—18. <https://doi.org/10.3303/CET24114003>.

Theologou, K., Johnson, M., Tombrink, J., Corrales Ciganda, J. L., Trebilcock, F. T., Couvreur, K., ..., Lecompte, S. (2024). CHESTER: Experimental prototype of a compressed heat energy storage and management system for energy from renewable sources. *Energy Conversion and Management*, 311, 118519. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118519>.

Thiele, E., Jahnke, F., & Ziegler, F. (2020). Efficiency of the Lamm-Honigmann thermochemical energy storage. *Thermal Science and Engineering Progress*, 19, 100606. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100606>.

Trebilcock, F., Ramirez, M., Pascual, C., Weller, T., Lecompte, S., & Hassan, A. H. (2020). Development of a compressed heat energy storage system prototype. In *Proceedings of the IIR International Rankine 2020 Conference — Heating, Cooling and Power Generation* (pp. 400—409). <https://doi.org/10.18462/iir.rankine.2020.1178>.

Utility Week. (2019, January 8). *Ground-breaking energy storage operational in Newcastle*. Взято з <https://utilityweek.co.uk/ground-breaking-energy-storage-operational-newcastle>.

Vandersickel, A., Gutierrez, A., Vasta, S., Engelbrecht, K., Ma, Z., Ding, Y., ..., Bollinger, B. (2024). *Carnot batteries: Final report (IEA ES TCP Task 36)*. International Energy Agency Technology Collaboration Programme on Energy Storage. Взято з <https://iea-es.org/wp-content/uploads/public/IEA-ES-Task-36-Carnot-Batteries-Final-Report-1.pdf>.

Vecchi, A., Knobloch, K., Liang, T., Kildahl, H., Sciacovelli, A., Engelbrecht, K., ..., Ding, Y. (2022). Carnot battery development: A review on system performance, applications and commercial state-of-the-art. *Journal of Energy Storage*, 55, 105782. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105782>.

Wang, P., Li, Q., Liu, C., Wang, R., Luo, Z., Zou, P., & Wang, S. (2022). Comparative analysis of system performance of thermally integrated pumped thermal energy storage systems based on organic flash cycle and organic Rankine cycle. *Energy Conversion and Management*, 273, 116416. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116416>.

Weitzer, M., Kolb, S., Müller, D., & Karl, J. (2024). Reversible heat pump-organic Rankine cycle pilot plant: Experimental results and fluid charge optimization. In *Proceedings of the 7th International Seminar on ORC Power Systems (ORC 2023)* (pp. 430—438). https://doi.org/10.12795/9788447227457_72.

Weitzer, M., Reiß, S., Steger, D., Kolb, S., & Karl, J. (2024). Experimental characterization of a reversible heat pump-organic Rankine cycle pilot plant as a thermally integrated Carnot battery. *Applied Thermal Engineering*, 260, 124872. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124872>.

Wolf, S., Bullard, R., Buonocore, J. J., Donley, N., Farrelly, T., Fleming, J., ..., Willis, M. D. (2025). Scientists' warning on fossil fuels. *Oxford Open Climate Change*, 5(1), kgaf011. <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgaf011>.

Wu, D., Ma, B., Zhang, J., Chen, Y., Shen, F., Chen, X., ..., Yang, Y. (2024). Working fluid pair selection of thermally integrated pumped thermal electricity storage system for waste heat recovery and energy storage. *Applied Energy*, 371, 123693. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123693>.

Xue, X. J., Zhao, Y., & Zhao, C. Y. (2022). Multi-criteria thermodynamic analysis of pumped-thermal electricity storage with thermal integration and application in electric peak shaving of coal-fired power plant. *Energy Conversion and Management*, 258, 115502. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115502>.

You, D., Tatli, A. E., & Metghalchi, H. (2025). A Brayton pumped thermal energy storage system based on the supercritical carbon dioxide recompression reheating discharge cycle. *ASME Open Journal of Engineering*, 4(1), 041002. <https://doi.org/10.1115/1.4067446>.

Zhang, M., Yao, Y., He, J., Pei, G., Tian, H., Shi, L., ..., Shu, G. (2025). Experimental investigation of thermally integrated Carnot battery system. *Journal of Energy Storage*, 131, 117618. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117618>.

Zhang, C., Zhang, L., Ding, Y., Peng, S., Guo, X., & Zhao, Y. (2018). Progress and prospects of next-generation redox flow batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 552—574. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.032>.

THE EFFECT OF ELECTRIC SPARK DISCHARGES ON THE PROPERTIES OF THE JUICE-PULP MIXTURE DURING VIBROEXTRACTION FROM SUBSTANDARD BEET MASS

Yu. Zaporozhets, <https://orcid.org/0000-0003-2356-2148>

V. Zavialov, <https://orcid.org/0000-0001-9382-9050>

V. Sapiga, <https://orcid.org/0000-0001-7171-624X>

V. Shpak, <https://orcid.org/0000-0002-5312-9591>

National University of Food Technologies

Key words:

Juice-pulp mixture
Substandard beet mass
Vibroextraction
Quality indicators
Diffusion juice
Cell wall
Electric spark discharge
Shock wave

Article history:

Received 12.11.2025
 Received in revised form
 27.11.2025
 Accepted 15.12.2025

Corresponding author:

Yu. Zaporozhets
E-mail:
zaporozhecuv@nuft.edu.ua

Citation: Запорожець Ю. В., Зав'ялов В. Л., Санига В. Я, Шпак В. В. (2025). Вплив електроіскрових розрядів на властивості сокоотружкової суміші при віброекстрагуванні з некондиційної бурякомаси. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 147—160,
 DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-12

ABSTRACT

The results of a study of the influence of electric spark discharges on the properties and quality indicators of the juice chip mixture during vibration extraction of target components from substandard beet pulp are presented in the article.

For the study, sugar beet fragments were selected, which constitute up to 3% of the total mass of beets in the washing departments of beet-sugar production.

Microphotographs of sugar beet tissue before and after the corresponding regime of electric spark treatment with 5 discharges indicated the separation of protoplasm from the cell wall, while a significant number of cells remained completely undamaged. When treated with 7—10 discharges, the cytoplasm disintegrated into small clots, the cell itself lost its vital functions, and the nucleus began to stand out. Increasing the number of discharges to 12—15 led to denaturation of the cytoplasm and decomposed it into particles, while the cell membrane became thinner in some places. Thus, the use of more than 10 discharges was not advisable, because the thickness of the cell membrane was significantly reduced, and in some places the boundaries were completely lost, while many cavities were formed, that is, the destruction of cell tissue occurred.

It was found that the denaturation of protoplasm during electric discharge depended to a greater extent on the number of discharges and to a lesser extent on the discharge voltage. Electrohydraulic processing in the mode with a voltage of 35 kV and a number of discharges of 7—10 allowed to increase the permeability of beet tissue and achieve a degree of plasmolysis within 53—98%.

It was found that the combined use of the effect of electric spark discharges on the internal mass transfer of the target components of the juice shaving mixture and the effect of low-frequency mechanical vibrations during vibroextraction on the external mass transfer is a significant effect of intensification of the process.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-12

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ РОЗРЯДІВ НА ВЛАСТИВОСТІ СОКОСТРУЖКОВОЇ СУМІШІ ПРИ ВІБРОЕКСТРАГУВАННІ З НЕКОНДИЦІЙНОЇ БУРЯКОМАСИ

Ю. В. Запорожець, <https://orcid.org/0000-0003-2356-2148>

В. Л. Зав'ялов, <https://orcid.org/0000-0001-9382-9050>

В. Я Сапіга, <https://orcid.org/0000-0001-7171-624X>

В.В. Шпак, <https://orcid.org/0000-0002-5312-9591>

Національний університет харчових технологій

У статті представлені результати дослідження впливу електроіскрових розрядів на властивості та якісні показники сокостружкової суміші при віброекстрагуванні цільових компонентів з некондиційної бурякомаси.

Для досліджень обрано хвостики та уламки цукрового буряка, які становлять до 3% від загальної маси буряка у мийних відділеннях бурякоцукрового виробництва.

Фотознімки тканини цукрового буряка до та після відповідного режиму електроіскрового оброблення п'ятьма розрядами свідчать про відділення протоплазми від клітинної стінки, при цьому значна кількість клітин лишаються взагалі не пошкодженими. При обробленні 7—10 розрядами спостерігається розпад цитоплазми на невеликі згустки, сама клітина втрачає свої життєві функції, починає виділятися ядро. Збільшення кількості розрядів до 12—15 призводить до денатурації цитоплазми та розкладає її на частинки, при цьому клітинна оболонка в деяких місцях тоншає. Доведено, що застосування більше 10 розрядів не є доцільним, тому що товщина клітинної оболонки значно зменшується, а в деяких місцях взагалі втрачаються межі, при цьому утворюється багато каверн, тобто відбувається руйнування тканини клітин.

Встановлено, що денатурація протоплазми під час ЕІО залежить більшою мірою від кількості розрядів і меншою — від напруги розряду. Електрогідравлічне оброблення в режимі з напругою 35 кВ та кількості розрядів 7—10 дозволяє збільшити проникність тканини буряка та досягти ступеня плазмолізу в межах 53—98%.

Встановлено, що комбіноване використання впливу електроіскрових розрядів на внутрішнє масоперенесення цільових компонентів сокостружкової суміші та дія низькочастотних механічних коливань при віброекстрагуванні на зовнішній масообмін є суттєвим ефектом інтенсифікації процесу.

Ключові слова: сокостружкова суміш, некондиційна бурякомаса, віброекстрагування, якісні показники, дифузійний сік, клітинна оболонка, електроіскровий розряд, ударна хвиля.

Постановка проблеми. Ефективність вилучення цукрози на етапі дифузійного екстрагування відіграє ключову роль у забезпеченні економічної доцільності бурякоцукрового виробництва. Саме на цій стадії утворюються основні втрати сухих речовин, енергії й технологічного ресурсу. Значну складність у цьому процесі

створює частка дрібнофракційної некондиційної сировини, яка становить до 2—3% загальної маси буряка. Ця сировина, представлена хвостиками та уламками, відзначається низькою пористістю та високою схильністю до ущільнення, що перешкоджає її повноцінному залученню до масообмінних процесів у протитечійних дифузорах. Унаслідок цього погіршуються фільтраційні властивості суміші, збільшується тривалість екстрагування та виникають прямі технологічні втрати цукрози. Таким чином, постає конфлікт між необхідністю раціонального використання всієї сировини та конструктивними обмеженнями дифузійних апаратів, які не пристосовані для ефективної переробки дрібних частинок.

Звичні методи збільшення виходу, такі як механічне подрібнення, підвищення температури або продовження тривалості процесу, не вирішують основну проблему проникності клітинної тканини. Імпульсні електроіскрові розряди в рідині, відомі як електрогідралічний ефект, можуть створювати ударні хвилі, локальні кавітаційні мікропотоки та спричиняти плазмоліз клітинних структур. Це, у свою чергу, веде до зниження питомого електричного опору тканини, збільшення її проникності та прискорення внутрішніх процесів масоперенесення. Водночас вплив цих явищ на сокоотружкові суміші з некондиційної бурякової маси досліджений недостатньо. Крім того, інтеграція розрядної дії з вібраційним масообміном поки що не отримала належного наукового аналізу, оптимальні параметри не визначено, а питання промислової ефективності залишається відкритим (Кондрат, & Шумілін, 2023).

Отже, актуальність наукової проблеми загального характеру обумовлена відсутністю дієвих підходів до керованої модифікації клітинної структури дрібнодисперсної бурякової сировини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток технологій, заснованих на використанні імпульсного електричного розряду в рідині, супроводжуваного явищем електрогідралічного ефекту, набуває широкого поширення у сферах хімічної (Syed, Ishaq, Rahman, Aslam, & Shukat, 2017) та харчової промисловості (Ranjha et al., 2021; Ghoshal, 2023; Alkanan et al., 2024), а також у концепціях «зеленої інтенсифікації» (Munshi, 2024) та біорефінерії сільськогосподарської сировини (Abdollahnejad, Rahimnejad, & Ezoji, 2025). Такі підходи сприяють підвищенню ефективності процесів і формують основу для сталого розвитку виробничих систем.

Фундаментом цього методу є формування імпульсного електричного розряду певних типів (іскрового, кистьового тощо) безпосередньо в об'ємі рідини. Результатом його дії є виникнення надвисоких гідралічних тисків, здатних виконувати корисну механічну роботу, що супроводжується низькою фізичних і хімічних явищ. У сучасній науковій літературі високовольтні електричні розряди (High Voltage Electrical Discharges — HVED), визначаються як багатофункціональний інструмент, який об'єднує вплив імпульсних електричних полів, ударних хвиль, локальної кавітації, плазми та інтенсивного масообміну (Ferraz, & Silva, 2025; Jedlińska et al., 2025). Завдяки цьому HVED демонструють високу ефективність у процесах обробки систем типу «тверде тіло—рідина» і мають значний потенціал для застосування в розробці новітніх технологій (Vorobiev, & Lebovka, 2022).

Електрогідралічний ефект характеризується дією низки потужних фізичних явищ, зокрема високих і надвисоких імпульсних гідралічних тисків, які спричи-

няють формування ударних хвиль із швидкостями на рівні звукових і надзвукових. Ці фактори супроводжуються помітним імпульсним переміщенням рідинних мас, активним розвитком кавітаційних процесів, генеруванням інфра- та ультразвукових хвиль, а також механічно-резонансними явищами. Крім того, виявляється дія потужних електромагнітних полів, інтенсивного імпульсного світлового, теплового й ультрафіолетового випромінювання, а також багатократної іонізації хімічних сполук і елементів, присутніх у рідинах. Завдяки комплексній взаємодії цих фізико-хімічних факторів досягається значний вплив на саму рідину й об'єкти, розташовані в її середовищі. Це включає руйнування або зміну клітинних структур, підвищення проникності клітинних мембран, збільшення питомої площі твердої фази й активізацію масоперенесення (Tomasevic, Heinz, Djekic, & Terjung, 2023).

У Миколаївському інституті імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України було розроблено й організовано серійне виробництво генераторів імпульсних струмів, які охоплюють широкий діапазон накопичуваної енергії — від 5 до 40 кДж за номінальної вихідної напруги до 50 кВ. Конструктивні рішення цих пристроїв відповідають сучасним стандартам техніки безпеки, що забезпечує можливість їх ефективного використання безпосередньо у виробничих умовах. Подібні установки, призначені для лабораторних і напівпромислових задач, згадуються також у міжнародних дослідженнях. У таких системах використовуються коаксіальні, «кільцеві» (annular gap) та проточні розрядні камери, які застосовуються для безперервної високовольтної імпульсної (HVED) обробки рослинних суспензій (Souza, Rodrigues, & Fonteles, 2025).

Активні дослідження, як теоретичні, так і прикладні, продовжують вивчати фізико-хімічні процеси, що супроводжують електроіскровий розряд у рідкому середовищі. У ряді наукових праць доведено ефективність високовольтного електроіскрового розряду (HVED) для екстрагування поліфенолів, летких сполук та інших біологічно активних компонентів із лікарських рослин, прянощів, виноробної сировини та навіть відходів харчової промисловості (Nutrizio et al., 2020).

Зокрема, було виявлено значний вихід фенольних і летких речовин із чебрецю (*Thymus serpyllum* L.) при використанні HVED у поєднанні з екологічно безпечними розчинниками. Дослідження також підтвердили посилену ефективність екстракції фенолів з орегано (Yan, Deng, Ju, Wu, & Xi, 2018) та результативне вилучення фенольних сполук зі шкірки какао-бобів (Jokić et al., 2019). Окремі праці демонструють перспективність поєднання HVED із застосуванням ультразвукових технологій, яке суттєво оптимізує процес масоперенесення та зменшує тривалість операції (Lončarić et al., 2020).

Ефективність технології HVED підтверджена також для обробки рослинної сировини, яка характеризується високим вмістом клітковини та лігніну. Для лущиння арахісу було розроблено безперервну схему «annular gap HVED», яка дозволяє інтенсивно вилучати флавоноїди (Souza, Rodrigues, & Fonteles, 2025). У випадку виноградних вичавок виявлено, що поєднання HVED та ультразвукової обробки сприяє отриманню екстрактів з підвищеною антиоксидантною активністю за відносно низьких температур. Сучасні дослідження також свідчать про перспективу використання HVED у комбінації з природними евтектичними розчин-

никами (NADES), що забезпечує не лише високий вихід поліфенолів, а й покращену стабільність екстрактів під час зберігання (Abbaspour, Ghareaghajlou, Mogaddam, & Ghasempour, 2024).

Для вилучення біологічно активних компонентів із рослинної сировини технологія HVED розглядається як серйозна альтернатива більш відомому методу пульсованих електричних полів (PEF). Згідно з низкою оглядових досліджень, PEF сприяє значному збільшенню виходу поліфенолів, білка, пектинів та інших цінних сполук із рослинної тканини завдяки процесу електропорації клітинних мембран (Almohammed et al., 2017). Проте при екстракції з грубодисперсної, низькопроникної та структурно складної сировини, такої як матеріали з жорсткими клітинними оболонками, високим вмістом лігніну чи полімерними структурами, HVED демонструє істотні переваги. Ця технологія забезпечує потужну механіко-гідродинамічну дію, що набуває вирішального значення для обробки таких складних систем, як некондиційна бурякова маса.

Обробка рослинної сировини імпульсним розрядом у рідкому середовищі в ряді досліджень дозволила суттєво підвищити вихід цільових компонентів та скоротити тривалість процесу. Для цибулинної шкірки (*Allium cepa* L.) встановлено, що застосування високовольтного електророзряду (HVED) у комбінації з природними евтектичними розчинниками сприяє збільшенню вмісту поліфенолів та покращенню антиоксидантних властивостей отриманих екстрактів. У дослідженнях різних рослинних матриць доведено, що оптимальний підбір складу розчинника та параметрів розряду забезпечує отримання якісних екстрактів у делікатних, майже нетермічних умовах (Foroutani et al., 2025). Інше дослідження показало, що використання HVED не лише збільшує вихід поліфенолів, але й підвищує їхню стабільність завдяки зменшенню окиснювальних процесів під час і після обробки (Li, Fan, & Xi, 2018).

Отримані експериментальні результати вітчизняних досліджень із використанням хмелевої сировини демонструють якісну відповідність світовим даним. Завдяки руйнуванню клітинної структури під впливом імпульсних розрядів забезпечується перехід альфа-кислот у рідку фазу та їх подальша ізомеризація в ізо-альфа-кислоти, що дозволяє значно скоротити тривалість процесу порівняно з традиційним методом настоювання. У результаті стає можливим отримання водно-ізомеризованого екстракту з високим виходом і широким спектром цільових компонентів, що відповідає сучасним тенденціям підвищення ефективності та селективності вилучення гірких речовин із хмелю (Nutrizio et al., 2020).

У дослідженнях, присвячених обробці бурштину, отримано цікаві результати щодо застосування імпульсних розрядів до структурно складних полімерних матеріалів. Зокрема, встановлено, що попередня HVED-обробка (високовольтні електророзряди з напругою в десятки кіловольт і серіями сотень імпульсів) суттєво покращує як внутрішнє, так і зовнішнє масоперенесення. Це сприяє підвищенню якості отриманого екстракту завдяки збільшенню площі контакту фаз та частковому руйнуванню полімерних ланцюгів. Подібні ефекти спостерігаються і для рослинних полімерних матриць, таких як пектиновмісна та лігніновмісна сировина, наприклад, у процесі вилучення пектину з жому цукрових буряків (Fernández-Delgado et al., 2023).

У цукровій промисловості звичні методи збільшення виходу бурякової сировини, такі як механічне подрібнення, підвищення температури або продовження

тривалості процесу спричиняють підвищення кольоровості, накопичення високомолекулярних сполук у дифузійному соці та призводять до зростання енергетичних витрат. Це перетворює некондиційну бурякову масу з потенційного ресурсу на фактичні відходи, що суперечить сучасним принципам енергозбереження, циркулярної економіки та безвідходного виробництва.

Значний інтерес викликають дослідження, спрямовані на оброблення бурякової сировини із застосуванням електрофізичних методів. Виявлено, що використання технології HVED для попередньої обробки жому цукрових буряків сприяє збільшенню виходу пектину, покращенню його реологічних властивостей і загалом підвищує ефективність використання побічних продуктів виробництва цукру (Yu, 2021). Паралельно дослідження впливу пульсованих електричних полів (PEF) на процес переробки цукрових буряків засвідчили можливість реалізації методу «холодної» дифузії, підвищення виходу соку й покращення його якості. Особливо помітний ефект спостерігається в разі попередньої PEF-обробки коренеплодів і бурякової стружки (Palos-Hernández, González-Paramás, & Santos-Buelga, 2025; El Kantar et al., 2018).

Важливим напрямом є застосування електрофізичних методів для модифікації допоміжних реагентів і процесів очищення соків. Зокрема, дослідження показують, що використання таких методів, як високовольтні розряди та електромагнітні поля, для обробки водно-вапняної суспензії сприяє підвищенню дисперсності твердої фази, збільшенню питомої поверхні та покращенню активності суспензії під час очищення дифузійного соку (Fernández-Delgado et al., 2023). Це відкриває можливості для підвищення ефективності процесу очищення та зменшення концентрації ВМР у дифузійному соці, що позитивно впливає на його чистоту та стабільність.

Сучасні дослідження підкреслюють перспективність використання HVED і пов'язаних електрофізичних методів у переробці жому та волокнистих компонентів буряка з метою отримання харчових волокон і комбінованих дієтичних добавок, зокрема з покращеними детоксикаційними властивостями (Fernández-Delgado et al., 2023; Yu, 2021). Водночас низка праць демонструє, що обробка буряків методом PEF перед процедурами пресування або сушіння може позитивно впливати на структурно-механічні характеристики жому, значно покращуючи його придатність для подальшої переробки (Nutrizio, Režek Jambrak, Rezić, & Djekic, 2022; Ammelt et al., 2021).

Розширений аналіз літератури переконливо демонструє значний потенціал застосування імпульсних електричних розрядів у рідкому середовищі для обробки рослинної сировини, зокрема подрібненої некондиційної бурякової маси. Це дає змогу інтенсифікувати процес екстракції цільових компонентів, підвищити ефективність очищення дифузійного соку та інтегрувати побічні продукти у біорефінерійні технології. Однак потребу подальшого дослідження викликають такі аспекти, як оптимізація параметрів розряду (напруга, міжелектродний проміжок, форма електродів, кількість розрядів, конструкція камери розряду) та їх взаємодія з посиленими гідродинамічними режимами, зокрема вібраційними. Це є одним із ключових моментів для створення високоефективних безперервних екстракційних апаратів, здатних забезпечити комплексну переробку некондиційної бурякової маси (Almohammed, Mhemdi, & Vorobiev, 2017; Raso, Heinz, Alvarez, & Toepfl, 2022).

Зважаючи на викладене вище, основним завданням досліджень є забезпечення оптимальних умов інтенсивного масоперенесення за мінімального споживання енергоресурсів і мінімізації технологічних втрат.

Мета дослідження: встановити вплив електроіскрового оброблення сокостружкової суміші з некондиційної бурякомаси на її властивості при віброекстрагуванні.

Матеріали і методи. Для досліджень обрано хвостики та уламки цукрового буряка, які становлять до 3% від загальної маси буряка у мийних відділеннях бурякоцукрового виробництва.

Для отримання бурякової стружки цукровий буряк відмивали від бруду та домішок і подрібнювали до стружки на лабораторній бурякорізці, після чого готували сокостружкову суміш у співвідношенні 1:2, нагрівали до температури 75 °С температури необхідної для проведення досліджень. Сокостружкову суміш піддавали електроіскровому обробленню на експериментальній установці при різних режимах, змінюючи при цьому напругу розряду та кількість розрядів. Шляхом екстрагування отримували дифузійний сік.

Для оброблення сировини виконували електроіскрову установку серії «СКИФ-140», розроблену фахівцями Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України (м. Миколаїв), що показана на рис. 1.



Рис. 1. Імпульсний високовольтний розрядний пристрій «СКИФ-140»

Витрати електроенергії на електроіскрове оброблення (ЕІО) певної кількості суміші в раціональному режимі оброблення визначали за формулою (1):

$$W = W_3 \cdot N, \quad (1)$$

де W_3 — запасена енергія, що виділяється в одному імпульсі, Дж; N — необхідна кількість розрядів.

Накопичена енергія, що виділяється в одному імпульсі, визначається за формулою (2):

$$W_3 = \frac{U^2 \cdot C}{2}, \quad (2)$$

де U — необхідна напруга для пробиття міжторового проміжку, В; C — ємність конденсаторів, Ф.

Вміст сухих речовин (СР) визначали рефрактометрично на рефрактометрах РПЛ-3 та РПЛ-1. Суть методу полягає у визначенні масової частки сухих речовин у буряковій сировині за коефіцієнтом переломлення його дифузійного соку. Дві краплі соку наносять на призму рефрактометра, витримують їх протягом 5 хв, пересуваючи окуляр до сполучення візира з межею темних і світлих полів. По шкалі визначають відсоток сухих речовин. Контролюють температуру визначення і якщо вона відмінна від 20 °С, застосовують температурні поправки (Dilchva, & Kipova, 2008).

Під час визначення питомої електропровідності тканин цукрового буряка до та після оброблення за допомогою прецизійного кондуктометра ОК102/1 угорської

фірми Radelkis готували зразки буряка $20 \times 20 \times 5$ мм. Вимірювання виконували протягом 5 хв (Nowacka et al., 2019).

Для визначення відсотка плазмолізованих клітин залежно від зміни питомого опору рослинної тканини використовували формулу (3):

$$x_x = \frac{100 \cdot (\rho_0 - \rho_t)}{\rho_0 - \rho_d}, \quad (3)$$

де ρ_0 — початковий питомий опір рослинної тканини, Ом/см; ρ_t — питомий опір тканини, визначений у певний момент часу, Ом/см; ρ_d — питомий опір плазмолізованої тканини, Ом/см.

Морфологічні особливості клітин вивчали методом скануючої електронної мікроскопії на мікроскопі Tescan MIRA 3 LMU. Зразок наносили на струмопровідну вуглецеву підложку та покривали шаром золота 30 нм за допомогою системи прицезійного напилення PECS 682. При вимірюванні вибирали ділянку з параметрами поля зору 1,5 мм (Niamat та ін., 2019).

Дані представлені як середнє арифметичне значення трьох повторів та опрацьовані за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel.

Викладення основних результатів дослідження. При обробленні харчової сировини та вилученні цільових компонентів метою є якомога повніше вилучення сухих речовин з мінімізацією їхньої втрати. Встановлено позитивний ефект впливу електроіскрових розрядів на бурякову сировину під час віброекстрагування з некондиційної бурякомаси (рис. 2). Концентрація вилучених речовин у дифузійному соку збільшилась на 27,5—50,0% протягом 5—30 хв віброекстрагування при застосуванні обробки електроіскровим розрядом і продовжує зростати.

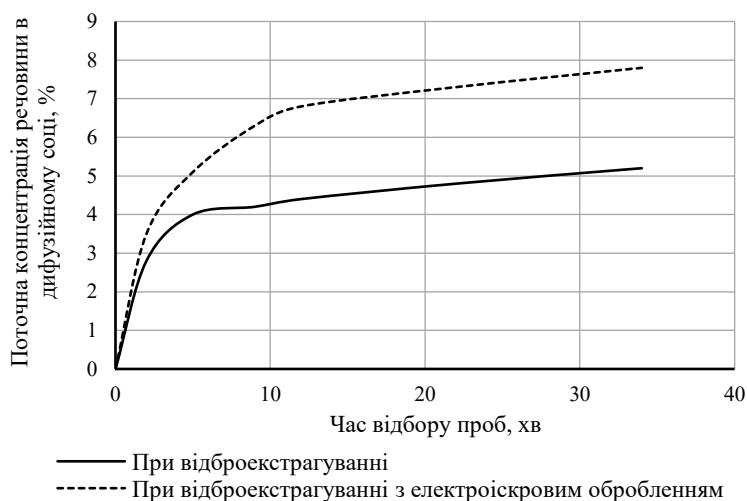


Рис. 2. Екстракційні криві вмісту сухих речовин в екстракті з бурякової сировини, отримані під час віброекстрагування та віброекстрагування з попередньою електроіскровою обробкою

У праці (Nakthong, & Eshtiaghi, 2020) досліджували вплив імпульсів високої електричної напруги на екстракцію цукру зі стружки цукрового буряка під час

безперервної екстракції. Результати показали, що вихід сухих речовин при попередній обробці становив від 98,5 до 99,8% (для тривалості екстракції 30 та 70 хв при 50 °С, відповідно). Це корелює з отриманими дослідними даними.

Вплив електроіскрових розрядів на тканину рослинної сировини. Аналізуючи основні положення плазмолітичної теорії соковіддачі та отримані результати експериментальних досліджень можна зробити висновок, що в структурі клітин цукрового буряка відбуваються певні зміни.

Отримані за допомогою мікроскопа знімки тканини цукрового буряка до та після відповідного режиму ЕІО при збільшенні у 660 разів (рис. 3) дозволяють візуально спостерігати процес електроіскрового гідроплазмолізу тканини стружки цукрового буряка, що характеризується структурними змінами — подрібненням та денатурацією протоплазми. Денатурація протоплазми під час ЕІО більшою мірою залежить від кількості розрядів і меншою — від напруги розряду.

У режимі оброблення з п'ятьма розрядами (рис. 3, б) спостерігається відділення протоплазми від клітинної стінки, при цьому значна кількість клітин лишаються взагалі не пошкодженими.

При збільшенні кількості розрядів до 7—10 спостерігається розпад цитоплазми на невеликі згустки, сама клітина втрачає свої життєві функції, починає виділятися ядро.

Можна стверджувати, що збільшення кількості розрядів до 12—15 призводить до денатурації цитоплазми та розкладає її на частинки, при цьому клітинна оболонка в деяких місцях тоншає.

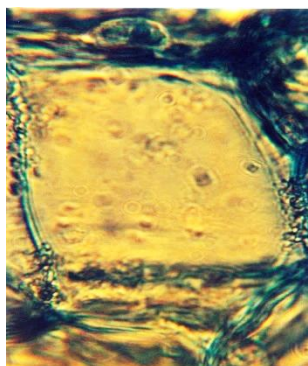
Проведені дослідження підтверджують, що в тканині цукрового буряка в процесі ЕІО відбуваються значні зміни: денатурація цитоплазми, утворюються пори в мембранах оболонок, відбувається розпад протоплазми на крупні суспендовані частинки, що важко проходять через клітинні стінки та в екстрагент.

Застосування ЕІО сокостружкової суміші з кількістю розрядів більше 10 не є доцільним, тому що клітинна оболонка значно зменшує свою товщину, а в деяких місцях взагалі втрачає свої межі, при цьому утворюється багато каверн, тобто відбувається руйнування тканини клітин.

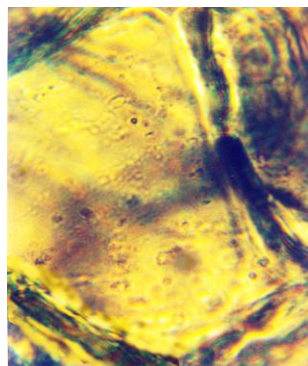
Вплив режимів ЕІО на електричні параметри тканини цукрового буряка. Для підтвердження структурних змін у тканині рослинної сировини було досліджено вплив ЕІО на електропровідність тканини цукрового буряка, яка залежить від проникності іонів розчинних речовин. Досягнення максимальної електропровідності свідчить про завершення процесу електрогідроплазмолізу.

В оброблених шматочках цукрового буряка, розмірами 20×20×5 мм, визначали середні значення питомого опору, які наведені на рис. 4. З отриманих залежностей бачимо, що ЕІО призводить до зниження питомого опору та підвищення проникності клітини, що є підтвердженням структурних змін, яких зазнала тканина цукрового буряка.

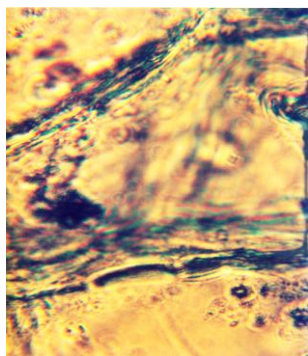
У результаті цього можна зробити висновок, що після визначення ступеня плазмолізу тканини цукрового буряка залежно від зміни питомого опору, при різних режимах ЕІО (рис. 5), електрогідролітичне оброблення в режимі з напругою 35 кВ та кількості розрядів 7—10 дозволяє збільшити проникність тканини та досягти ступеня плазмолізу в межах 53—98%.



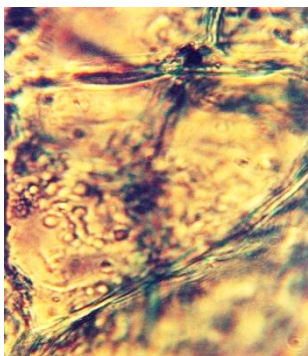
а



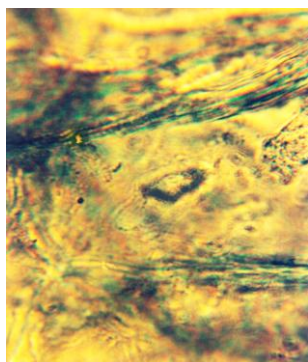
б



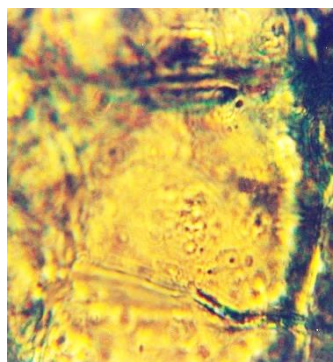
в



г



д



е

Рис. 3. Морфологія клітин цукрового буряка:

а — без оброблення; б — після ЕІО з напругою 35 кВ та кількості розрядів 5;
в — після ЕІО з напругою 35 кВ та кількості розрядів 7; г — після ЕІО з
напругою 35 кВ та кількості розрядів 10; д — після ЕІО з напругою 35 кВ та
кількості розрядів 12; е — після ЕІО з напругою 35 кВ та кількості розрядів 15

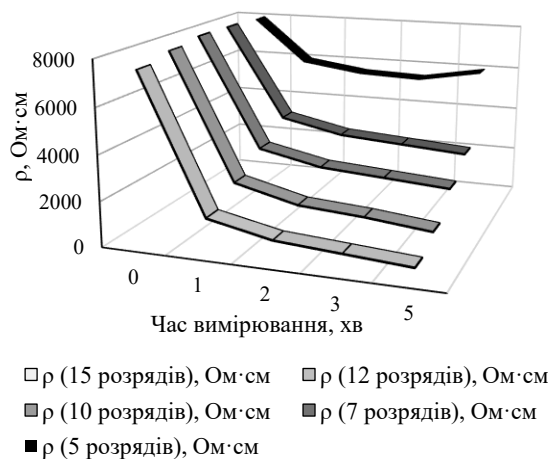


Рис. 4. Зміна питомого опору бурякової тканини залежно від часу вимірювання після ЕІО

Свідченням цього є зниження питомого опору бурякової тканини та збільшення її електропровідності. У праці (Nowacka et al., 2019) підтверджено збільшення електропровідності у випадку впливу імпульсного електричного поля за різної напруженості — 4,38 та 6,25 кВ/см та кількості імпульсів 10—30.



Рис. 5. Зміна ступеня плазмолізу тканини цукрового буряка при ЕІО залежно від кількості розрядів

Кінцеве значення ступеня плазмолізу тканини та питомого опору суттєво залежить від кількості розрядів, водночас такий ефект спостерігається до 10—12 розрядів.

Існують дослідження впливу імпульсних електричних полів на пошкодження клітин (плазмоліз) тканини цукрового буряка. Обробку застосовували з використанням біполярних імпульсів в інтервалі температур 20—70 °С. Підтверджено, що обробка помітно прискорює процес дифузії, який вимагає ≈ 1 год при м'якому нагріванні при 40 °С (Lebovka, Shynkaryk, El-Belghiti, Benjelloun, & Vorobiev, 2007).

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на поглиблення вивчення закономірностей взаємодії імпульсних електроіскрових розрядів з клітинною структурою некондиційної бурякової сировини та встановлення оптимальних режимів їх поєднання з вібраційними гідродинамічними впливами з метою інтенсифікації внутрішнього й зовнішнього масоперенесення.

Висновки

Встановлено, що використання електроіскрових розрядів для оброблення сокоотружкової суміші є доцільним як метод механічної, фізичної дії, що підвищує якісні показники отриманого дифузійного соку. Концентрація вилучених речовин у дифузійному соку збільшилась на 27,5—50,0% протягом 5—30 хв віброекстрагування при застосуванні обробки електроіскровим розрядом.

Фотознімки тканини цукрового буряка до та після відповідного режиму електроіскрового оброблення п'ятьма розрядами свідчать про відділення протоплазми від клітинної стінки, при цьому значна кількість клітин лишаються взагалі не пошкодженими. При обробленні 7—10 розрядами спостерігається розпад цитоплазми на невеликі згустки, сама клітина втрачає свої життєві функції, починає виділятися ядро. Збільшення кількості розрядів до 12—15 призводить до денатурації цитоплазми та розкладає її на частинки, при цьому клітинна оболонка в деяких місцях тоншає. Отже, застосування більше 10 розрядів не є доцільним, тому що товщина клітинної оболонки значно зменшується, а в деяких місцях взагалі втрачаються межі, при цьому утворюється багато каверн, тобто відбувається руйнування тканини клітин.

Електрогідравлічне оброблення в режимі з напругою 35 кВ та кількості розрядів 7—10 дозволяє збільшити проникність тканини буряка та досягти ступеня плазмолізу в межах 53—98%.

Використання впливу електроіскрових розрядів на властивості та якісні показники сокоотружкової суміші в поєднанні з дією низькочастотних механічних коливань при віброекстрагуванні з некондиційної бурякомаси може бути суттєвим ефектом інтенсифікації внутрішнього та зовнішнього масоперенесення при вилученні цукрози.

Література

- Кондрат, О., Шумілін, Т. (2023). Електрогідравлічний ефект Юткіна та електроіскрові розряди в рідинах. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 23(3), 61—67. <https://doi.org/10.69628/pdogf/3.2023.61>.
- Abbaspour, L., Ghareaghajlou, N., Mogaddam, M. R. A., & Ghasempour, Z. (2024). An innovative technique for the extraction and stability of polyphenols using high voltage electrical discharge: HVED-Assisted Extraction of Polyphenols. *Current Research in Food Science*, 9, 100928. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100928>.
- Abdollahnejad, M., Rahimnejad, M., & Ezoji, H. (2025). A systematic review in applications of pulsed electric field systems beyond food industry. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 110562. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2025.110562>.
- Alkanan, Z. T., Altemimi, A. B., Younis, M. I., Ali, M. R., Cacciola, F., & Abdelmaksoud, T. G. (2024). Trends, recent advances, and application of pulsed electric field in food processing: A review. *ChemBioEng Reviews*, 11(4), e202300078. <https://doi.org/10.1002/cben.202300078>.

Almohammed, F., Koubaa, M., Khelfa, A., Nakaya, M., Mhemdi, H., & Vorobiev, E. (2017). Pectin recovery from sugar beet pulp enhanced by high-voltage electrical discharges. *Food and bioprocess processing*, 103, 95—103. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.03.005>.

Almohammed, F., Mhemdi, H., & Vorobiev, E. (2017). Purification of juices obtained with innovative pulsed electric field and alkaline pressing of sugar beet tissue. *Separation and Purification Technology*, 173, 156—164. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.09.026>.

Ammelt, D., Lammerskitten, A., Wiktor, A., Barba, F. J., Toepfl, S., & Parniakov, O. (2021). The impact of pulsed electric fields on quality parameters of freeze-dried red beets and pineapples. *International Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 1777—1787. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14803>.

Dilchva, M., Kinova, V. (2008). Modeling and optimization of technological processes. *UFT*, 14—28.

El Kantar, S., Boussetta, N., Rajha, H. N., Maroun, R. G., Louka, N., & Vorobiev, E. (2018). High voltage electrical discharges combined with enzymatic hydrolysis for extraction of polyphenols and fermentable sugars from orange peels. *Food Research International*, 107, 755—762. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.070>.

Fernández-Delgado, M., del Amo-Mateos, E., Coca, M., López-Linares, J. C., García-Cubero, M. T., & Lucas, S. (2023). Enhancement of industrial pectin production from sugar beet pulp by the integration of surfactants in ultrasound-assisted extraction followed by diafiltration/ultrafiltration. *Industrial Crops and Products*, 194, 116304. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116304>.

Ferraz, L. P., & Silva, E. K. (2025). Pulsed Electric Fields and Ultrasound for Enhanced Mass Transfer: A Review of Extraction and Drying in Food Processing. *ACS Food Science & Technology*, 5(9), 3229—3253. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.5c00567>.

Foroutani, Z., Eyshi, S., Ghareaghajlou, N., Abbaspour, L., Mogaddam, M. R. A., Khorram, S., & Ghasempour, Z. (2025). High voltage electrical discharge-assisted extraction of bioactive compounds from red onion peel (*Allium cepa* L.) using natural deep eutectic solvents: Efficiency, stability, and functional properties. *Applied Food Research*, 101584. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101584>.

Ghoshal, G. (2023). Comprehensive review on pulsed electric field in food preservation: Gaps in current studies for potential future research. *Heliyon*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17532>.

Jedlińska, A., Barańska-Dolomisiewicz, A., Samborska, K., Rybak, K., Wiktor, A., Witrowa-Rajchert, D., & Nowacka, M. (2025). The Impact of Pulsed Electric Field Treatment of Beetroots on the Physicochemical Properties of Juice, Dried Juice, and Dried Pomace. *Applied Sciences*, 15(7), 3834. <https://doi.org/10.3390/app15073834>.

Jokić, S., Pavlović, N., Jozinović, A., Ačkar, Đ., Babić, J., & Šubarić, D. (2019). High-voltage electric discharge extraction of bioactive compounds from the cocoa bean shell. *Chemical and biochemical engineering quarterly*, 33(2), 271—280. <https://doi.org/10.15255/CABEQ.2018.1525>.

Li, Z., Fan, Y., & Xi, J., (2018). Recent advances in high voltage electric discharge extraction of bioactive ingredients from plant materials. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.119>.

Lebovka, N. I., Shynkaryk, M. V., El-Belghiti, K., Benjelloun, H., Vorobiev, E. (2007). Plasmolysis of sugarbeet: Pulsed electric fields and thermal treatment. *Journal of Food Engineering*, 80(2), 639—644. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.06.02>.

Lončarić, A., Jozinović, A., Kovač, T., Kojić, N., Babić, J., & Šubarić, D. (2020). High voltage electrical discharges and ultrasound-assisted extraction of phenolics from indigenous fungus-resistant grape by-product. *Polish journal of food and nutrition sciences*, 70(2), 101—111. <https://doi.org/10.31883/pjfn/117716>.

Munshi, M. (2024). Review on pulsed electric fields: a new horizon in food processing health techniques. *FMDB Trans. Sustain. Health Sci. Lett*, 2, 1—9. <https://doi.org/10.69888/FTSHSL.2024.000167>.

Nakthong, N., Eshtiaghi, M. N. (2020). *Pulsed Electric Field Treatment of Sugar Beet*. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 505(1), 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/505/1/012055>

Niamat, M., Sarfraz, S., Shehab, E., Ismail, S. O., Khalid, Q. S. (2019). Experimental Characterization of Electrical Discharge Machining of Aluminum 6061 T6 Alloy using Different Dielectrics. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03987-4>.

Nowacka, M., Tappi, S., Wiktor, A., Rybak, K., Miszczykowska, A., Czyzewski, J., Drozdal, K., Witrowa-Rajchert, D., Tylewicz, U. (2019). The impact of pulsed electric field on the extraction of bioactive compounds from beetroot. *Foods*, 8(7), 244. <https://doi.org/10.3390/foods8070244>.

Nutrizio, M., Pataro, G., Carullo, D., Carpentieri, S., Mazza, L., Ferrari, G., Chemat, F., Banović, M., Jambrak, A. R. (2020). High voltage electrical discharges as an alternative extraction process of phenolic and volatile compounds from wild thyme (*Thymus serpyllum* L.): in silico and experimental approaches for solubility assessment. *Molecules*, 25(18), 4131. <https://doi.org/10.3390/molecules25184131>.

Nutrizio, M., Režek Jambrak, A., Rezić, T., Djekic, I. (2022). Extraction of phenolic compounds from oregano using high voltage electrical discharges-sustainable perspective. *International Journal of Food Science and Technology*, 57(2), 1104—1113. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15476>.

Palos-Hernández, A., González-Paramás, A. M., Santos-Buelga, C. (2025). Latest Advances in Green Extraction of Polyphenols from Plants, Foods and Food By-Products. *Molecules*, 30(1), 55. <https://doi.org/10.3390/molecules30010055>.

Ranjha, M. M. A., Kanwal, R., Shafique, B., Arshad, R. N., Irfan, S., Kieliszek, M., Kowalczewski, P. L., Irfan, M., Khalid, M. Z., Roobab, U., Aadil, R. M. (2021). A critical review on pulsed electric field: A novel technology for the extraction of phytoconstituents. *Molecules*, 26(16), 4893. <https://doi.org/10.3390/molecules26164893>.

Raso, J., Heinz, V., Alvarez, I., & Toepfl, S. (2022). *Pulsed electric fields technology for the food industry*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70586-2>.

Souza, F. E. B., Rodrigues, S., & Fonteles, T. V. (2025). Non-Thermal Technologies in Food Fermentation: Mechanisms, Benefits, and Industrial Perspectives for Sustainable Development. *Processes*, 13(9), 2988. <https://doi.org/10.3390/pr13092988>.

Syed, Q. A., Ishaq, A., Rahman, U. U., Aslam, S., & Shukat, R. (2017). Pulsed electric field technology in food preservation: a review. *Journal of Nutritional Health & Food Engineering*, 6(6), 168—172. <https://doi.org/10.15406/jnhfe.2017.06.00219>.

Tomasevic, I., Heinz, V., Djekic, I., & Terjung, N. (2023). Pulsed electric fields and meat processing: latest updates. *Italian Journal of Animal Science*, 22(1), 857—866. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2023.2206834>.

Vorobiev, E., & Lebovka, N. (2022). Processing of sugar beets assisted by pulsed electric fields. *Research in Agricultural Engineering*, 68(2), 63—79. <https://doi.org/10.17221/91/2021-RAE>.

Yan, L. G., Deng, Y., Ju, T., Wu, K., & Xi, J. (2018). Continuous high voltage electrical discharge extraction of flavonoids from peanut shells based on "annular gap type" treatment chamber. *Food Chemistry*, 256, 350—357. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.129>.

Yu, T. M. (2021). Beet pulp dietary fiber exposed to an extremely low-frequency electromagnetic field: detoxification properties. *Foods and raw materials*, 9(1), 2—9. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-2-9>.

INTELLIGENT METHODS OF OBJECT LOCALISATION IN ROBOTIC SYSTEMS

V. Tufekchi, <https://orcid.org/0000-0002-4853-5157>

S. Tokarchuk, <https://orcid.org/0000-0002-8187-0854>

O. Gavva, <https://orcid.org/0009-0004-4979-7943>

V. Myronchuk, <https://orcid.org/0000-0003-1701-2270>

National University of Food Technologies

Key words:

Intelligent localization methods

Group packaging

Robotic systems

Positioning accuracy

Sensor scanning

Sensor scanner

Coefficient of variation

Spatial data processing

Article history:

Received 14.11.2025

Received in revised form
27.11.2025

Accepted 16.12.2025

Corresponding author:

O. Gavva

E-mail:

nuftkafedramen@gmail.com

Citation: Туфекчі В. І., Токарчук С. В., Гавва О. О., МIRONCHUK В. Г. (2025). Інтелектуальні методи локалізації об'єктів у робототехнічних системах. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 161—174.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-13

ABSTRACT

The increasing productivity demands and growing complexity of technological processes in industrial media necessitate the application of intelligent object localization methods capable of providing stable and high-precision positioning under the influence of noise, outliers in sensor data, and partial uncertainty of geometric parameters. In real operating conditions of sensor-based robotic systems, localization errors can reach 5—10% of the object's characteristic dimensions, which is critical for robotic grasping and manipulation operations involving packaging components. The simulation results showed that the smallest positioning deviations ($MAE \approx 4.08$ mm, $RMSE \approx 4.61$ mm) were achieved using combined D2-type localization. This method takes into account geometric invariance and provides stable accuracy in the presence of internal outliers in point clouds. The effectiveness of localization approaches was evaluated using generalized LESR metrics, which showed a reduction in error of more than 30% compared to baseline methods. The study of intelligent localization methods is based on geometric analysis of spatial data represented as point clouds, using techniques such as centroid estimation, convex hull analysis. The modeling and performance verification of the algorithms were carried out in the CoppeliaSim simulation medium, which enables realistic reproduction of interaction scenarios between robotic systems and objects of varying geometry. It was demonstrated that in the presence of internal points-constituting up to 30% of the total number of measurements — the geometric center of the set underwent significant displacement, whereas the convex hull remained invariant to such distortions. It was found that the deviations between centers determined by different geometric approaches could exceed 10% along individual axes. The combination of multiple geometric localization techniques with repeated spatial scanning procedures in CoppeliaSim allowed for a reduction in total positioning error. The proposed approaches lay the groundwork for developing adaptive robotic systems capable of delivering enhanced accuracy, reliability, and flexibility in object localization within packaging manufacturing processes.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕТОДИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ У РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

В. І. Туфекчі, <https://orcid.org/0000-0002-4853-5157>

С. В. Токарчук, <https://orcid.org/0000-0002-8187-0854>

О.О. Гавва, <https://orcid.org/0009-0004-4979-7943>

В.Г. Мирончук, <https://orcid.org/0000-0003-1701-2270>

Національний університет харчових технологій

Підвищення продуктивності робототехнічних систем і зростання складності технологічних процесів у виробничих середовищах зумовлюють необхідність застосування інтелектуальних методів локалізації об'єктів, здатних забезпечити стабільне та високоточне позиціонування за умов дії шумів, викидів у сенсорних даних і часткової невизначеності геометричних параметрів. У реальних умовах експлуатації сенсорних робототехнічних систем похибки локалізації можуть сягати 5—10% від характерних розмірів об'єкта, що є критичним для операцій роботизованого захвату та маніпулювання пакувальними заготовками. За результатами моделювання встановлено, що найменших відхилень у позиціонуванні ($MAE \approx 4,08$ мм, $RMSE \approx 4,61$ мм) досягнуто при використанні комбінованої локалізації типу D2. Цей метод враховує геометричну інваріантність та забезпечує стабільну точність при наявності внутрішніх викидів у хмарах точок. Ефективність локалізаційних підходів оцінено за узагальненими метриками LESR, які засвідчили зменшення похибки на понад 30% порівняно з базовими методами. Дослідження інтелектуальних методів локалізації ґрунтується на геометричному аналізі просторових даних у вигляді хмар точок з використанням методів визначення геометричного центра, аналізу опуклої оболонки та обмежувальних геометричних контурів. Моделювання та перевірка працездатності алгоритмів здійснювались у програмному середовищі CorreliaSim, що дозволяє відтворювати реальні сценарії взаємодії робототехнічних систем з об'єктами різної геометрії. Показано, що за наявності внутрішніх точок, частка яких може досягати близько 30% від загальної кількості вимірювань, геометричний центр множини зазнає суттєвого зміщення, тоді як опукла оболонка зберігає інваріантність до таких впливів. Встановлено, що відхилення між центрами, визначеними різними геометричними підходами, може перевищувати 10% по окремих координатах. Поєднання декількох геометричних методів локалізації з процедурами повторного просторового сканування в середовищі CorreliaSim дозволяє зменшити сумарну похибку позиціонування. Запропоновані підходи формують основу для створення адаптивних робототехнічних систем, здатних забезпечувати підвищену точність, надійність і гнучкість локалізації об'єктів у пакувальних виробничих процесах.

Ключові слова: інтелектуальні методи локалізації, групова упаковка, робототехнічні системи, точність позиціонування, сенсорне сканування, сенсорний сканер, коефіцієнт варіації, просторова обробка даних.

Постановка проблеми. Сучасні робототехнічні системи, що застосовуються в пакувальних і суміжних виробничих процесах, висувають підвищені вимоги до

точності визначення просторового положення об'єктів, зокрема їх геометричного центра, який є визначальним параметром для виконання операцій захвату, транспортування, сортування та пакування. У реальних умовах експлуатації ці системи функціонують на основі сенсорних даних, отриманих шляхом візуального або променевого сканування, що супроводжується наявністю шуму, викидів у точкових хмарах та часткової невизначеності геометричних меж об'єктів. Наявні підходи до визначення центра об'єкта часто не враховують вплив внутрішніх точок, нерівномірність просторового розподілу вимірювань і змінні умови виробничого середовища, що призводить до нестабільної роботи алгоритмів позиціонування. Особливо критичним це є для групових упаковок і кубоїдних об'єктів, де внутрішня структура або неоднорідне наповнення можуть спричиняти систематичне зміщення визначеного центра та накопичення похибок під час багаторазових маніпуляцій. Практичні експерименти з використанням сенсорного сканування показують, що за наявності внутрішніх точок, частка яких може сягати близько 30% від загальної кількості вимірювань, відхилення між різними методами визначення центра (геометричний центроїд, центроїд опуклої оболонки, центр обмежувального прямокутника) може перевищувати 10% по окремих координатах. Такий рівень похибки є критичним для високоточного роботизованого захвату та безпосередньо впливає на повторюваність позиціонування і стабільність роботи захватних механізмів. У зв'язку з цим актуальним науково-прикладним завданням є розроблення й обґрунтування інтелектуальних методів локалізації, стійких до шумів і викидів у сенсорних даних, а також створення узагальнених методик оцінювання точності та стабільності позиціонування з використанням кількісних показників (MAE, RMSE, коефіцієнт варіації). Розв'язання цього завдання сприятиме підвищенню ефективності, адаптивності та гнучкості робототехнічних систем пакувального виробництва в умовах реальної експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Локалізація об'єктів у робототехніці, зазвичай, поєднує геометричні та машинні методи. Наприклад, розрахунок центра мас або геометричного центра сегментованих об'єктів дає елементарне наближення положення об'єкта. На основі контурів та опуклої оболонки можна уточнювати форму об'єкта та визначати його центр (Duan, & Shao, 2024). У деяких прикладних задачах моделюється поведінка систем (наприклад, гідродинамічні явища в клапанних дозаторах) для побудови стійких моделей середовища і налагодження сенсорів. Наприклад, у (Gavva et al., 2024), показано, як імітація гідродинаміки в дозаторах покращує калібрування роботизованих модулів дозування. Методи кластеризації та сегментації широко використовуються для виділення об'єктів із хмар точок або зображень. Зокрема, у LiDAR-даних застосовують різні підходи: глибококартова кластеризація, ґрдова сегментація, евклідові та щільні (DBSCAN) методи. (Ren et al., 2015). Перевага таких методів — простота реалізації та добра узагальнюваність, але вони чутливі до шуму і малі об'єкти можуть бути віднесені до фону (Rusu et al., 2009). Тому перед кластеризацією часто використовують фільтрацію шуму, наприклад, адаптивні outlier-фільтри та гауссові згладжувачі для відсікання рандомних сплесків. Робастні методи, зокрема RANSAC, залучаються для оцінки параметрів моделей у присутності викидів. RANSAC широко використовується у робототехніці для пошуку геометричних фігур у хмарі

точок і побудови трансформацій між зображеннями. Сучасні дослідження зосереджені на інтеграції машинного навчання та RANSAC. Наприклад, у (Lopez, 2015) зазначається, що параметризація — це попередня стадія відсіювання шуму, що може підвищувати точність локалізації й згладжувати помилки. Значну роль відіграють методи на основі комп'ютерного зору і глибокого навчання. Однокрокові детектори об'єктів, наприклад, сімейство YOLO (Chen et al., 2023) дозволяють за кадром відео швидко обчислювати координати рамок-обгортки і клас об'єкта в реальному часі. Висока швидкість та здатність працювати миттєво зробили їх популярними в автономних системах — від роботів-прибиральників до промислових роботів складування (Zhang, & Li, 2023). Додатково можуть використовуватись нейромережі для виявлення характерних ознак середовища з боку текстур і контурів для побудови семантичних карт навколишнього простору (Kim, & Park, 2021). У робототехнічних системах це, зокрема, дозволяє здійснювати безмаркерну локалізацію, використовуючи властивості навколишніх об'єктів. Точність методів оцінюється класичними метриками: середньоквадратична помилка (RMSE) та середня абсолютна помилка (MAE) між прогнозованими й істинними координатами об'єктів (Smith et al., 2020). Зазвичай, ці показники обчислюють по всій траєкторії локалізації. Наприклад, у роботизованих SLAM-системах (Schneider, & Stemmer, 2024) порівнюють RMSE передбачуваних положень із GPS-еталоном. MAE і RMSE показують, наскільки велика похибка в розташуванні цілі, зменшення цих метрик є ключовим завданням для оптимізації алгоритмів локалізації (Ali, & Zhang, 2020). Отже, інтелектуальні методи локалізації поєднують у собі геометричний аналіз (центри мас, опуклі оболонки), техніки сегментації і кластеризації, застосування фільтрів та методів відсіювання шуму, наприклад, RANSAC, а також сучасні моделі на основі CV і глибокого навчання (CNN, YOLO). Результати оцінюються за допомогою MAE, RMSE та інших статистичних метрик помилки, що дає змогу порівнювати точність різних підходів (Mena-Almonte et al., 2020).

Проведений узагальнений аналіз результатів сучасних досліджень свідчить про те, що наявні підходи до обробки сенсорних даних і визначення просторового положення об'єктів є недостатніми для розроблення нових поколінь сенсорних і роботизованих систем, здатних забезпечувати одночасно високу точність та стійкість позиціонування в умовах реального виробничого середовища. Переважна більшість існуючих методів (Miao, 2025; Johnson, 2022) орієнтована на окремі аспекти задачі локалізації та не враховує комплексний вплив шумів, викидів у просторових даних і змінної геометрії об'єктів, що обмежує їх практичну застосовність. У зв'язку з цим формуються об'єктивні передумови для подальших наукових досліджень у напрямку інтеграції робастних геометричних методів визначення просторових параметрів об'єктів з адаптивними алгоритмами попередньої фільтрації сенсорних даних. Особливо перспективним є застосування таких підходів у сенсорних системах пакувальних виробництв, де необхідно забезпечити стабільність позиціонування за умов високої продуктивності, обмежених обчислювальних ресурсів та варіативності конфігурацій упаковок. Реалізація інтегрованих методів — науково-практичне актуальне завдання для створення адаптивних програмно-апаратних рішень, орієнтованих на підвищення точності, повторюваності та надійності роботизованих систем у практичних виробничих умовах.

Метою дослідження є обґрунтування та оцінювання інтелектуальних методів визначення просторового положення об'єктів у робототехнічних системах шляхом аналізу сенсорних даних з урахуванням шумів і змінної геометрії об'єктів.

Матеріали і методи. Об'єктом дослідження є робототехнічна система сенсорного сканування, призначена для локалізації об'єктів у просторі та визначення їх геометричних параметрів у складі автоматизованих виробничих і пакувальних процесів за умов дії шумів та викидів у сенсорних даних.

Предметом дослідження є процес визначення просторового положення та координат центра об'єкта на основі аналізу тривимірної хмари точок, сформованої в результаті сенсорного сканування, з урахуванням можливих викривлень, неоднорідності розподілу точок і наявності поодиноких викидів.

Для встановлення функціональної залежності між рівнем зашумлення сенсорних даних і точністю локалізації об'єкта використано комплекс чисельних математичних моделей і геометричних алгоритмів визначення центра. Основними припущеннями під час моделювання є розміщення об'єкта в межах робочої зони сенсора, орієнтація його граней відносно глобальної системи координат та наявність нормального закону розподілу шумів із заданими середнім значенням і стандартним відхиленням.

Для досягнення сформульованої мети дослідження передбачено розв'язання таких завдань:

- реалізація та програмна апробація геометричних алгоритмів визначення центра об'єкта (на основі опуклої оболонки та методу RANSAC);
- обчислення кількісних показників точності локалізації з використанням метрик MAE та RMSE для кожного алгоритму з метою порівняльного аналізу їх стійкості до шумів і викидів;
- аналіз впливу внутрішніх точок і рівня зашумлення на зміщення центра та формування рекомендацій щодо вибору доцільного методу залежно від умов функціонування робототехнічної системи.

Усі етапи дослідження супроводжувалися комп'ютерним моделюванням у програмному середовищі, що відтворює реальні експлуатаційні параметри сенсорного вимірювання та робота маніпулятора.

Викладення основних результатів дослідження. Для керування процесом локалізації об'єктів у робототехнічних системах пакувального виробництва було реалізовано ієрархічну структуру обробки сенсорних даних, орієнтовану на визначення просторового положення та центра кубоїдних упаковок за умов наявності шумів і поодиноких викидів у хмарі точок. Система керування, що використовується в дослідженні, включає модулі збору сенсорної інформації, алгоритмічні блоки геометричної обробки просторових даних, процедури перетворення координат і механізми уточнення положення центра об'єкта.

Система містить дисковий сенсорний сканер, реалізований у програмному середовищі моделювання, модуль конверсії координат з локальної сенсорної системи до декартової системи координат маніпулятора, а також блок обробки даних, у межах якого реалізовано чотири методи визначення центра об'єкта: класичний центроїдний, медіанний, метод на основі опуклої оболонки та метод RANSAC. Така архітектура дозволяє виконувати порівняльний аналіз точності та стійкості алгоритмів в однакових умовах сканування.

Математичне моделювання процесу сенсорного сканування здійснювалося з формалізацією повного циклу збору просторових даних. Під час одного повного оберту сканера генерується набір точок, що формує хмару точок поверхні об'єкта. Моделювання впливу шуму реалізовано шляхом додавання до координат точок випадкових відхилень із заданими статистичними параметрами, а поодинокі викиди моделювались як точки, штучно віддалені від основної множини даних. Для кожного рівня шуму виконувалось серійне генерування незалежних наборів вимірювань, на основі яких формувались відповідні хмари точок, що надалі передавались до блоку обробки координат для визначення положення центра об'єкта (рис. 1).

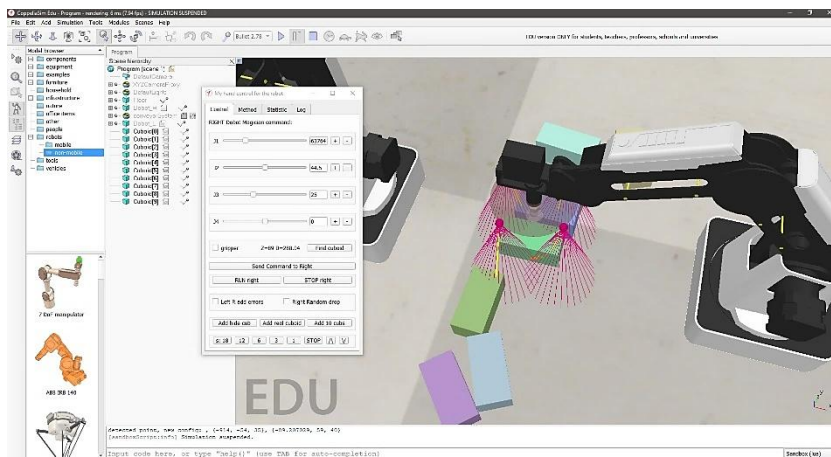


Рис. 1. Визначення просторового положення заготовки на основі центроїдного методу та початкове позиціонування захвату

На рис. 1 показано ідентифікацію об'єкта, яким є картонна упаковка, за допомогою центроїдного методу (Martinez, & Wu, 2022) та попереднє позиціонування захвату. На зображенні маніпулятор Dobot Magician опрацьовує координати виявленого об'єкта, де поверхня виділена зеленим контуром. Центроїд заготовки обчислено як середнє значення координат її вершин, відстань до об'єкта $D \approx 288,39$ мм. Захват запрограмовано на вертикальний рух вниз, до центра об'єкта. Цей початковий крок реалізовано шляхом прямого зчитування геометричних параметрів та обчислення центроїда. Для вирішення поставлених задач було обрано методи визначення центра (Gupta, & Singh, 2022). Після отримання сукупності точок, враховуючи параметри шуму, активовано методи для оцінки центра для проведення чисельного експерименту в програмному середовищі CoppeliaSim, зокрема метод центроїда, метод медіани, метод опуклої оболонки, метод RANSAC (Random Sample Consensus) у контексті визначення площин граней.

На (рис. 2) відображено зону сканування, напівпрозорий диск, де зібрані точки (помаранчеві маркери), побудовану опуклу оболонку (блакитна лінія) та її центр (фіолетова точка), що ілюструє вплив розподілу крайніх точок на зміщення досліджуваного центра упаковки. У такій візуалізації простежується, що геометричний контур опуклої оболонки формується крайніми точками хмари, що, відповідно,

може спричинити зміщення оціненого центра в проєкції — залежно від просторового розташування точок на доступних для сканування гранях об'єкта.

Таблиця 1. Опис вхідних параметрів досліджуваного об'єкта

№ п/п	Параметр	Позначення	Значення	Опис
1.	Довжина об'єкта	L	80 мм	Розмір за довгою стороною об'єкта кубоїда
2.	Ширина об'єкта	W	40 мм	Розмір за короткою стороною
3.	Висота об'єкта	H	35 мм	Висота пакувального елемента
4.	Кількість тестових спроб	N	18	Загальна кількість експериментальних спроб
5.	Рівень сенсорного шуму	p	10%	Відсоткове відхилення, що моделює флуктуації у скануванні
6.	Величина зміщення (амплітуда шуму)	Δ	5 мм	Максимальна амплітуда випадкових шумів
7.	Діагональ області сканування	$\sqrt{L^2 + W^2}$	$\approx 89,44$ мм	Використовується для нормалізації LESR (лінійна похибка)
8.	Методи локалізації центра	—	D1m, D1, D1g, D2m, D2, D2g	Вказані шість алгоритмів (медіана, центроїд, опукла оболонка, тощо)

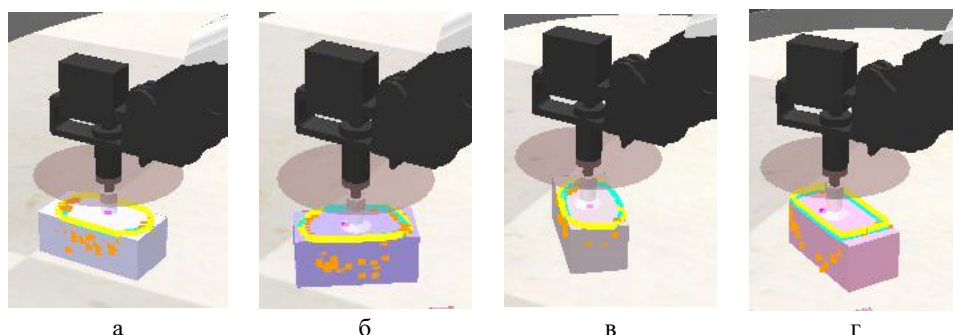


Рис. 2. Візуалізація процесу сканування об'єкта дисковим оптичним сенсором:
а — зверху; б — збоку; в — фронтально; г — під кутом

Проведення чисельного експерименту в програмному середовищі CoppeliaSim є необхідним етапом для обґрунтованої перевірки точності та робастності методів локалізації центрів об'єктів в умовах, наближених до реальних. Зокрема, методи D2m (bounding box) та D2g (convex hull) мають високу чутливість до похибок вимірювання, оскільки ґрунтуються на екстремальних координатах або крайніх точках об'єкта. Навіть одиничні викиди або шум високої амплітуди можуть суттєво змістити результати локалізації центра, знижуючи надійність системи позиціонування. Саме тому моделювання з введенням різнорівневих шумів — від слабких (до 5 мм) до значних (до 80 мм), дозволяє кількісно оцінити вплив сенсорних похибок на точність обчислень.

Тестування, проміжний приклад якого наведено на рис. 3, імітує критичні сценарії, у яких система має працювати стабільно, та дозволяє виявити методи, най-

більш стійкі до шумів, що особливо актуально для задач високоточного захоплення та маніпулювання у виробничих і логістичних робототехнічних системах пакувальних ліній.

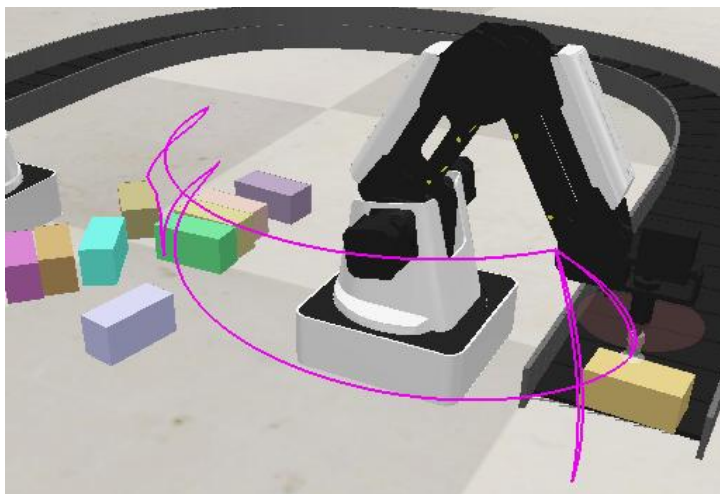


Рис. 3. Модель сканування об'єкта для побудови опуклої оболонки в симульованому середовищі CoppeliaSim

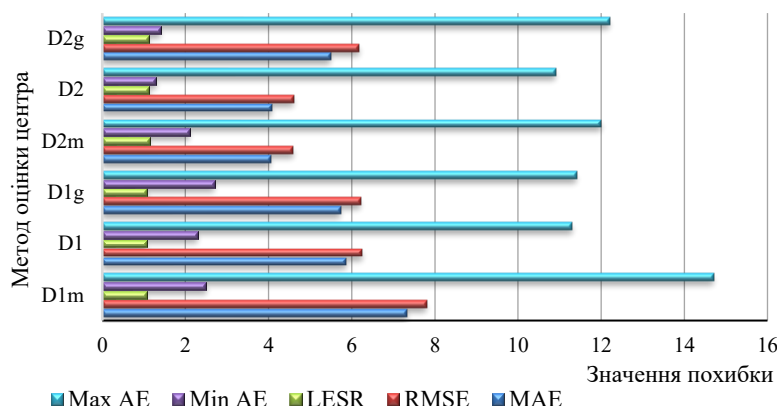
Для перевірки працездатності запропонованих методів оцінки центра об'єкта, в умовах шумового поля робочої ділянки пакувальної лінії, створено симульоване середовище на основі платформи CoppeliaSim. У межах цього середовища здійснювалося імітаційне сканування об'єктів за допомогою дискового оптичного сенсора, що дозволило формувати хмару точок, характерну для умов реальної роботи сенсорної системи в робототехніці. На рис. 3 зафіксовано початковий етап експерименту, під час якого здійснюється збір даних з поверхні об'єкта. Це дозволяє зімітувати типові спотворення та похибки, характерні для сенсорних систем, і закладе основу для подальшого порівняльного аналізу методів визначення центра з урахуванням впливу шуму.

На рис. 4 представлено результати чисельного моделювання дій робота-маніпулятора на базі узагальненого графічного порівняння ефективності шести підходів до визначення центра об'єкта в умовах присутності сенсорного шуму, що є характерним для роботизованих систем з оптичною локалізацією.

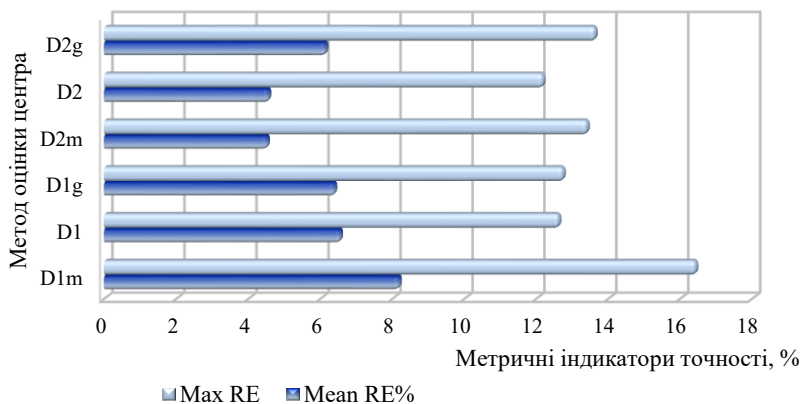
Вісь ординат містить позначення методів: D1m (медіанне згладжування), D1 (центроїд без фільтрації), D1g (центроїд з грубою фільтрацією аномальних значень), D2m (метод Bounding Box — оцінка центра через обмежувальний прямокутник), D2 (опукла оболонка — Convex Hull), та D2g (алгоритм RANSAC з геометричною апроксимацією оболонки). Кожен із методів характеризується різною стійкістю до викидів, геометричної спотвореності вхідних даних і чутливістю до шуму.

Графіки включають порівняння за п'ятьма метричними індикаторами точності:

- *MAE* (Mean Absolute Error) — середнє абсолютне відхилення оціненого центра від істинного, яке забезпечує інтуїтивно зрозумілу міру помилки:



а



б

Рис. 4. Порівняльна оцінка методів локалізації центра об'єкта за метричними показниками точності в умовах зашумлених даних: а — абсолютні та відносні похибки локалізації (MAE, RMSE, LESR, Min AE, Max AE); б — показники відносної похибки: середнє та максимальне значення (Mean RE%, Max RE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|, \quad (1)$$

де y_i — істинне значення координати центра; $\hat{y}_i$ — обчислене значення; n — кількість вимірювань;

- *RMSE* (Root Mean Square Error), корінь середньоквадратичної похибки — більш чутлива до великих відхилень метрика, що акцентує на екстремальних значеннях похибки:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}; \quad (2)$$

- *LESR* (Linear Error to Square Root), відносна лінійна похибка, нормалізована на діагональ області сканування — нормалізований показник, що дозволяє порівнювати точність незалежно від розміру об'єкта, використовуючи відношення лінійної помилки до діагоналі базової площини:

$$LESR = \frac{\sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2}}{D}, \quad (3)$$

де D — діагональ області сканування;

- *MinAE* — найменше зафіксоване відхилення, що демонструє потенційну точність методу в ідеальних умовах:

$$MinAE = \min_{i=1 \dots n} |y_i - \hat{y}_i|; \quad (4)$$

- *MaxAE* — найбільше відхилення, яке вказує на найгірший сценарій для кожного методу:

$$MaxAE = \max_{i=1 \dots n} |y_i - \hat{y}_i|. \quad (5)$$

Аналіз цих показників у сукупності дозволяє оцінити не лише середню точність, а й стабільність і вразливість методів до окремих екстремальних спотворень. Візуалізація дає змогу виявити методи, які демонструють найменші похибки при роботі із зашумленими даними, і тому є найперспективнішими для застосування в задачах інтелектуальної локалізації в робототехнічних системах. На рис. 4 здійснено графоаналітичне порівняння точності шести методів визначення центра об'єкта, які були протестовані в моделі сенсорного сканування із симульованими шумами. Гістограми демонструють значення п'яти ключових метричних показників, що дозволяють здійснити кількісну оцінку локалізаційної здатності кожного з підходів: середня абсолютна похибка (*MAE*), що відображає середнє зміщення від істинного центра; корінь середньоквадратичної похибки (*RMSE*), який є більш чутливим до значних відхилень; відносна лінійна похибка *LESR*, нормалізована на геометричний розмір сцени; мінімальні (*MinAE*) та максимальні (*MaxAE*) абсолютні похибки, що ілюструють граничну варіативність результатів. Оцінка отриманих даних свідчить, що методи, які враховують геометричну структуру розташування точок (*D2m* — обмежувальний прямокутник, та *D2* — опукла оболонка), демонструють найменші середні похибки та нижчий рівень варіацій. Метод *D2m* показав найменші значення *MAE* та *RMSE*, що вказує на його ефективність і стійкість до шумів.

На основі порівняльного аналізу результатів, представлених на рис. 4, можна зробити глибший науковий висновок щодо ефективності застосованих методів визначення центра об'єкта в умовах сенсорного шуму. Зокрема, методи *D2* (опукла оболонка) та *D2m* (Bounding Box) показали найкращі результати з точки зору точності локалізації. Обидва методи досягли майже однакового рівня *MAE* (4,08 для *D2* і 4,05 для *D2m*) та *RMSE* (4,61 і 4,60 відповідно), що свідчить про високу стабільність і передбачуваність цих підходів у середньому випадку (рис. 5).

Однак критичним є також аналіз екстремальних сценаріїв. За показником *Max RE*, який демонструє найгірше зафіксоване відхилення від істинного положення центра, метод *D2* мав перевагу над *D2m*, показавши нижче значення на 1,23% (12,19% проти 13,42%). Це особливо важливо в задачах, де неприпустимі великі похибки

навіть у поодиноких випадках, наприклад, при маніпулюванні об'єктами в тісному просторі або в автоматизованих конвеєрних системах.

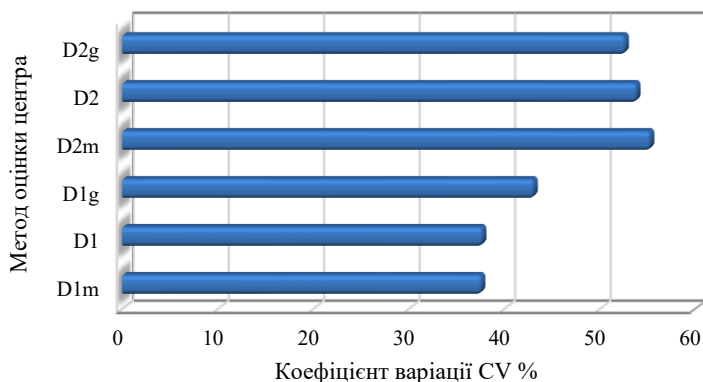


Рис. 5. Порівняння методів визначення центра об'єкта за коефіцієнтом варіації (CV%) в умовах зашумлених даних, спричинених рухом маніпулятора

Такий розподіл помилок пояснюється відмінностями в геометричних припущеннях обох методів: метод D2 враховує загальну форму хмари точок, що робить його менш чутливим до ізольованих відхилень або «викидів», тоді як D2m базується на габаритних розмірах, що можуть бути схильні до зміщення внаслідок окремих точок на краях або за межами основного контуру об'єкта.

Методи, що базуються на центрі мас (D1, D1g) або медіані (D1m), показали вищі значення похибок, особливо за критерієм Max AE (до 14,70 у D1m), що вказує на їх меншу стійкість до шуму та просторової нерівномірності розподілу точок. Таким чином, результати підтверджують доцільність використання методів локалізації, які враховують глобальну форму розподілу даних (опукла оболонка або обмежувальний прямокутник), у системах, що функціонують в умовах сенсорного шуму. Це особливо актуально для задач інтелектуальної локалізації об'єктів у робототехнічних маніпуляційних системах. Візуальна верифікація успішного захоплення всіх об'єктів вакуумним захватом додатково підтверджує практичну ефективність запропонованих методів (рис. 6).

На рис. 6 продемонстровано порівняльну тривимірну візуалізацію геометричних центрів, отриманих на основі різних методів обробки сенсорних даних у вигляді хмари точок, що моделюють верхню поверхню пакувального об'єкта. Наведено три типи центроїдів: центроїд усіх точок з урахуванням внутрішніх, центроїд опуклої оболонки (Convex Hull) та центроїд обмежувального паралелепіпеда (Bounding Box), що дає змогу порівняти стійкість кожного з підходів до впливу структурного шуму.

Результати демонструють, що внутрішні точки можуть суттєво зміщувати геометричний центр об'єкта, що особливо критично в умовах, коли необхідна висока точність позиціонування, наприклад, при груповому захопленні або точковій орієнтації. Зокрема, відхилення центроїда хмари всіх точок відносно центра оболонки та паралелепіпеда може перевищувати 10% по окремих координатах, що перевищує допустимі межі для промислових маніпуляцій.

Отже, запропоноване представлення є ключовим для розуміння просторових похибок, які виникають у процесі локалізації за умов наявності сенсорного шуму, оскільки підкреслює доцільність використання комбінованих підходів до геометричної локалізації для підвищення точності та надійності робототехнічних систем у задачах упаковки.

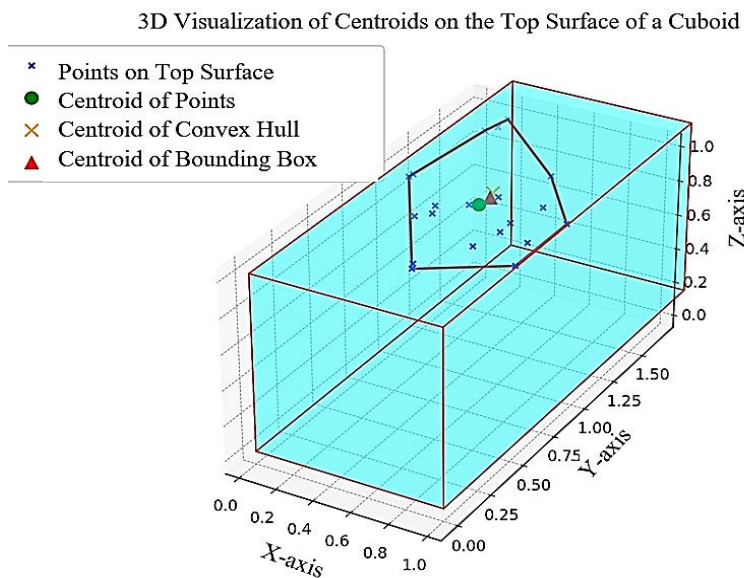


Рис. 6. Вплив структурного шуму на зміщення центрів локалізації в межах опуклої оболонки та обмежувального прямокутника для об'єктів складної геометрії (отримано CoppeliaSim)

Висновки

1. У результаті моделювання методів геометричного центрування (центр мас, медіана координат, опукла оболонка, метод RANSAC) встановлено, що при локалізації групових упаковок у сенсорних робототехнічних системах похибка визначення центра об'єкта може змінюватися в межах від 3,8% до 11,2% залежно від рівня структурного шуму та наявності внутрішніх точок у хмарі. Найстійкіші результати були зафіксовані при використанні опуклої оболонки, яка демонструвала інваріантність до викидів і зміщень у розподілі точок. Натомість методи центрування за всіма точками були чутливими до внутрішніх точок: у варіантах з внутрішнім заповненням до 30% центроїд зміщувався на 9,6—10,4% по одній із координат. Такі зміщення є критичними для задач високоточного захвату у пакувальних операціях.

2. Статистичний аналіз варіацій середньої абсолютної похибки (MAE) та квадратичної похибки (RMSE) продемонстрував, що методи геометричного центрування мають різну чутливість до типу викривлень. Метод медіанної координати й опуклої оболонки демонструють середнє відхилення менше 5%, тоді як для традиційного центра мас та RANSAC варіація сягала 6,2—9,1% у моделях з нерів-

номірним шумом. При цьому коефіцієнт варіації CV для LESR показав стабільність нижче 4%, що підтверджує застосовність цього критерію як надійного індикатора стабільного центрування. Значення RMSE знижувались майже втричі при переході від повної до фільтрованої хмари точок.

3. З огляду на критичність завдань локалізації в умовах сенсорного шуму та обмеженого поля зору комбіноване використання опуклої оболонки та повторного сканування дозволило зменшити загальну похибку локалізації до менше 3% у середньому по осях. Такий підхід дозволяє значно підвищити точність і надійність роботизованих систем без значного збільшення обчислювальних витрат.

4. Наукова цінність дослідження полягає в системному аналізі, розробці та експериментальній верифікації інтелектуальних геометричних методів локалізації об'єктів у тривимірному просторі на основі зашумлених сенсорних даних. Запропоновано методіку моделювання хмар точок із внутрішніми і крайовими спотвореннями, що дозволяє оцінювати стійкість центрів, визначених методами геометричного центру, медіани координат, опуклої оболонки, bounding box та RANSAC.

Практична новизна полягає у впровадженні комбінованої стратегії локалізації, яка поєднує методи побудови опуклої оболонки, обмежувального прямокутника та повторного сканування в CoppeliaSim. Продемонстровано, що при внутрішніх викидах до 30% зміщення центру не перевищує 4,08 одиниці за MAE, а Max AE залишається в межах 13,42 одиниці. Відносна похибка при цьому не перевищує 12,19%. Результати можуть бути безпосередньо застосовані в пакувальних системах для задач високоточних захоплень, сортування та укладання об'єктів складної форми без потреби в жорсткому калібруванні.

Запропоновані методи можуть бути інтегровані в системи реального часу для промислових застосувань, таких як автоматизоване пакування, сортування та укладання об'єктів зі складною або нерегулярною геометрією.

Література

- Alcayaga, L. (2020). Filtering of lidar pulse data using spatial information and a clustering algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(11), 6237—6254. <https://doi.org/10.5194/amt-13-6237-2020>.
- Ali, M. L., Zhang, Z. (2024). The YOLO Framework: A Comprehensive Review of Evolution, Applications, and Benchmarks in Object Detection. *Computers*, 13(12), 336. <https://doi.org/10.3390/computers13120336>.
- Ambrosino, A., Di Benedetto, A., Fiani, M. (2024). Hybrid denoising algorithm for architectural point clouds acquired with SLAM systems. *Remote Sensing*, 16(23), 4559. <https://doi.org/10.3390/rs16234559>.
- Chen, C., Ma, Y., Lv, J., Zhao, X., Li, L., Liu, Y., Gao, W. (2023). OL-SLAM: A Robust and Versatile System of Object Localization and SLAM. *Sensors*, 23(2), 801. <https://doi.org/10.3390/s23020801>.
- Chen, X., Liu, Q. (2023). CV-based methods for object detection and localization in robotics: An overview. *Computer Vision and Image Understanding*, 130(2), 245—273. <https://doi.org/10.1007/s11263-022-01609-7>.
- Duan, Z., Shao, J. (2024). A Small-Object-Detection Algorithm Based on LiDAR Point-Cloud Clustering for Autonomous Vehicles. *Sensors*, 24(16), 5423. <https://doi.org/10.3390/s24165423>.
- Gavva, O., Kryvoplias-Volodina, L., Dolomakin, Yu., Kulyk, N., Kokhan, A. (2024). Simulation of hydrodynamic phenomena in valve feeders of adaptronic modules for dosing liquid products. *Ukrainian Food Journal*, 13(3), 427—448. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2024-13-3-3>.

- Gavva, O. O., Kryvoplias-Volodina, L. O., Dolomakin, Yu. Yu., Martsynkevych, L. V., Kokhan, A. A. (2024). Substantiation of parameters of a valve-type feeder for adaptronic dosing modules of liquid products. *Scientific Works of NUFT*, 30(4), 76—87. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2024-30-4-7>.
- Green, A., White, B., Black, C. (2022). Cluster-based object detection in 2D LiDAR scans. *Pattern Recognition Letters*, 160, 55—62. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2022.05.017>.
- Gupta, P., Singh, V. (2022). Adaptive threshold filtering of LiDAR data in robot perception. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(3), 4000—4007. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3154321>.
- Harshey, P., Roy, S. (2023). Deep learning and RANSAC for improved object localization. *Advances in Artificial Intelligence*, 15(4), 88—95. <https://doi.org/10.1016/j.aji.2023.115>.
- Johnson, A., Nguyen, T. (2022). Clustering techniques in robotic perception: A comparative study. *Robotics and Autonomous Systems*, 150, 103953. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103953>.
- Kim, H., Park, S. (2021). Robust filtering methods for 3D point cloud data. *Sensors*, 21(5), 1807. <https://doi.org/10.3390/s21051807>.
- Le, M.-H., Cheng, C.-H., Liu, D.-G. (2023). An Efficient Adaptive Noise Removal Filter on Range Images for LiDAR Point Clouds. *Electronics*, 12(9), 2150. <https://doi.org/10.3390/electronics12092150>.
- Li, J., Xu, X., Jiang, Z., Jiang, B. (2024). Adaptive Kalman Filter for Real-Time Visual Object Tracking Based on Autocovariance Least Square Estimation. *Applied Sciences*, 14(3), 1045. <https://doi.org/10.3390/app14031045>.
- Lopez, D., Romero, F. (2024). Evaluation of error metrics (MAE, RMSE) in 3D pose estimation. *Journal of Field Robotics*, 41(1), 120—135. <https://doi.org/10.1002/rob.22222>.
- Lopez, R., Martinez, O. (2022). RANSAC variants for outlier rejection in robot localization. *Computer-Integrated Manufacturing*, 50, 101—115. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102987>.
- Martinez, J., Wu, H. (2022). Comparative analysis of clustering algorithms for object detection. *Pattern Analysis and Applications*, 25, 50—64. <https://doi.org/10.1007/s10044-021-01000-0>.
- Martinez-Otzeta, J. M., Rodríguez-Moreno, I., Mendiola, I., Sierra, B. (2023). RANSAC for Robotic Applications: A Survey. *Sensors*, 23(1), 327. <https://doi.org/10.3390/s23010327>.
- Mena-Almonte, R. A., Zulueta, E., Etxeberria-Agiriano, I., Fernandez-Gamiz, U. (2020). Efficient Robot Localization Through Deep Learning-Based Natural Fiducial Pattern Recognition. *Mathematics*, 13(3), 467. <https://doi.org/10.3390/math13030467>.
- Miao, L. (2025). A Frontier Review of Semantic SLAM Technologies Applied to the Open World. *Sensors*, 25(16), 4994. <https://doi.org/10.3390/s25164994>.
- Nguyen, T., Poo, K. (2023). Performance metrics MAE and RMSE in robotic sensor localization. *IEEE Access*, 11, 75999—76010. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3288472>.
- Ren, S., He, K., Girshick, R., & Sun, J. (2015). Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 28.
- Rusu, R. B., Blodow, N., & Beetz, M. (2009, May). Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 3212—3217). IEEE.
- Schneider, D. G., Stemmer, M. R. (2024). CNN-Based Multi-Object Detection and Segmentation in 3D LiDAR Data for Dynamic Industrial Environments. *Robotics*, 13(12), 174. <https://doi.org/10.3390/robotics13120174>.
- Smith, J., Brown, L., Garcia, M. (2020). Segmentation of objects via centroid clustering in robot vision. *IEEE Transactions on Robotics*, 36(4), 1012—1021. <https://doi.org/10.1109/TRO.2020.2970152>.
- Wang, Y., Chen, R. (2021). Multi-object tracking using Kalman and particle filters. *Journal of Field Robotics*, 38(7), 950—970. <https://doi.org/10.1002/rob.22190>.
- Zhang, W., Li, P. (2023). Geometric center and convex hull methods for object localization. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 102(1), 45—60. <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01614-y>.
- Zhao, Y., Sun, Z. (2024). Convex hull and centroid based object detection for drones. *Aerospace Systems Journal*, 38(3), 512—529. <https://doi.org/10.1007/s12567-023-00487-1>.

SYSTEM ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF VALVELESS PRESSURE-TYPE DISPENSERS

O. Zaporozhets, <https://orcid.org/0009-0007-5644-2819>

S. Volodin, <https://orcid.org/0009-0007-8528-7803>

O. Savchuk, <https://orcid.org/0009-0008-4971-078X>

L. Martynkevych, <https://orcid.org/0000-0003-2215-9912>

National University of Food Technologies

Key words:

*Valveless dispenser
Pressure dosing
Airlift principle
Dynamic characteristics
Gas-dynamic processes
Control mode optimization
Dosing accuracy
Transient processes*

Article history:

Received 13.11.2025

Received in revised form
28.11.2025

Accepted 17.12.2025

Corresponding author:

S. Volodin

E-mail:

volodinsergey1309@gmail.com

Citation: Запорожець О. В.,
Володін С. О., Савчук О. С.,
Марценкевич Л. В. (2025).
Системний аналіз та оптимізація динамічних характеристик безклапанних дозаторів напірного типу. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 175—188.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-14

ABSTRACT

A study was dedicated to the systematic analysis and optimization of the dynamic characteristics of valveless pressure-type dispensers that work based on the airlift principle of forming and displacing doses in food production filling and packaging equipment. The relevance of the topic was due to the growing demands for accuracy, stability, and speed of dosing in high-performance packaging lines, as well as the need to ensure reliable operation of dosing systems in the absence of valve elements in the product pipeline and the presence of pronounced nonlinear and non-stationary processes in pneumatic-gas-dynamic circuits. Traditional approaches to dosing control do not always ensure the proper level of dose repeatability and stability of transient processes, which justifies the use of a systematic approach to the analysis and optimization of such systems. The object of study in this work was the processes of pressure and product flow change in a pressure-type valveless dosing device with a receiver and pneumatic control. A generalized mathematical model of the dosing process was constructed in the form of a system of differential equations describing unstable gas-hydrodynamic processes, with an analysis of the influence of control parameters on the dynamic behavior of the system. Numerical modeling was performed in the MATLAB/Simulink medium. To verify the adequacy of the mathematical model, a series of simulation and experimental studies were conducted on a laboratory bench with proportional electro-pneumatic control in a 4—20 mA current loop. As a result, it was found that the determining factor of dynamic dosing accuracy was the nature of pressure changes in the dosing receiver, which directly affected the shape of the flow characteristic during the dosing cycle. According to the results of the experiments, the repeatability accuracy of the 50 ml dose displacement was ± 0.35 —0.8% when the initial product level in the feed tank changed by 10 mm, and the discrepancy between the model and experimental data did not exceed 7—10%, which confirms the adequacy of the developed model.

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗКЛАПАННИХ ДОЗАТОРІВ НАПІРНОГО ТИПУ

О. В. Запорожець, <https://orcid.org/0009-0007-5644-2819>

С. О. Володін, <https://orcid.org/0009-0007-8528-7803>

О. С. Савчук, <https://orcid.org/0009-0008-4971-078X>

Л. В. Марценкевич, <https://orcid.org/0000-0003-2215-9912>

Національний університет харчових технологій

Дослідження присвячено системному аналізу та оптимізації динамічних характеристик безклапанних дозаторів напірного типу, що функціонують на основі ерліфтного принципу формування та витіснення дози у складі фасувально-пакувального обладнання харчових виробництв. Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до точності, стабільності та швидкодії дозування в умовах високопродуктивних пакувальних ліній, а також необхідністю забезпечення надійної роботи дозувальних систем за відсутності клапанних елементів у продуктопроводі та наявності виражених нелінійних і нестационарних процесів у пневмогазодинамічних контурах. Традиційні підходи до керування дозуванням не завжди дозволяють забезпечити належний рівень повторюваності дози та стійкості перехідних процесів, що обґрунтовує доцільність застосування системного підходу до аналізу й оптимізації таких систем.

Об'єктом дослідження визначено процеси зміни тиску та витрати продукту в напірному безклапанному дозаторі з ресивером і пневматичним керуванням. Побудовано узагальнену математичну модель процесу дозування у вигляді системи диференціальних рівнянь, що описує неусталені газогідродинамічні процеси, з аналізом впливу керуючих параметрів на динамічну поведінку системи. Чисельне моделювання здійснено в середовищі MATLAB/Simulink. Для перевірки адекватності математичної моделі проведено комплекс імітаційних та експериментальних досліджень на лабораторному стенді з пропорційним електропневматичним керуванням у струмовій петлі 4—20 мА. У результаті встановлено, що визначальним чинником динамічної точності дозування є характер зміни тиску в дозувальному ресивері, який безпосередньо впливає на форму витратної характеристики під час циклу дозування. За результатами експериментів точність повторення витіснення дози об'ємом 50 мл становила $\pm 0,35$ —0,8% при зміні початкового рівня продукту в живильному резервуарі на 10 мм, а розбіжність між модельними та експериментальними даними не перевищувала 7—10%, що підтверджує адекватність розробленої моделі.

Ключові слова: безклапанний дозатор, напірне дозування, ерліфтний принцип, динамічні характеристики, газодинамічні процеси, оптимізація режимів керування, точність дозування, перехідні процеси.

Постановка проблеми. Сучасні фасувально-пакувальні лінії харчових виробництв функціонують в умовах зростаючих вимог до продуктивності, точності дозування та стабільності технологічних процесів. Особливу роль у таких системах

відіграють безклапанні дозатори напірного типу, які завдяки відсутності запірних елементів у продуктопроводі забезпечують високу гігієнічність, швидкодію та зниження механічного зносу. Водночас робота таких дозаторів супроводжується складними нелінійними та нестационарними процесами, зумовленими стисненням газового середовища, змінними гідравлічними опорами та перехідними режимами між фазами наповнення і витіснення дози. У реальних умовах експлуатації безклапанні напірні дозатори зазнають дії збурень, пов'язаних зі зміною фізико-механічних властивостей продукту, коливаннями тиску стисненого повітря, варіацією початкового рівня продукту в живильному резервуарі та динамікою роботи виконавчих елементів. Традиційні підходи до керування дозуванням, що ґрунтуються на статичних або спрощених моделях, не завжди дозволяють забезпечити необхідний рівень повторюваності дози та стійкості перехідних процесів. Це призводить до зростання похибок дозування, накопичення відхилень у циклічному режимі роботи та зниження загальної ефективності пакувального обладнання. Особливо критичним зазначений фактор є для високошвидкісних пакувальних машин, де навіть незначні пульсації витрати або нестабільність тиску в дозувальному ресивері можуть спричиняти систематичне зміщення об'єму дози, порушення технологічних регламентів і втрати сировини. Практичні експериментальні дослідження показують, що ігнорування динамічних характеристик безклапанних дозаторів призводить до суттєвих розбіжностей між заданими та фактичними параметрами дозування, особливо в перехідних режимах. У зв'язку з цим актуальним науково-прикладним завданням є розроблення та обґрунтування системного підходу до аналізу й оптимізації динамічних характеристик безклапанних дозаторів напірного типу, який дозволяє враховувати взаємодію пневматичних, гідродинамічних і керуючих підсистем. Такий підхід має забезпечувати кількісну оцінку впливу керуючих параметрів на динамічну поведінку системи, формування обґрунтованих критеріїв точності, стабільності та швидкодії, а також визначення раціональних режимів роботи дозувальних модулів. Розв'язання зазначеної проблеми сприятиме підвищенню ефективності, надійності й адаптивності безклапанних напірних дозувальних систем, що є необхідною умовою їх інтеграції у сучасні фасувально-пакувальні комплекси та відповідає вимогам індустріальних виробництв із високим рівнем автоматизації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасної наукової літератури свідчить, що дослідження динамічних характеристик насосних і дозувальних систем є ключовим напрямом розвитку автоматизованих технологічних процесів, які функціонують за умов високої частоти циклів, змінних режимів навантаження та жорстких вимог до точності й стабільності подачі робочого середовища (Ali, & Zhang, 2020). Особливої актуальності ця проблематика набуває в галузях, де відхилення витратних або тискових параметрів безпосередньо впливають на якість кінцевого продукту та надійність роботи технологічного обладнання.

Так, у дослідженнях (Zhang et al., 2007; Torniainen, 2012; Schneider, 2024), присвячених гідравлічним системам високого тиску, встановлено визначальну роль комплексного математичного моделювання динаміки клапанних компонентів і їх взаємодії з потоком рідини. Показано, що параметри пружних елементів, попередній натяг пружин і характеристики дроселювання істотно впливають на перехідні

процеси при зміні тиску та швидкості потоку, формуючи умови виникнення пульсацій і нестійких режимів роботи. Зазначені ефекти безпосередньо відображаються на ефективності та стабільності систем подачі рідини в промислових застосуваннях, що підтверджує необхідність урахування динамічних чинників на етапі проєктування й оптимізації таких систем (Qiu et al., 2022). У галузі безклапанних насосних систем значна увага приділяється аналізу альтернативних конструктивних рішень, які забезпечують транспортування та дозування рідини без використання механічних клапанів (Taylor et al., 2017). Зокрема, досліджуються клапани п'єзоелектричні насоси, що застосовуються для прецизійного дозування у мікрота мезомасштабних системах. У працях цього напрямку узагальнено еволюцію конструктивних конфігурацій, проаналізовано їх динамічні характеристики та встановлено вплив геометричних параметрів каналів і робочих камер на стабільність потоку, амплітуду пульсацій і вихідну продуктивність насосів (Yan et al., 2021). Отримані результати демонструють, що навіть незначні зміни геометрії можуть суттєво змінювати динамічну відповідь системи, що є критичним для високоточних дозувальних застосувань. Для мікропомп і мікродозуючих пристроїв, які також базуються на безклапанних принципах, важливим аспектом є вплив газових включень на перебіг динамічних процесів (Ghaemi, & Ebrahimi, 2025). Експериментальні та чисельні дослідження показують, що наявність газових бульбашок у робочому об'ємі насоса призводить до зміни ефективної стисливості середовища, спотворення витратних характеристик і появи додаткових коливань тиску. Чисельне моделювання таких процесів дозволяє оптимізувати конструкцію робочих камер і режимів керування з метою зменшення негативного впливу газових фаз на стабільність роботи дозувального пристрою (Jixiao et al., 2011). Разом із тим, широкий спектр досліджень, присвячених аналізу динамічної поведінки насосів і потоків у перистальтичних та інших безклапанних системах, підтверджує провідну роль математичного й чисельного моделювання у задачах оптимізації роботи обладнання при високих частотах збудження та значних варіаціях робочих умов (Kim, & Park, 2021). У працях акцентується увага на необхідності врахування нестационарних і нелінійних ефектів, що визначають форму перехідних процесів і стабільність режимів дозування (McIntyre et al., 2020). Узагальнення результатів сучасних досліджень дозволяє зробити висновок, що для реалізації ефективних безклапанних дозаторів напірного типу доцільно поєднувати системне математичне моделювання з урахуванням компресійних і нестационарних ефектів у потоці, а також чисельну оптимізацію структурних і керуючих параметрів (Pun et al., 2018). Такий підхід забезпечує підвищення стабільності динамічної реакції системи під навантаженням, зменшення пульсацій витрати та створює передумови для впровадження адаптивних алгоритмів керування в умовах реального промислового виробництва. Особливо перспективним є впровадження зазначених підходів у безклапанних дозувальних модулях напірного типу, що функціонують у складі сучасних фасувально-пакувальних ліній, де необхідно забезпечити стабільність динамічних режимів дозування за умов високої продуктивності, обмеженого часу циклу та варіативності технологічних параметрів продукту (Mena-Almonte et al., 2020). Реалізація інтегрованих методів системного аналізу й оптимізації динаміч-

них характеристик становить актуальне науково-практичне завдання для створення адаптивних програмно-апаратних рішень, орієнтованих на підвищення точності, повторюваності та надійності роботи безклапанних напірних дозаторів у реальних умовах промислової експлуатації.

Метою дослідження є обґрунтування й оцінювання методів системного аналізу й оптимізації динамічних характеристик безклапанних дозаторів напірного типу шляхом математичного та імітаційного моделювання гідрогазодинамічних процесів з урахуванням нестаціонарності, компресійних ефектів і змінних режимів роботи, з метою підвищення точності, стабільності й повторюваності дозування в умовах високопродуктивних фасувально-пакувальних систем.

Матеріали і методи. Об'єктом дослідження є безклапанний дозатор напірного типу, призначений для формування та витіснення дози рідких і слабков'язких продуктів у складі фасувально-пакувального обладнання харчових виробництв, що функціонує на основі ерліфтного принципу та пневматичного керування. Предметом дослідження є процеси зміни тиску та витрати продукту в безклапанному напірному дозаторі під час циклу дозування, з урахуванням нестаціонарних пневмогазодинамічних процесів, стисливості газової подушки ресивера, змінних гідравлічних опорів і перехідних режимів між фазами наповнення та витіснення дози. Для встановлення функціональної залежності між параметрами пневматичного керування та динамічними характеристиками дозування використано комплекс математичних і чисельних методів моделювання. Побудовано узагальнену математичну модель процесу дозування у вигляді системи диференціальних рівнянь, що описує динаміку тиску в ресивері та витратні характеристики дозатора. Основними змінними моделі є тиск стисненого повітря, витрата продукту, об'єм газової подушки та параметри гідравлічного опору продуктопроводу. Основними припущеннями під час моделювання є одновимірний характер течії продукту, квазістаціонарний режим у межах окремих фаз циклу дозування, ізотермічність процесу стискання газу та нормальний закон розподілу збурень тиску, зумовлених роботою пневматичних елементів. Для досягнення сформульованої мети дослідження передбачено розв'язання таких завдань:

- побудова та програмна реалізація математичної моделі динаміки безклапанного напірного дозатора з урахуванням компресійних і нестаціонарних ефектів;
- імітаційне дослідження впливу законів керування тиском на форму витратної характеристики та стабільність перехідних процесів;
- визначення кількісних показників динамічної точності дозування та повторюваності дози за результатами моделювання імітаційного експерименту.

Викладення основних результатів дослідження. Для дослідження та оптимізації динамічних характеристик безклапанних дозаторів напірного типу реалізовано ієрархічну структуру аналізу процесу формування та витіснення дози, орієнтовану на пневмогазодинамічні процеси в ерліфтній системі дозування. Система дозування, що розглядається, функціонує без застосування клапанних елементів у продуктопроводі та базується на керованій зміні тиску в дозувальному ресивері, що забезпечує витіснення продукту в заданому режимі (рис. 1).

Принцип роботи безклапанного напірного мехатронного модуля дозування, наведеного на рис. 1, ґрунтується на керованому ерліфтному формуванні та витісненні дози рідкого продукту без застосування клапанних елементів у продуктопроводі.

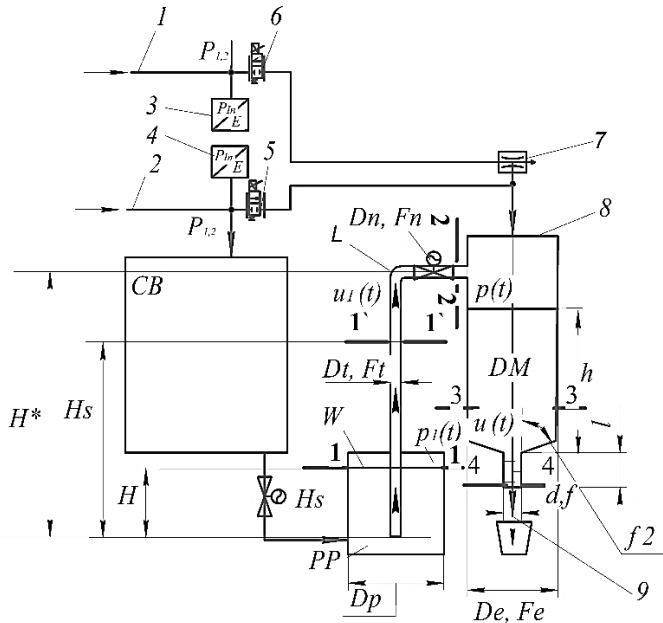


Рис. 1. Структурно-функціональна схема безклапанного напірного мехатронного модуля дозування рідких продуктів ерліфтного типу з електропневматичним керуванням: 1 — лінія підведення стисненого повітря до пневматичної системи керування; 2 — лінія підведення стисненого повітря до резервуара-живильника (PP); 3 — пропорційний регулятор тиску з аналоговим керуванням сигналом 4—20 мА, призначений для формування та стабілізації тиску в резервуарі-живильнику; 4 — пропорційний регулятор тиску, що забезпечує керування режимами наповнення та витіснення дозувального ресивера; 5 — електропневматичний розподільник, який реалізує подачу та скидання тиску в процесі дозування відповідно до заданого алгоритму керування; 6 — виконавчі електромагнітні клапани типу 2/2 нормально закриті, задіяні у реалізації ерліфтного процесу формування дози; 7 — клапан продувки та з'єднання з атмосферою, що використовується для очищення продуктопроводу та завершення циклу дозування; 8 — дозувальний ресивер (DM) змінного об'єму, у якому відбувається формування дози рідкого продукту; 9 — зливний патрубок або вихідна насадка, через яку здійснюється контрольоване витіснення дозованого продукту в тару

Стиснене повітря по лінії 1 надходить до пневматичної системи керування, а по лінії 2 — до резервуара-живильника PP, де за допомогою пропорційного регулятора тиску 3 (з аналоговим керуванням 4—20 мА) формується тиск $p_1(t)$, що визначає умови підведення продукту з ємності CB. Продукт із бака-живильника CB під дією гідростатичного напору, зумовленого рівнями H , H_s та H^* , через продуктопровід діаметра D_p і з'єднувальний трубопровід довжиною L та діаметра D_t (площа F_t) надходить у дозувальний ресивер DM ерліфтного типу. Наповнення

ресивера та формування газової подушки здійснюється за рахунок керованої подачі стисненого повітря через пропорційний регулятор тиску 4, при цьому в газовій порожнині ресивера встановлюється часовий закон зміни тиску $p(t)$, який визначає динаміку підйому продукту через вхідний патрубок діаметра D_n (площа F_n) у зоні формування потоку W . Електропневматичний розподільник 5 разом із виконавчими електромагнітними клапанами 6 типу 2/2 НЗ реалізує алгоритм подачі та скидання тиску, забезпечуючи послідовність фаз наповнення, стабілізації та витіснення дози. У фазі витіснення надлишковий тиск $p(t)$ у ресивері DM спричиняє контрольований витік продукту зі швидкістю $u(t)$ через зливний патрубок 9 з вихідною насадкою діаметра D_e (площа F_e), геометричні параметри якої d, f визначають витратну характеристику та стабільність формування дози; при цьому поточний рівень продукту в ресивері h змінюється відповідно до закону керування. Після завершення витіснення дози клапан продувки 7 забезпечує скидання тиску та з'єднання системи з атмосферою, що дозволяє виконати очищення продуктопроводу й підготувати модуль до наступного циклу дозування.

Узгоджена взаємодія пневматичних і гідравлічних елементів, а також можливість програмного задання законів керування швидкостями $u(t)$ та $u_1(t)$, забезпечують високу точність, повторюваність і стабільність роботи безклапанного напірного дозувального модуля в умовах високопродуктивних фасувально-пакувальних систем.

Функціональна структура досліджуваної системи (рис. 1) включає модуль формування тиску, дозувальний ресивер, вертикальний канал продуктопроводу, пропорційний електропневматичний елемент керування та блок зворотного зв'язку за тиском. Така архітектура дозволяє виконувати системний аналіз динамічної поведінки дозатора в умовах нестаціонарних режимів роботи та варіативних параметрів процесу дозування.

Математичне моделювання динаміки безклапанного напірного дозатора здійснювалося шляхом формалізації повного циклу дозування, який включає етапи стабілізації тиску в ресивері, активного витіснення дози та демпфування перехідних процесів.

Для оцінки впливу різних факторів на точність дозування прийняті такі допущення: порівняння різних реалізацій процесу дозування під час роботи $ДУ$ із постійною величиною тиску запрограмованою для дозатора p_r було досліджено за умовами відтворюваності окремих стадій процесу. Стадії процесу було досліджено у послідовності, описаного вище алгоритму роботи $ДУ$, із попередньо описаною системою рівнянь процесу дозування.

Стадія заповнення з'єднувального трубопроводу математично описується системою двох рівнянь, у якій динамічними змінними є $s(t)$ — поточне положення рівня рідини в трубопроводі та $H(t)$ — поточний рівень рідини в резервуарі PP .

Рівняння руху вільної поверхні рідини в з'єднувальному трубопроводі отримано на основі рівняння Бернуллі для неусталеного режиму течії та складено між перерізами 1—1, що відповідає положенню рівня рідини в резервуарі PP , і 1'—1', який відповідає рівень рідини в трубопроводі, розташованому на відстані s від його вхідної кромки:

$$s(d^2s/dt^2) + \frac{\lambda_T}{2D}s(ds/dt)^2 + \frac{1+\xi_T}{2}(ds/dt)^2 + gH_s(s) = \frac{p_1(t)}{\rho} + gH(t). \quad (1)$$

Прийняті такі позначення: D_T — діаметр з'єднувального трубопроводу; $H_s(s)$ — висота перерізу $I'I'$ як функція параметра s , яка залежить від конфігурації з'єднувального продуктопроводу:

$$p_1(t) \cong p_{1,3}(t) = P(1 - e^{-t/\tau_0}), \quad (2)$$

де $p_1(t)$ — фактичний тиск в PP як функція часу t за умови ідеальності програмованого регулятора тиску PD ; $p_{1,3}(t)$ — задане значення параметра регулювання; $P=const$ — тиск живлення пневмоелементів $УУ$; τ_0 — постійна часу $ПЗ$, залежить від умов оточуючого середовища; ρ — густина продукту; $g=const$ — прискорення сили тяжіння; $\xi_T=const$ — коефіцієнт місцевого опору на вході у продуктопровід, який залежить від конфігурації вхідної кромки трубопроводу; λ_T — коефіцієнт тертя у трубопроводі, залежить від числа Рейнольдса $Re_T = \rho D_T(ds/dt)/\mu$, розраховується за рівнянням Блазіуса:

$$\lambda_T = \frac{0,316}{(Re_T)^{1/4}} = \frac{0,316}{(\rho D_T(ds/dt)/\mu)^{1/4}}, \quad (3)$$

де μ — динамічна в'язкість продукту, залежить від температури.

Під час складання рівняння (1) прийнято ряд припущень: коефіцієнти $\alpha_1=1$; $\alpha_1'=1$ враховують нерівномірність розподілення швидкостей у перерізах $1-1$; $1'-1'$, приймаємо рівними 1. Із рівняння (1) нехтуємо (незначні значення) коефіцієнтом швидкісного напору продуктам в PP та приймаємо площу перерізів:

- PP і з'єднувального продуктопроводу: $\Omega = \pi D_p^2/4$;

- площа перерізів PP та з'єднувального трубопроводу: $F_T = \pi D_T^2/4$.

Рівняння балансу витрат рідини з PP :

$$-\Omega(dH/dt) = F_T(ds/dt). \quad (4)$$

Система рівнянь (1) і (4) вирішується за початковими умовами: $s(0)=s_0=H_0$, $(ds/dt)(0)=(ds/dt)_0=0$; $H(0)=H_0$. Результатом вирішення даної системи є значення функції $s(t)$ за умови визначення часу τ_T заповнення продуктом з'єднувального патрубка та початкова швидкість $u_{1,0}$ підведення продукту в $ДЕ$. За умови відомого значення $s(t)$ параметри τ_T , $u_{1,0}$ визначаються як:

$$\begin{aligned} s(\tau_T) &= L; \\ u_{1,0} &= (ds/dt)|_{t=\tau_T}, \end{aligned} \quad (5)$$

де L — довжина трубопроводу.

Етап заповнення зливного патрубка $ДЕ$ визначає початкові умови для наступних стадій процесу дозування, зокрема для фази витікання продукту у вихідному перерізі. З огляду на малі геометричні розміри насадки, насамперед її довжину l , а також емпірично встановлене оптимальне співвідношення діаметрів вхідного патрубка, вплив цього етапу суттєво проявляється у формуванні гідродинамічних умов подальшого витікання рідини. D_n для $ДЕ$ та насадки (d) — $Dn/d \geq 1,7$ приймаємо умову перевищення притоку продукту в $ДЕ$ у кожний момент часу над витратами крізь переріз насадки з такими умовами:

$$\begin{aligned} u_1(0) &= u_{1,0}; \quad H(0) = H_0^* = H_0 - F_T L; \\ p(0) &= p_0 \cong 0; \quad v(0) = v_0 \cong 0; \quad u(0) = u_0 = \sqrt{2gl}; \end{aligned}$$

$$p_1(0) = p_{1,0} = P(1 - e^{-\tau/\tau_0}), \quad (6)$$

де $u_1(t)$ — швидкість руху в продуктопроводі, $H(t)$ — плинне значення рівня продукту в PP ; $p(t)$ — тиск у газовому просторі DE під час наповнення; $h(t)$ — рівень продукту в DE ; $v(t)$ — об'єм наповненої частини DE без об'єму зливної насадки; $u(t)$ — швидкість витікання продукту крізь насадку.

Для стадії витікання продукту через вихідний переріз насадки сформовано аналітичний опис з урахуванням раніше визначених початкових умов. Рух продукту в з'єднувальному трубопроводі описано рівнянням Бернуллі для неусталеного режиму течії, складеним між перерізами 1—1 та 2—2, з урахуванням умови рівності діаметрів продуктопроводу та вхідного патрубка DE , відповідно $D_T = D_P = D$, $F_T = F_P = F$ матиме вигляд:

$$\frac{p_1(t)}{\rho g} + H = \frac{p(t)}{\rho g} + H^* + \left(1 + \xi_T + \lambda_T \frac{L}{D}\right) \frac{u_1^2}{2g} + \frac{L}{g} \frac{du_1}{dt}, \quad (7)$$

$$p_1(t) \cong p_{1,3}(t) = P(1 - e^{-(t+\tau_T)/\tau_0}), \quad (8)$$

де тиск в PP є функцією по часу t за умовою ідеальності програмного регуляторів тиску PD ; λ_T — коефіцієнт тертя в трубопроводі, який залежить від числа Рейнольдса $Re_T = \rho D u_1 / \mu$, який розраховується за формулою Блазіуса:

$$\lambda_T = 0,316 / (Re_T)^{1/4} = 0,316 / (\rho D u_1 / \mu)^{1/4}. \quad (9)$$

Аналогічно до рівняння (1) у рівнянні (7) коефіцієнти α_{1-1} та α_{2-2} , враховують нерівномірність розподілення швидкості у перерізах 1—1 і 2—2. Зазначені коефіцієнти прийняті постійними і дорівнюють 1. Також, знехтуємо складовою рівною $\alpha_{1-1}(F/\Omega)^2(u_1)^2/2$, що враховує швидкість напору в PP .

Для перерізів 3—3 та 4—4 рівняння перетікання продукту теж побудоване на рівнянні Бернуллі:

$$\frac{p(t)}{\rho g} + l + h + \frac{\left(\frac{dh}{dt}\right)^2}{2g} = \left(1 + \xi_n + \lambda_n \frac{l}{d}\right) \frac{u^2}{2g} + \frac{l}{g} \frac{du}{dt}, \quad (10)$$

де ξ_n — коефіцієнт опору вхідного отвору насадки; λ_n — коефіцієнт тертя всередині насадки; α_{3-3} та α_{4-4} — коефіцієнти розподілення швидкості в перерізах, дорівнюють 1.

Тоді рівняння балансу витрат у DE :

$$\frac{dv}{dt} = u_1 F - u \cdot f, \quad (11)$$

де $v = v(t)$ — плинний об'єм рідини в DE .

Під час опису етапів наповнення окремих елементів DE сформовані початкові умови проходження основних стадій процесу витиснення та формування дози продукту. Побудована модель враховує стисливість газової подушки, інерційні властивості потоку продукту, зміну гідравлічних опорів у вертикальному каналі та вплив керуючих сигналів у струмовій петлі 4—20 мА. Реалізацію моделі виконано в середовищі MATLAB/Simulink із застосуванням бібліотек Simscape Pneumatics, що забезпечило адекватне відтворення реальних умов експлуатації дозувального модуля (рис. 2). Для оцінювання динамічних характеристик системи проведено серію імітаційних експериментів з варіацією законів керування тиском у ресивері. Досліджено раціональні режими зміни керуючого сигналу. Встановлено, що характер зміни тиску безпосередньо визначає форму витратної характеристики та вели-

чину динамічної похибки дозування. Зокрема, синусоїдальний закон керування зміни тиску забезпечує мінімальні пульсації витрати та зниження амплітуди перехідних коливань у порівнянні зі сходиновим режимом. Імітаційна модель формалізує структурно-функціональну організацію електропневматичної системи керування процесами наповнення та витіснення дози в безклапанному напірному дозаторі ерліфтного типу, який розглядається як об'єкт системного аналізу в межах цього дослідження. Модель реалізовано в середовищі MATLAB/Simulink із застосуванням фізично орієнтованих компонентів, що забезпечує коректне відтворення взаємодії пневматичної, гідравлічної та керуючої підсистем у перехідних і квазі-стаціонарних режимах. У моделі детально представлено підсистему формування керованого надлишкового тиску та розрідження (джерело стисненого повітря, ежектор), підсистему пропорційного електропневматичного регулювання тиску в дозувальному ресивері, а також логіко-алгоритмічні блоки генерації керуючих сигналів відповідно до заданих законів керування.

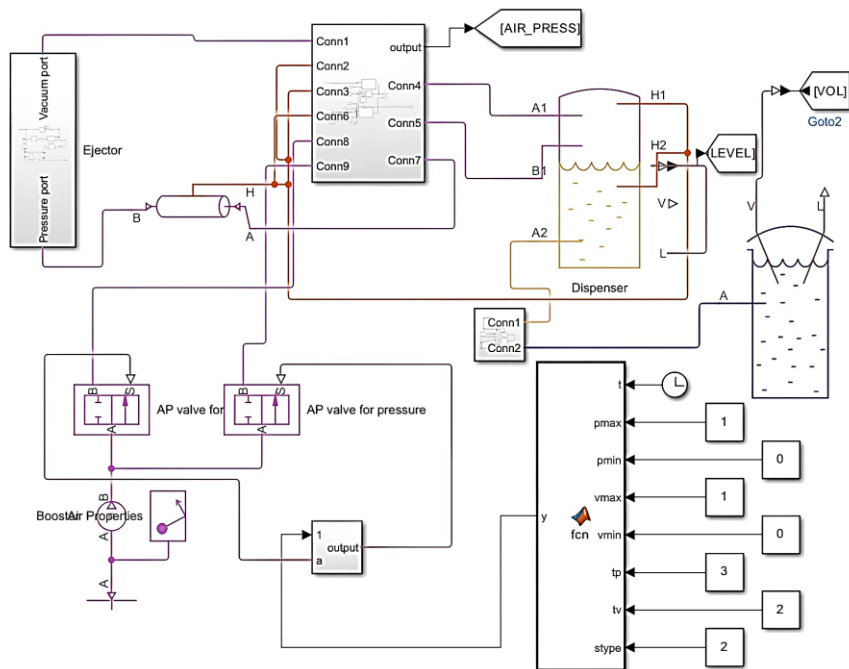


Рис. 2. Імітаційна модель електропневматичної системи керування процесом наповнення та витіснення дози в безклапанному напірному дозаторі ерліфтного типу (MATLAB/Simulink)

Функціональний блок «Dispenser» (рис. 2) реалізує математичний опис динаміки дозувального ресивера з урахуванням стисливості газової фази, зміни рівня рідини, витрати та тиску в часі, що дозволяє аналізувати фазові переходи між наповненням і витісненням дози. Вихідні змінні моделі забезпечують кількісну оцінку тиску в газовій порожнині, миттєвої витрати рідини та накопиченого об'єму

доз, які використовуються як критерії динамічної точності та стабільності процесу дозування.

Параметризація моделі (межі тиску, тривалість фаз, швидкість наповнення) створює умови для дослідження чутливості системи до змін режимів керування та оптимізації її динамічних характеристик. У підсумку, імітаційна модель слугує інструментом верифікації адекватності математичного опису, оцінювання впливу законів керування на стабільність і повторюваність дози та обґрунтування раціональних режимів роботи мехатронного модуля в складі високопродуктивних пакувальних машин. На рис. 3 наведено результати імітаційного дослідження динамічних характеристик безклапанного напірного дозатора ерліфтного типу за різних законів керування тиском у газовій порожнині дозувального ресивера. Для кожного режиму керування (а — синусоїдальний, б — прямокутний (ступінчастий), в — трикутний) подано часові залежності керуючого сигналу, тиску повітря в дозувальному ресивері, миттєвої витрати рідини на виході дозатора та накопиченого об'єму рідини в тарі.

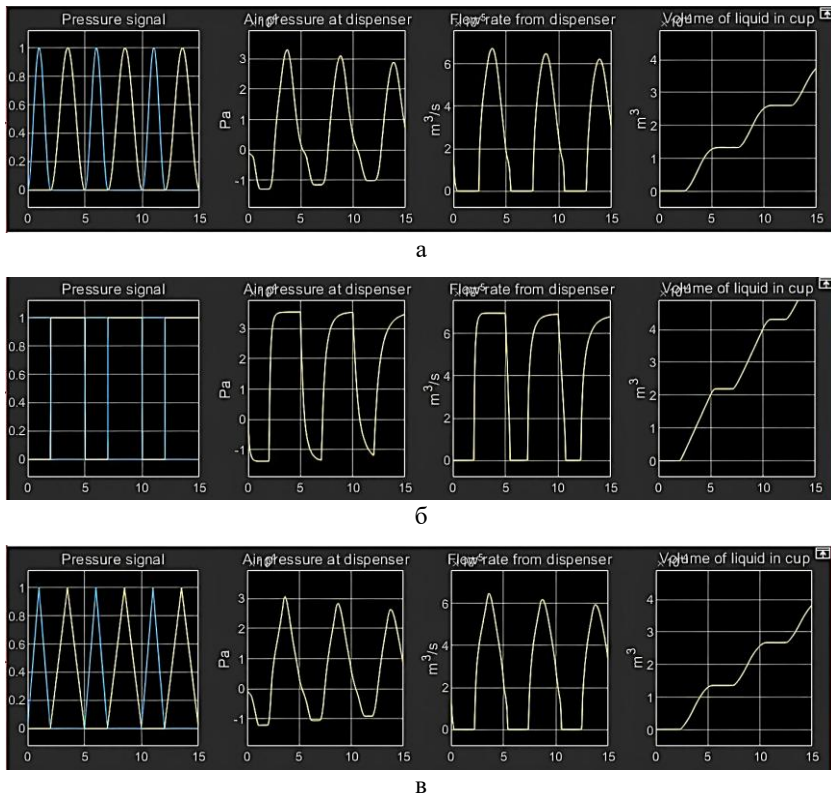


Рис. 3. Порівняльний аналіз динамічних характеристик безклапанного напірного дозатора ерліфтного типу при різних законах керування тиском: а — синусоїдальний закон керування; б — прямокутний (ступінчастий) закон керування; в — трикутний закон керування (лінійна зміна тиску)

Наведені на рис. 3 часові залежності сигналу керування, тиску повітря в дозувально-фасувальному модулі, миттєвої витрати рідкого продукту на вихідному патрубку та накопиченого об'єму дози у споживчій тарі отримані в результаті імітаційного моделювання безклапанного напірного дозатора ерліфтного типу в середовищі MATLAB/Simulink і відображають системний вплив форми закону керування тиском на динамічну поведінку модуля. У процесі досліджень проаналізовано зміну вхідного керувального тиску в діапазоні 3—6 бар, тиску всередині дозувального ресивера на рівні 1—3 бар, миттєву витрату продукту під час фасування в межах до $0,3 \cdot 10^{-3}$ м³/с та точність формування дози в інтервалі 50—200 мл. За синусоїдального та напівсинусоїдального законів керування спостерігається плавний характер зміни тиску в ресивері без різко виражених піків, що зумовлює квазисинусоїдальну форму витрати та рівномірне, майже лінійне наростання накопиченого об'єму дози; при цьому пульсації витрати мінімізуються, а стабільність процесу дозування зберігається протягом усього циклу, що забезпечує точність дозування на рівні близько 0,92% і високу повторюваність результатів. Ступінчастий (прямокутний) закон керування призводить до стрибкоподібної зміни тиску в дозувальному модулі, внаслідок чого на початку фази витіснення виникають значні імпульси витрати, що дозволяє скоротити тривалість циклу та підвищити продуктивність, однак супроводжується зростанням динамічних навантажень у гідропневматичному контурі та збільшенням амплітуди пульсацій витрати. Трикутний закон керування формує лінійну зміну тиску, завдяки чому динаміка витрати є більш згладженою порівняно зі ступінчастим режимом, а об'єм дози зростає монотонно з помірними коливаннями, що дозволяє досягти компромісу між швидкістю та динамічною стабільністю. Проведені випробування комп'ютерної моделі гібридного мехатронного дозувально-фасувального модуля показали, що точність повторюваності формування дози становить $\pm 0,22$ — $0,9\%$ від заданої маси в усьому досліджуваному діапазоні 50—200 мл, а стабільні значення тиску і швидкості руху продукту найкраще підтримуються при синусоїдальній напівхвилі та пилоподібному сигналі керування. Отримані результати підтверджують, що вибір форми закону керування тиском є дієвим інструментом оптимізації динамічних характеристик безклапанного напірного дозатора і дозволяє цілеспрямовано узгоджувати вимоги до точності, стабільності та продуктивності фасувально-пакувального обладнання промислового призначення.

Висновки

1. У результаті проведеного системного аналізу встановлено, що динамічні характеристики безклапанного напірного дозатора ерліфтного типу визначаються сукупною дією параметрів пневматичного керування та гідродинамічних властивостей системи, зокрема законом зміни тиску в газовій порожнині дозувального ресивера, стисливістю газової подушки, інерційністю потоку продукту та перехідними режимами між фазами наповнення і витіснення дози. Показано, що саме характер керування тиском є домінуючим фактором формування стабільності та динамічної точності дозування.

2. Розроблена узагальнена математична та реалізована на її основі імітаційна модель електропневматичної системи керування в середовищі MATLAB/Simulink адекватно відтворює нестационарні процеси дозування з урахуванням стисливості

повітря, змін гідравлічних опорів і програмно заданих законів керування. Імітаційні дослідження, виконані в діапазонах робочого тиску 3—6 бар, тиску в дозувальному ресивері 1—3 бар, витрати до $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ і об'ємів дозування 50—200 мл, підтвердили можливість кількісної оцінки динамічної поведінки дозатора в перехідних і квазістаціонарних режимах.

3. Встановлено, що оптимізація динамічних характеристик безклапанного напірного дозатора може бути ефективно реалізована шляхом раціонального вибору закону керування тиском без конструктивних змін дозувального модуля. Синусоїдальні та напівсинусоїдальні закони керування забезпечують мінімальні пульсації, витрати та найвищу точність і повторюваність дозування (відхилення не більше 0,92%, повторюваність $\pm 0,22$ —0,9%), тоді як ступінчасті режими доцільні для підвищення швидкодії. Отримані результати створюють науково обґрунтовану основу для адаптації режимів роботи безклапанних напірних дозаторів до вимог сучасних фасувально-пакувальних машин із високим рівнем автоматизації.

Література

- Ali, S., Zhang, H. (2020). Optimization of dosing dynamics under variable operating conditions. *Journal of Process Control*, 89, 45—56.
- Amselem, G., Clanet, C., Benzaquen, M. (2022). Valveless pumping at low Reynolds numbers. *arXiv preprint*, arXiv:2205.05463.
- Chen, L. et al. (2023). YOLO-based detection for high-speed industrial systems. *International Journal of Computer Vision*, 131(4), 1023—1041.
- Duan, L., Shao, F. (2024). System analysis of dynamic flow characteristics in fluid transfer systems. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 17(2), 89—102.
- Gavva, O., Kryvoplias-Volodina, L., Dolomakin, Yu., Kulyk, N., Kokhan, A. (2024). Simulation of hydrodynamic phenomena in valve feeders of adaptronic modules for dosing liquid products. *Ukrainian Food Journal*, 13(3), 427—448. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2024-13-3-3>.
- Gavva, O. O., Kryvoplias-Volodina, L. O., Dolomakin, Yu. Yu., Martsynkevych, L. V., Kokhan, A. A. (2024). Substantiation of parameters of a valve-type feeder for adaptronic dosing modules of liquid products. *Scientific Works of NUFT*, 30(4), 76—87. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2024-30-4-7>.
- Gavva, O. et al. (2025). Hydrodynamic simulation in dosing systems for improving calibration of robotic dosing modules. *University research publication*. <https://dspace.nuft.edu.ua>.
- Gerasimenko, T. N., Kindeeva, O. V., Petrov, V. A. et al. (2016). Modelling and characterization of a pneumatically actuated peristaltic micropump. *arXiv preprint*, arXiv:1701.02365.
- Ghaemi, A., Ebrahimi, A., Hajipour, M. (2025). Integrated multiphysics modeling of a piezoelectric micropump. *arXiv preprint*, arXiv:2502.06413.
- Hajgató, G., Paál, G., Gyires-Tóth, B. (2020). Deep reinforcement learning for real-time optimization of pumps in water distribution systems. *arXiv preprint*, arXiv:2010.06460.
- He, L. et al. (2021). Research on output performance of a valve-less piezoelectric pump with double cone-shaped tubes. *Microsystem Technologies*, 27(8), 3051—3062.
- Izzo, I. et al. (2007). Modeling and experimental validation of a piezoelectric micropump. *Sensors and Actuators A: Physical*, 134(1), 152—161.
- Jixiao, W., Li, H., Zhang, Y. (2011). Numerical and experimental investigation of gas bubble effects in valveless micropumps. *Sensors and Actuators A: Physical*, 168(2), 257—264.
- Kim, D., Park, J. (2021). Feature extraction in dynamic dosing environments using computer vision techniques. *Computer Vision and Image Understanding*, 208, 103212.
- Lopez Romero, J. (2015). Hybrid noise filtering methods for robotic data processing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(7), 4583—4592.

- McIntyre, J. et al. (2020). Numerical modeling of valve-less dosing systems at high frequencies. *Journal of Fluids Engineering*, 142(9), 091201.
- Mena-Almonte, L. et al. (2020). Statistical metrics for control system performance evaluation. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 215–226.
- Nguyen, T., Huang, H. (2019). Micro-scale valveless pump design and performance analysis. *Sensors and Actuators A: Physical*, 295, 184–193.
- Olsson, A., Stemme, G., Stemme, E. (1998). *Valveless diffuser micropumps*. PhD Thesis. Royal Institute of Technology (KTH), Sweden.
- Pun, S. H. et al. (2018). IMEMS valveless pump performance analysis. *Microsystems Technology*, 24(6), 2871–2880.
- Qiu, N., Shang, X., Liu, R., Jin, P., Gao, W. (2022). Analysis of the dynamic characteristics of the pump valve system of an ultra-high-pressure liquid hydrogen reciprocating pump. *Energies*, 15(12), 4255. <https://doi.org/10.3390/en15124255>.
- Ren, Y. et al. (2016). Clustering and segmentation methods for flow control signals. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(4), 1654–1665.
- Rusu, R. B. et al. (2011). Point cloud analysis for dynamic system modeling. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1(1), 80–87.
- Schneider, K., Stemmer, A. (2024). SLAM system performance evaluation metrics. *Journal of Field Robotics*, 41(2), 234–249.
- Singh, A. et al. (2020). Low-cost polymer-based valveless micropumps. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 30(5), 055006.
- Taylor, R. et al. (2017). Effects of geometry on valveless fluid pumps. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 27(3), 035012.
- Torniainen, E. D., Govyadinov, A. N., Markel, D. P., Kornilovitch, P. E. (2012). Bubble-driven inertial micropump. *arXiv preprint*, arXiv:1202.4949.
- Yan, Q., Zhang, X., Wang, Y. et al. (2021). Advances in valveless piezoelectric pumps: structures and applications. *Applied Sciences*, 11(15), 7061. <https://doi.org/10.3390/app11157061>.
- Yan, Y. et al. (2020). Optimization of valve-less pumps with external flow tubes. *Applied Sciences*, 10(18), 6421.
- Zhang, J. et al. (2007). Research on the valveless piezoelectric pump with Y-shape elements. *Acta Mechanica Sinica*, 23(3), 289–296.

УДК 664.664.6

INFLUENCE OF METHODS OF ADDING ARTICHOKE POWDER INTO DOUGH WITH FRUCTOSE FOR BAKERY PRODUCTS ON THEIR QUALITY INDICATORS

A. Shevchenko, <https://orcid.org/0000-0002-6215-4860>

National University of Food Technologies

A. Zahorulko, <https://orcid.org/0000-0001-7768-6571>

State Biotechnological University

Key words:

Bakery product
Jerusalem artichoke
powder
Dough
Casein
Sponge method
Straight method
Dispersed phase

Article history:

Received 03.03.2025

Received in revised form
 19.03.2025

Accepted 13.04.2025

Corresponding author:

A. Shevchenko

E-mail:

nastyusha8@ukr.net

Citation: Шевченко А. О., Загорулько А. М. (2025). Вплив способів внесення порошку топінамбура в тісто з фруктозою для хлібобулочних виробів на показники їхньої якості. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 189—200.
 DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-15

ABSTRACT

Nowadays, one of the most common non-communicable diseases in the world is diabetes. Nutrition, namely diet therapy, is important in such case. Inulin-containing raw materials, in particular Jerusalem artichoke, are a good dietary product, easily decomposed into fructose, the absorption of which depends less on the pancreatic hormone insulin than the absorption of glucose. Adding micellar casein to the recipe of bakery products with a reduced lactose content makes it possible not only to increase the protein content, but also to increase the biological value of bread. However, such raw materials have properties different from wheat flour, therefore they will affect the quality of bakery products.

For the research, premium wheat flour was used, casein — 10.8%% by weight of flour and Jerusalem artichoke powder — 5.3% by weight of flour, which provides 30% of the daily requirement for protein and dietary fiber, respectively. A rational method of introducing additives into the dough was found: casein in the form of a suspension with a hydromodule of 5 with further adding Jerusalem artichoke powder to the suspension.

In case of the sponge method of preparing bread with the introduction of a suspension into the dough, the specific volume of the bread was 1.8% higher compared to the addition of additives to the dough using the same method, by 2.9% compared to the straight method and by 2.6% compared to the method using a dispersed phase, better porosity and crumb condition were observed. When comparing the straight method and the method of preparing dough using a dispersed phase, the quality indicators of the products were practically the same, while the duration of the technological process was shorter than in case of the straight method. For all the studied methods, the quality of the finished products was satisfactory. Given the results obtained, it is advisable to use the straight method of preparing bakery products.

The optimal value of the specific volume was found at the amount of Jerusalem artichoke powder — 4.0%, the amount of casein — 9.0% and the duration of dough fermentation — 150 min.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-15

ВПЛИВ СПОСОБІВ ВНЕСЕННЯ ПОРОШКУ ТОПІНАМБУРА В ТІСТО З ФРУКТОЗОЮ ДЛЯ ХЛІБОБУЛОЧНИХ ВИРОБІВ НА ПОКАЗНИКИ ЇХНЬОЇ ЯКОСТІ

А. О. Шевченко, <https://orcid.org/0000-0002-6215-4860>

Національний університет харчових технологій

А. М. Загорулько, <https://orcid.org/0000-0001-7768-6571>

Державний біотехнологічний університет

У наш час однією з поширених неінфекційних хвороб у світі є захворювання на цукровий діабет. Важливим при цьому є харчування, а саме дієтотерапія. Інulin-вмісна сировина, зокрема топінамбур, є хорошим дієтичним продуктом, легко розпадається до фруктози, засвоєння якої меншою мірою залежить від гормону підшлункової залози інсуліну, ніж засвоєння глюкози. Додавання міцелярного казеїну до рецептури хлібобулочних виробів зі зниженим вмістом лактози надає можливість не тільки збільшити вміст білка, але й підвищити біологічну цінність хліба. Однак така сировина має відмінні від пшеничного борошна властивості, тому впливатиме на якість хлібобулочних виробів.

Для досліджень використовували борошно пшеничне вищого сорту, казеїн — 10,8% до маси борошна та порошок топінамбура — 5,3% до маси борошна, що забезпечує 30% добової потреби у білку та харчових волокнах, відповідно. Встановлено раціональний спосіб внесення добавок в тісто: казеїну у вигляді суспензії з гідромодулем 5 та додаванням у суспензію порошку топінамбура.

За опарного способу приготування хліба з внесенням суспензії в тісто питомих об'єм хліба був більшим на 1,8% порівняно з внесенням добавок в опару за цього ж способу, на 2,9% порівняно з безопарним способом та на 2,6% порівняно зі способом на диспергованій фазі, спостерігалась краща пористість і стан м'якушки. При порівнянні безопарного способу та способу приготування тіста на диспергованій фазі показники якості виробів практично однакові, при цьому тривалість технологічного процесу менша, ніж за опарного. За всіх досліджених способів якість готових виробів задовільна. Зважаючи на отримані результати, доцільно застосовувати безопарний спосіб приготування виробів.

Оптимальне значення питомого об'єму встановлено при кількості порошку топінамбура — 4,0%, кількості казеїну — 9,0% та тривалості бродіння тіста — 150 хв.

Ключові слова: хлібобулочний виріб, порошок топінамбура, тісто, казеїн, опарний спосіб, безопарний спосіб, диспергована фаза.

Постановка проблеми. У наш час однією з поширених неінфекційних хвороб у світі є захворювання на цукровий діабет [1, 2]. Важливим при цьому є харчування, а саме дієтотерапія. Вуглеводи — основне джерело енергії для клітини. Нестача вуглеводів в організмі при цукровому діабеті призводить до голодування клітин і порушення обмінних процесів [7, 8]. У харчуванні хворих на цукровий діабет повинні переважати вироби з низьким глікемічним індексом. Існують про-

дукти, зокрема хлібобулочні вироби, з цукрозамінниками, однак важливо, щоб поряд із зниженим глікемічним індексом вони були б збагачені джерелами повноцінного білка, харчових волокон і мінеральних речовин. Додавання міцелярного казеїну зі зниженим вмістом лактози надає можливість не тільки збільшити вміст білка, але й підвищити біологічну цінність хліба та подовжити його термін зберігання [83]. Також значну увагу дослідників привертає інулінвмісна сировина, зокрема топінамбур, який є хорошим дієтичним продуктом, легко розпадається до фруктози, засвоєння якої меншою мірою залежить від гормону підшлункової залози інсуліну, ніж засвоєння глюкози. Однак така сировина має відмінні від пшеничного борошна властивості, тому впливатиме на якість хлібобулочних виробів та потребує дослідження можливості застосування різних технологічних прийомів для отримання виробів не тільки високої харчової цінності, а й високої якості з цією сировиною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Роль здорового харчування як дієтичної терапії є важливою в контексті підтримання стану здоров'я, особливо при метаболічних порушеннях в організмі (Шевченко, Сімахіна, & Шевченко, 2020).

У технології хлібобулочних виробів застосовують топінамбур у вигляді пюре. Проводили пробні випікання хліба із внесенням до рецептури тіста пюре в кількості 10%, 20%, 30%. Під час теплової обробки топінамбура відбулось потемніння його м'якоті, яке викликане дією нативних ферментів сировини, зокрема поліфенолоксидози. Для запобігання ферментативному потемнінню необхідно провести її інактивацію (Горайнова, Сімакова, Єріс, Гусак, & Домашук, 2022).

Досліджено, що внесення пюре топінамбура у кількості 10, 15 і 20% впливає на властивості клейковини пшеничного борошна, а саме зменшення її вмісту, зміну характеристик: клейковина стає пружнішою, її розтяжність знижується, а за умови додавання 20% пюре вона розривається. Також визначено, що зі збільшенням частки пюре тривалість бродіння тіста скорочується на 6,25—8,75%. Додавання пюре топінамбуру позитивно позначилося й на виході готової продукції, збільшивши його на 5,20—26,34% (Хомич, Ткач, Наконечна, Нестеренко, & Пріор, 2021).

Було оцінено суміш порошку топінамбура в кількості 5, 7,5 та 10% з борошном пшеничним. Хліб з такого борошна оцінювали протягом 4 днів зберігання. Результати показали зменшення об'єму, вищу вологість і менше зниження структурних характеристик під час зберігання порівняно з контрольним хлібом. Аналіз профілю текстури показав, що a_w коливалися від 0,63 до 0,90. Також оцінювали кількість поліфенолів — від 0,57 мг GAE/г у хлібі з 10% до 0,13 мг GAE/г у хлібі з сумішшю 5% та антиоксидантну активність — від 0,55 мг тролоксу-екв/г сухої речовини до 0,14% мг тролоксу-екв/г сухої речовини. Колориметричні тести виявили колір, схожий на цільнозерновий хліб (Canale та ін., 2023).

Було визначено якісні характеристики борошна та хлібної суміші, отриманих шляхом додавання борошна з топінамбура як джерела клітковини. Додавання борошна з топінамбура в кількості 10%, 20%, 30% та 40% зменшило водопоглинальну здатність борошна, кількість клейковини в тісті та збільшило кислотність борошняної суміші. Оптимальна пропорція борошна з топінамбура для збереження якості хліба становить від 18,2% до 20,6%. Зразки хліба з 10% та 20% борошна отримали найвищі сенсорні бали (Rorciuc, 2016).

Додавання клітковини топінамбура призвело до збільшення твердості хліба, тоді як когезійність та еластичність знизилися. Заміна 3, 6 та 12% пшеничного борошна клітковиною топінамбура призвела до збільшення кінцевої вологості, білка, золи та клітковини. Додавання 3% та 6% харчових волокон змінило сенсорні характеристики текстури, хоча суттєво не вплинуло на загальну прийнятність продукту. Результати показали вищу прийнятність для хліба з 3 та 6% харчових волокон, з нижчими значеннями для хліба з 12%. Більша кількість добавки в рецептурі призведе до суттєвих змін кольору, смаку та загального вигляду, що зробить хліб менш прийнятним для споживача (Frutos, Guilabert-Antón, Tomás-Bellido, & Hernández-Herrero, 2008).

Порошок топінамбура із зовнішніх приквітків містить фенольні сполуки, флавоноїди, такі як апігенін і його глікозильовані форми, і клітковину, включаючи інулін (~2 г/100 г). Досліджено заміну 5, 10 та 15% борошна порошком для покращення харчової цінності хліба. Рецепт з 10% забезпечила найкращий баланс біоактивного вмісту, технологічні та сенсорні властивості. Серед ідентифікованих сполук хлорогенова кислота та дикофеїлхінічні кислоти були найбільш біодоступними (92,5%). Встановлено нижчий глікемічний індекс, ніж у контролі (Bavaro, De Bellis, Montemurto, D'Antuono, Linsalata, & Cardinali, 2025).

Топінамбур використовують для виготовлення житнього хліба. Встановлено, що додавання порошку топінамбура пригнічує приріст мікроорганізмів в процесі бродіння тіста, кількість дріжджів, які входять до складу закваски на 40, 54 та 80% відповідно в зразках з додаванням 2, 3 та 4% порівняно з контрольним зразком. Кількість молочнокислих бактерій зменшується на 70, 83 та 97% відповідно. Співвідношення фруктози до глюкози в хлібі з топінамбуром складає 1:2,35, для контрольного зразка — 1:1,95 (Волощук, Ярковий, Полущька, Пашова, & Грегірчак, 2019).

Важливо споживати продукти не лише з високим вмістом харчових волокон, а й з повноцінними білками. Доведено покращення секреції інсуліну в організмі людей при цукровому діабеті (Pasin, & Comerford, 2015). Для визначення протидіабетичної активності гідролізатів казеїну досліджували інгібіторну активність пептидів гідролізату казеїну щодо альфа-амілази. Результати демонструють терапевтичний потенціал пептидів гідролізату казеїну як протидіабетичного засобу, з переважаючою активністю щодо інгібування альфа-амілази. Сильні антиоксидантні, протизапальні й антигемолітичні властивості пептиду додатково підтверджують його потенціал для ширшого терапевтичного застосування. Дослідження *in vitro* виявили дозозалежне інгібування альфа-амілази з максимумом 95,7% при 500 мкг/мл (Aziz та ін., 2025).

Відомо застосування гідролізату натрію казеїну з обмеженим ступенем гідролізу, який демонстрував чудові функціональні властивості *in vitro*, та екстенсивно гідролізований гідролізат з кислого казеїну з нижчими функціональними властивостями *in vitro*. Хліб, виготовлений з використанням гідролізату натрію казеїну, загалом мав гіршу якість порівняно з контролем, тоді як додавання екстенсивно гідролізованого гідролізату кислого казеїну покращило його характеристики. Крім того, результати показують, що функціональні властивості *in vitro* є неадекватними предикторами застосованої функціональності в такій складній системі, як хліб (Crowley, O'Brien, Slattery, Chapman, Arendt, & Stanton, 2002).

Таким чином, існують різні дані щодо впливу казеїну та топінамбуру на властивості тіста і хліба, однак переважно спостерігається погіршення структурно-механічних характеристик. Тому **метою роботи** було визначення впливу способів внесення порошку топінамбура в тісто з фруктозою для хлібобулочних виробів на показники їхньої якості.

Матеріали і методи. *Підготовка зразків.* Для досліджень використовували борошно пшеничне вищого сорту, казеїн — 10,8%% до маси борошна та порошок топінамбура — 5,3% до маси борошна, що забезпечує 30% добової потреби в білку та харчових волокнах, відповідно.

Оскільки виробу планувалось збагачувати одночасно джерелами білка та харчових волокон, казеїн, як джерело білка, вносили в комплексі з порошком топінамбура. До рецептури також входили дріжджова суспензія, розчин солі, фруктоза — 5% до маси борошна, суміш цитратів кальцію, магнію, цинку та заліза в сухому вигляді у кількості, що забезпечуватиме 50% добової потреби у кожному елементі.

Крупність частинок сировини. Розмір частинок борошна та порошку топінамбура визначали шляхом просіювання на ситах. Використовували сита з різною тканиною сита та різним розміром отворів: N 33/36 (35) (220 мкм), N 27 (260 мкм), N-067 (670), N 49/52 PA (43) (132 мкм), N 41/43 (38) (160 мкм) (Shevchenko, & Drobot, 2022).

Масова частка води тіста і хліба. Визначення вологості проводилося в тісті експрес-методом на приладі Чижова, а хліба — повітряно-тепловим методом шляхом зневоднення в повітряно-тепловій шафі при 130 °C (Hetman, Mykhonik, Kuzmin, & Shevchenko, 2021).

Газоутворювальна здатність тіста. Показником газоутворювальної здатності є кількість см³ вуглекислого газу (CO²), що виділяється під час бродіння та витримання тіста зі 100 г борошна за температури 30 °C. Цей показник визначали волюметричним методом, а саме об'ємом CO², що виділяється за постійної температури та тиску (Shevchenko, Drobot, & Galenko, 2022).

Формоутримувальну здатність тіста характеризували за показником розпливання кульки тіста в процесі бродіння. Тісто замішували з рецептурних компонентів температурою 29—30 °C. Наважку 100 г формували в кульку і клали в центр скляної пластини з міліметровою шкалою. Пластинку з тістом розташовують у зволоженому термостаті при 30 °C. Протягом 3 год кожні 30 хв фіксували середній діаметр кульки тіста (Дробот, Шевченко, & Літвинчук, 2021).

Питомий об'єм хліба. На початковому етапі визначають контрольний об'єм зерна шляхом засипання його в порожню чашу приладу. Об'єм хліба визначають шляхом витіснення зразком хліба об'єму зерна, еквівалентному його питомому об'єму. Вимірювання проводять двічі, відхилення між паралельними визначеннями не повинні перевищувати 5% (Шевченко, & Фурсік, 2023). Питомий об'єм хліба визначається діленням об'єму хліба на його масу і виражається з точністю до 1 см³/100 г (Zhu, Sakulnak, & Wang, 2016).

Пористість хліба. Пористість хліба відображає об'єм пор у певному об'ємі м'якушки, виражений у відсотках до загального об'єму (Verheyen, Albrecht, Elgeti, Jekle, & Becker, 2015).

Формостійкість хліба. Формостійкість характеризується відношенням висоти подового хліба (H) до його діаметра (D). H та D визначаються за допомогою спеціального приладу або лінійки з міліметровими поділками. Береться найбільше значення висоти хліба. За діаметр D вимірюють найбільший і перпендикулярний діаметри та обчислюють середній діаметр (Hetman, Mykhonik, Kuzmin, & Shevchenko, 2021).

Визначення оптимальної кількості рецептурних компонентів. Використовували метод математичного планування багатофакторного експерименту, який ставили за D-оптимальним планом для поліномів другого ступеню (Khare, 2015; Kuşcu, & Sponza, 2011; Shah, 2014).

Статистичний аналіз. Представлені дані являють собою середнє арифметичне значення трьох повторів $\pm$ стандартне відхилення.

Викладення основних результатів дослідження. Властивості рецептурних компонентів переважно визначають перебіг процесів під час виготовлення хліба. Значний вплив має крупність складових рецептури. Узаконеним показником крупності борошна є величина залишку і проходу крізь сита певного розміру.

У нормативній документації не передбачена крупність частинок порошку топінамбура. Проте органолептично вони значно крупніші, ніж борошно вищого сорту. З метою порівняння крупності досліджуваних добавок з крупністю пшеничного борошна визначали схід і прохід їх через сита з розміром отворів, передбачених нормами для пшеничного борошна першого, другого і обойного сортів.

Оцінка гранулометричного складу порошку топінамбура показала, що за крупністю він найближче до пшеничного обойного борошна, не має залишку на ситі № 067, а прохід його крізь сито № 41/43 на 21% нижчий, ніж обойного борошна (табл. 1).

Таблиця 1. Крупність частинок порошку топінамбура порівняно з пшеничним борошном

Показники крупності, № сит	Розмір отвору, мкм	Пшеничне борошно, сорту (ГСТУ 46.004-99)			Порошок топінамбура
		першого	другого	обойне	
Залишок на ситі %, не більше:					
№ 33/36 (35)	220	2	—	—	8,7
№ 27	260	—	2	—	16,9
№-067	670	—	—	2	—
Прохід крізь сито, % не менше:					
№ 49/52 ПА (43)	132	80	—	—	0,14
№ 41/43 (38)	160	—	65	35	42,3

Більша крупність добавки й особливості структури її харчових волокон певною мірою пояснює більшу ВПЗ цієї сировини (Shevchenko, 2021), що впливатиме на поглинання води в процесі тістоприготування. Тому необхідно визначити раціональний спосіб внесення порошку топінамбура з метою отримання хліба з високими показниками якості.

Визначали ефективність внесення збагачувача в сухому стані під час замішування тіста та в разі застосування казеїну у вигляді суспензії. Попередніми дослідженнями встановлено погіршення властивостей тіста з додаванням казеїну — зменшення інтенсивності газоутворення, газоутримання, якості клейковини (Drobot, Shevchenko, & Marchenko, 2016). Тому важливо дослідити застосування технологічних прийомів також з метою їхнього покращення.

Було досліджено такі способи внесення сировини:

- 1) у сухому вигляді на стадії замішування тіста;
- 2) у вигляді суспензії казеїну у воді, порошок топінамбура — в сухому вигляді;
- 3) у вигляді суспензії казеїну з різним гідромодулем, після чого внесення в отриману суспензію порошку топінамбура.

Під час проведення досліджень суспензію казеїн-вода готували при гідромодулях: 2; 5; 10. При гідромодулі 5, порівняно з іншими варіантами, суспензія була достатньо однорідна, тому в подальших дослідженнях суспензію казеїну готували за гідромодуля 5. Результати досліджень представлено в табл. 2.

Таблиця 2. Показники технологічного процесу та якості виробів за різних способів внесення сировини

Найменування показників	Характеристика	
	суспензія казеїну (10,8%) та порошок топінамбура (5,3%) в сухому вигляді	казеїн (10,8%) та порошок топінамбура (5,3%) в сухому вигляді
Тісто		
Вологість, %	42,2±0,1	42,1±0,1
Кислотність, град		
- початкова	1,7±0,1	1,7±0,1
- кінцева	2,7±0,2	2,7±0,2
Тривалість бродіння, хв	150±2	
Тривалість вистоювання, хв	35±2	36±2
Сумарне газоутворення в тісті, см ³ , CO ₂	1496±2	1492±2
Хліб		
Питомий об'єм, см ³ /100 г	260±3	260±2
Формостійкість, Н/Д	0,4±0,1	0,4±0,1
Пористість, %	74±1	74±1
Кислотність кінцева, град	2,0±0,1	2,0±0,1
Зовнішній вигляд:		
форма	Округла, не розпливчата, без притисків	
поверхня	Гладка. Без тріщин та підривів, без забруднення	
колір	Світло-коричневий	Світло-коричневий
пропеченість м'якушки	Пропечена, еластична, не липка	
стан м'якушки	З вираженими ущільненнями	
пористість м'якушки	Розвинута нерівномірно	
смак	Властивий даному виду виробів	
запах	Властивий даному виду виробів	

Примітка: результати представлені як середнє значення ± стандартне відхилення трьох повторів.

Дослідженнями встановлено відмінності фізико-хімічних показників якості готових виробів при внесенні сировини в сухому вигляді та при приготуванні суспензії казеїну у воді, порошок топінамбура — в сухому вигляді. Проте органолептично вироби мали різні характеристики. За приготування суспензії казеїну з гідромодулем 5 і внесеними в неї топінамбуром в сухому вигляді встановлено, що у м'якушці виробів були виражені ущільнення та сліди непромісу. Це очевидно пов'язано з надмірно крупними частинками порошку топінамбура, які недостатньо набухають у процесі замісу та бродіння тіста.

У (Коркач, Лебеденко, & Соколова, 2009) вносили 4,5% порошку топінамбура до маси борошна за безопарного способу та встановили питомий об'єм хліба на рівні 284 см³/100 г, пористість — 72,83%, що практично співпадає з отриманими в наведених дослідженнях даними, формостійкість була дещо вищою.

Інші дослідники (Холодова, & Сафонова, 2011) вносили 4% порошку топінамбура в сухому вигляді і встановили питомий об'єм хліба 250 см³/100 г, пористість 67%, що є нижчими значеннями порівняно з отриманими в цьому дослідженні.

Було досліджено спосіб внесення сировини, за якого готували суспензію казеїну, після чого в неї вносили порошок топінамбура, а також спосіб, за якого перед замішуванням тіста суспензію залишали на 15 хв для гідратації.

Таблиця 3. Показники технологічного процесу та якості виробів із замочуванням сировини та без замочування

Показники	Суспензія казеїну+порошок топінамбура без гідратування	Суспензія казеїну+порошок топінамбура з гідратуванням 15 хв
Тісто		
Вологість, %	42,1±0,1	42,2±0,2
Кислотність, град		
- початкова	1,7±0,1	1,7±0,1
- кінцева	2,7±0,1	2,7±0,2
Тривалість бродіння, хв	150±0,3	
Тривалість вистоювання, хв	35±1	37±1
Сумарне газоутворення в тісті, см ³ , CO ₂	1496±4	1464±2
Розпливання кульки, мм	100±2	104±2
Хліб		
Питомий об'єм, см ³ /100 г	260±1	258±1
Формостійкість, Н/Д	0,4±0,1	0,4±0,1
Пористість, %	74±1	73±1
Кислотність кінцева, град	2,0±0,1	2,0±0,1

Примітка: результати представлені як середнє значення ± стандартне відхилення трьох повторів.

Встановлено (табл. 3), що сумарне газоутворення в тісті без гідратації сировини підвищилося на 2,1%, кращі показники якості також мали зразки хліба без гідратації сировини. При внесенні в тісто гідратованої сировини дещо зменшувався питомий об'єм хліба та збільшувалось розпливання тіста на 4%. Це може бути

пояснене тим, що в разі замочування компонентів їх водорозчинні харчові волокна набухають під час гідратації і в тісті зменшується кількість води для набухання білків, що зумовлює погіршення його консистенції.

У разі відсутності операції замочування вода, яка внесена в тісто, зв'язується білками борошна та іншими складовими добавок одночасно і тісто має стабільнішу консистенцію, тому з огляду на отримані результати гідратувати досліджувану сировину недоцільно.

У технології хліба тісто для булочних виробів здебільшого готують опарним або безопарним способом, а також на диспергованій фазі. Для вибору способу приготування тіста основним критерієм має бути забезпечення високих показників якості готових виробів. Під час проведення досліджень тісто готували безопарним, опарним способом з внесенням суспензії казеїну з порошком топінамбура в опару або в тісто та на диспергованій фазі.

За опарного способу опару готували вологістю 48% з 50% усього борошна. В опару вносили 3% пресованих дріжджів, тривалість бродіння її була 3,0 год при 28—30 °С. Тісто замішували масовою часткою вологи 42% протягом 12 хв, тривалість бродіння тіста на опарі була 90 хв.

Дисперговану фазу готували вологістю 60% з 30% борошна з внесенням 3% дріжджів, фруктози та суспензії казеїну з порошком топінамбура. Замішували протягом 5 хв, тривалість бродіння — 30 хв. Тісто на диспергованій фазі замішували 15 хв, тривалість бродіння становила 60 хв.

За безопарного способу всю сировину вносили в одну фазу, тривалість замішування становила 15 хв, тривалість бродіння — 150 хв.

Результати досліджень показали (табл. 4), що кращі показники якості виробів були за опарного способу з доданням добавок в тісто.

Таблиця 4. Вплив способу приготування тіста і стадії внесення добавок

Показники	Опарний, суспензію внесено в		Безопарний	На диспергованій фазі
	опару	тісто		
Опара / диспергована фаза				
Вологість, %	48,0±0,2	48,0±0,2	—	60,0±0,3
Кислотність кінцева, град	3,1±0,3	3,2±0,3	—	2,9±0,2
Тривалість бродіння, хв	180±3	180±3	—	30
Тісто				
Вологість, %	42,2±0,1	42,0±0,2	42,1±0,1	42,2±0,2
Кислотність кінцева, град	2,9±0,1	2,9±0,2	2,8±0,1	2,8±0,1
Тривалість бродіння, хв	90±2	90±2	150±3	60±2
Тривалість вистоювання, хв	32±1	32±1	34±2	34±2
Хліб				
Питомий об'єм, см ³ /100 г	268±1	273±2	265±3	266±2
Формостійкість, Н/D	0,42±0,1	0,42±0,1	0,41±0,1	0,41±0,1
Пористість, %	74±1	74±1	73±1	73±2
Кислотність кінцева, град	2,2±0,1	2,2±0,2	2,0±0,1	2,1±0,1
Характеристика м'якучки	Еластична			

Примітка: результати представлені як середнє значення ± стандартне відхилення трьох повторів.

За цього способу питомих об'єм хліба був більшим на 1,8% порівняно з внесенням добавок в опару за цього ж способу, на 2,9% порівняно з безопарним способом та на 2,6% порівняно зі способом на диспергованій фазі, спостерігалась краща пористість і стан м'якушки. Це можна пояснити тим, що при доданні добавок з високим вмістом харчових волокон в опару чи дисперговану фазу погіршуються структурно-механічні властивості тіста внаслідок того, що розчинні харчові волокна довше контактують зі складовими борошна.

При порівнянні безопарного способу та способу приготування тіста на диспергованій фазі показники якості виробів практично однакові, при цьому тривалість технологічного процесу менша, ніж за опарного. За всіх досліджених способів якість готових виробів задовільна. Зважаючи на отримані результати, доцільно застосовувати безопарний спосіб приготування виробів.

Для вирішення питання встановлення оптимального дозування рецептурних компонентів у поєднанні з оптимальними технологічними параметрами застосовують підходи математичного моделювання.

За результатами попередніх досліджень встановлено, що найбільш суттєвими факторами впливу на якість виробів з порошком топінамбура є кількість порошку топінамбура (X_1) кількість казеїну (X_2) та тривалість бродіння тіста (X_3). Y — критерій оптимальності — питомих об'єм готових виробів, $\text{см}^3/100 \text{ г}$. Діапазони факторного простору для казеїну — 7,2—14,4%, кількість порошку топінамбура — 5,3—7,0%, тривалість бродіння тіста — 90—120 хв.

Математична модель має вигляд:

$Y = 295,8125 - 29,5625 \cdot X_1 - 24,9375 \cdot X_2 - 13,4375 \cdot X_3$ — в кодованому вигляді;

$Y = 489,1 - 16,9 \cdot X_1 - 6,96 \cdot X_2 - 0,2 \cdot X_3$ — в натуральному вигляді.

Оптимальне значення питомого об'єму встановлено при кількості порошку топінамбура (X_1)=4,0%, кількості казеїну (X_2)=9,0% та тривалості бродіння тіста (X_3)=150 хв.

Таким чином, отримані результати дозування сировини за запропоновані технологічні операції і параметри дозволяють випікати хлібобулочні вироби з порошком топінамбура високої якості та підвищеної харчової цінності.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на визначення мікробіологічної стабільності виробів і перетравлюваності їх організмом.

Висновки

Інулінвмісна сировина, зокрема топінамбур, є хорошим дієтичним продуктом, легко розпадається до фруктози, засвоєння якої меншою мірою залежить від гормону підшлункової залози інсуліну, ніж засвоєння глюкози. Додавання міцелярного казеїну до рецептури хлібобулочних виробів зі зниженим вмістом лактози надає можливість не тільки збільшити вміст білка, але й підвищити біологічну цінність хліба.

Встановлено раціональний спосіб внесення добавок у тісто: казеїну у вигляді суспензії з гідромодулем 5 та доданням у суспензію порошку топінамбура.

За опарного способу приготування хліба з внесенням суспензії в тісто питомих об'єм хліба був більшим на 1,8% порівняно з внесенням добавок в опару за цього ж способу, на 2,9% порівняно з безопарним способом та на 2,6% порівняно зі способом на диспергованій фазі, спостерігалась краща пористість і стан м'якушки.

При порівнянні безопарного способу та способу приготування тіста на диспергованій фазі показники якості виробів практично однакові, при цьому тривалість технологічного процесу менша, ніж за опарного. За всіх досліджених способів якість готових виробів задовільна. Зважаючи на отримані результати, доцільно застосовувати безопарний спосіб приготування виробів.

Оптимальне значення питомого об'єму встановлено при кількості порошку топінамбура — 4,0%, кількості казеїну — 9,0% й тривалості бродіння тіста — 150 хв.

Література

- Волошук, Г. І., Ярковий, А. О., Полупька, Б. М., Пашова, Н. В., Грегірчак, Н. М. (2019). Дослідження впливу порошку топінамбура на вміст цукрів в житньому хлібі заварному. *Наукові праці НУХТ*, 25(3), 256—263. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2019-25-3-29>.
- Горайнова, Ю. А., Сімакова, О. О., Єріс, Ю. В., Гусак, Є. Р., Домашук, А. Є. (2022). Дослідження впливу рослинних добавок на якість хлібобулочних виробів. *Обладнання та технології харчових виробництв*, 44(1), 21—28. <https://doi.org/10.33274/2079-4827-2022-44-1-21-28>.
- Дробот, В. І., Шевченко, А. О., Літвинчук, С. І. (2021). Вплив рисового борошна на структурно-механічні властивості тіста та якість хліба. *Наукові праці НУХТ*, 27(5), 114—122. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2021-27-5-15>.
- Коркач, Г. В., Лебеденко, Т. Є., Соколова, Н. Ю. (2009). Вплив порошку топінамбура на якість хлібобулочних виробів. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*, 36(1), 131—140.
- Холодова, О. А., Сафонова, О. М. (2011). Вплив порошку топінамбура на якість хліба з борошна пшеничного озонованого. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*, 2(14), 305—309.
- Хомич, Г. П., Ткач, Н. І., Наконечна, Ю. Г., Нестеренко, О. В., Приор, Н. М. (2021). Використання топінамбуру у технології борошняних виробів. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. Серія: Харчові технології*, 23(95), 13—19. <https://doi.org/10.32718/nvvet-19503>.
- Шевченко, О. Ю., Сімахіна, Г. О., Шевченко, А. О. (2020). Оздоровче харчування в контексті продовольчої безпеки в Україні. *Наукові праці НУХТ*, 26(6), 36—43. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2020-26-6-6>.
- Шевченко, А. О., Фурсік, О. П. (2023). Вплив концентрату рисового протеїну в поєднанні з фосфоліпідами на якість та харчову цінність пшеничного хліба. *Наукові праці НУХТ*, 29(3), 150—158. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2023-29-3-14>.
- Aziz, T., Zhao, L., Yang, Z., Al-Hoshani, N., Alwethaynani, M. S., Mashat, R. M., Al-Joufi, F. A., Alharthi, N. S., Almaghrabi, S., Baothman, B. K., Alhomrani, M., Alghamd, A. A. (2025). Investigating the anti-diabetic potential of casein through in vitro and computational gene expression analysis: a comparative study with metformin for advancing type 2 diabetes therapy. *Italian Journal of Food Science*, 37(3), 326—339. <https://doi.org/10.15586/ijfs.v37i3.3101>.
- Bavaro, A. R., De Bellis, P., Montemurro, M., D'Antuono, I., Linsalata, V., Cardinali, A. (2025). Characterization and functional application of artichoke bracts: Enrichment of bread with health promoting compounds. *LWT*, 215, 117256. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117256>.
- Canale, M., Sanfilippo, R., Strano, M. C., Amenta, M., Allegra, M., Proetto, I., Papa, M., Palmeri, R., Todaro, A., Spina, A. (2023). Artichoke Industrial Waste in Durum Wheat Bread: Effects of Two Different Preparation and Drying Methods of Flours and Evaluation of Quality Parameters during Short Storage. *Foods*, 12(18), 3419. <https://doi.org/10.3390/foods12183419>.
- Crowley, P., O'Brien, C., Slattery, H., Chapman, D., Arendt, E., Stanton, C. (2002). Functional properties of casein hydrolysates in bakery applications. *European Food Research and Technology*, 215, 131—137. <https://doi.org/10.1007/s00217-002-0510-5>.
- Drobot, V., Shevchenko, A., Marchenko, O. (2016). The influence of proteins on the technological process of bread making with fructose. *Food and Environment Safety*, XV(4), 341—346.

Frutos, M. J., Guilabert-Antón, L., Tomás-Bellido, A., Hernández-Herrero, J. A. (2008). Effect of Artichoke (*Cynara scolymus* L.) Fiber on Textural and Sensory Qualities of Wheat Bread. *Food Science and Technology International*, 14(5), 49—55. <https://doi.org/10.1177/1082013208094582>.

Hetman, I., Mykhonik, L., Kuzmin, O., Shevchenko, A. (2021). Influence of spontaneous fermentation leavens from cereal flour on the indicators of the technological process of making wheat bread. *Ukrainian Food Journal*, 10(3), 492—506. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2021-10-3-6>.

Khare, A. K., Biswas, A. K., Balasubramaniam, S., Chatli, M. K., Sahoo, J. (2015). Optimization of meat level and processing conditions for development of chicken meat noodles using response surface methodology. *Journal of Food Science and Technology*, 52(6), 3719—3729. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1431-6>.

Kuşçu, Ö. S., Sponza, D. T. (2011). Application of Box-Wilson experimental design method for 2,4-dinitrotoluene treatment in a sequential anaerobic migrating blanket reactor (AMBR)/aerobic completely stirred tank reactor (CSTR) system. *Journal of Hazardous Materials*, 187(1—3), 222—234. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.021>.

Pasin, G., Comerford, K. B. (2015). Dairy foods and dairy proteins in the management of type 2 diabetes: a systematic review of the clinical evidence. *Advances in Nutrition*, 15; 6(3), 245—59. <https://doi.org/10.3945/an.114.007690>.

Ropciuc, S. (2016). Study on Effects of Artichoke Flour Addition in Bread. Режим доступу: https://www.academia.edu/99232941/Study_on_Effects_of_Artichoke_Flour_Addition_in_Bread.

Shah, M., Garg, S. K. (2014). Full factorial design in optimization of solvent-free microwave extraction of ginger essential oil. *Journal of Engineering*, 1—5. <https://doi.org/10.1155/2014/828606>.

Shevchenko, A. (2022). Artichoke Powder and Buckwheat Bran in Diabetic Bakery Products In: Paredes-Lopez, O., Stabnikov, V., Shevchenko, O., Ivanov, V., eds., Bioenhancement and Fortification of Foods for a Healthy Diet, CRC Press, Boca Raton, USA, 115—134. <https://doi.org/10.1201/9781003225287-8>.

Shevchenko, A., Drobot, V. (2022). Use of rice flour in wheat bread technology. *EUREKA: Life Sciences*, 6, 44—51. <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2022.002677>.

Shevchenko, A., Drobot, V., Galenko, O. (2022). Use of pumpkin seed flour in preparation of bakery products. *Ukrainian Food Journal*, 11(1), 90—101. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2022-11-1-10>.

Verheyen, C., Albrecht, A., Elgeti, D., Jekle, M., Becker, T. (2015). Impact of gas formation kinetics on dough development and bread quality. *Food Research International*, 76(3), 860—866.

Zhu, F., Sakulnak, R., Wang, S. (2016). Effect of black tea on antioxidant, textural, and sensory properties of Chinese steamed bread. *Food Chemistry*, 194, 1217—1223.

УДК 637.03

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE VALUE OF PORK CARCASSES BASED ON MODERN METHODS AND QUALITY ASSESSMENT TOOLS

I. Oshchypok, <https://orcid.org/0000-0002-5427-3376>

Ivan Franko National University of Lviv

Key words:

Pig carcass evaluation
Lean meat
Biomedical
Ultrasound and visual
methods
Backfat thickness

Article history:

Received 11.11.2025
Received in revised form
26.11.2025
Accepted 15.12.2025

Corresponding author:

I. Oshchypok

E-mail:

ihosh.ypok@gmail.com

Citation: Ощипок І. М. (2025). Порівняльний аналіз цінності свинячих туш на основі сучасних методів та інструментів оцінювання якості. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 201—215.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-16

ABSTRACT

The current practice of classifying pig carcasses both in Ukraine and in the countries of the European Union was analyzed. It was found that the priority areas for determining the lean meat content in pig carcasses were the use of indirect assessment methods based on determining the morphological characteristics of the carcass, which have a high level of correlation with the lean meat content. Such approaches make it possible to carry out measurements directly on the slaughter line quickly, accurately and with minimal costs. Informative features of such an assessment of carcasses were highlighted, such as the thickness of back fat, the thickness and area of individual muscle areas, as well as their ratios. Among the listed characteristics, the thickness of back fat is of particular importance, since it most fully meets modern requirements. Its determination can be performed by both manual and automatic devices. Devices are classified depending on the physical principle of their action for assessing pig carcasses into several categories, among which the most common are ultrasound systems, image analysis technologies and biomedical methods. Each of these technologies has its own advantages and limitations. Thus, ultrasonic and visual methods provide automation of the process, increase the speed of assessment and reduce the influence of the human factor, while biomedical methods are characterized by maximum accuracy, but require significant capital investments and sophisticated equipment. It was confirmed that the thickness of back fat was the most informative characteristic, which allows to effectively combine practicality and accuracy, and therefore can be considered a central indicator for modern classification systems. Methods for assessing pig carcasses for lean meat content used in Ukraine and EU countries by various instrumental methods were compared and recommendations on their application were given to producers.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-16

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЦІННОСТІ СВИНЯЧИХ ТУШ НА ОСНОВІ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА ІНСТРУМЕНТІВ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ

І. М. Ощипок, <https://orcid.org/0000-0002-5427-3376>

Львівський національний університет імені Івана Франка

У статті проаналізовано сучасну практику класифікації свинячих туш як в Україні, так і в країнах Європейського Союзу. Встановлено, що пріоритетними напрямками визначення вмісту пісного м'яса в тушах свиней є використання методів їх непрямої оцінки, які ґрунтуються на визначенні морфологічних характеристик туші, що мають високий рівень кореляції з вмістом пісного м'яса. Такі підходи дають змогу здійснювати вимірювання безпосередньо на лінії забою швидко, точно та з мінімальними витратами. Виділені інформативні ознаки такої оцінки туш, як товщина спинного жиру, товщина та площа окремих м'язових ділянок, а також їхні співвідношення. Серед наведених характеристик особливе значення має товщина спинного жиру, оскільки вона найповніше відповідає сучасним вимогам. Її визначення може виконуватися як ручними, так і автоматичними приладами. Класифіковано прилади залежно від фізичного принципу їх дії для оцінювання туш свиней на кілька категорій, серед яких найбільш поширеними є ультразвукові системи, технології аналізу зображень та біомедичні методи. Кожна з цих технологій має власні переваги та обмеження. Так, ультразвукові та візуальні методи забезпечують автоматизацію процесу, підвищення швидкості оцінки та зменшення впливу людського фактора, тоді як біомедичні методи відзначаються максимальною точністю, але потребують значних капіталовкладень і складного обладнання. Підтверджено, що товщина спинного жиру є найбільш інформативною характеристикою, що дає змогу ефективно поєднати практичність і точність, а отже, може вважатися центральним показником для сучасних систем класифікації.

Порівняно методи оцінки туш свиней на вміст пісного м'яса, які використовуються в Україні і країнах ЄС різними інструментальними методами і наведено рекомендації виробникам щодо їх застосування.

Ключові слова: оцінювання туш свиней, пісне м'ясо, біомедичні, ультразвукові та візуальні методи, товщина спинного жиру.

Постановка проблеми. Фізичні характеристики м'яса як основа для оцінки його якості мають важливе значення не лише як джерело інформації про його склад і властивості, але й як вихідні дані для розробки методів оцінки селекційно-племінних показників (Бірта, & Бургу, 2010), спрямованих на підвищення якості продукції тварин м'ясного напрямку.

Розвиток промислових технологій виробництва м'яса та інтенсифікація масової селекції на підвищення м'ясності сприяли активному вивченню цих характеристик у прикладному аспекті. Водночас посилена інтенсифікація годівлі мала негативні наслідки у вигляді зниження якісних показників м'яса, що спричинило

значні економічні втрати через вибракування сировини на переробних підприємствах відповідно до технологічних вимог.

У зв'язку з цим виникла потреба у створенні простих, доступних і швидких методів визначення показників якості м'яса (Ощипок, 2022) для дослідження причин зниження його характеристик. Оптимальними є фізичні методи, що не порушують структуру м'язової тканини, серед яких: рН-метрія, кондуктометрія, оптичні методи (рефрактометрія, спектрофотометрія тощо) (Chang та ін., 2011) і комп'ютерна томографічна оцінка абдомінального жиру в мінісвиней. Їхньою перевагою є неруйнівний характер впливу на біооб'єкт, що дає змогу досліджувати інтактні м'язові тканини.

Класифікація свинячих туш полягає у їх віднесенні до різних комерційних класів на основі отриманої оцінки. Дві операції, які часто позначають одним терміном «класифікація», служать для визначення якості та економічної цінності окремих частин туш на об'єктивних засадах (He, Zhang, & Sun, 2015). Відповідно, вони є важливим інструментом підвищення ефективності ринку, оскільки забезпечують чітку та прозору основу для оплати вартості свиней залежно від їхньої якості під час приймання-здавання між тваринниками та забійними підприємствами, а також дозволяють уніфіковано фіксувати котирування свиней на внутрішніх і міжнародних ринках.

Користь від класифікації свинячих туш не обмежується лише комерційним рівнем, а проявляється також і на м'ясопереробному виробництві. Адже тваринники, завдяки цим підходам, окрім справедливої оплати за вирощену продукцію, яка відповідає якості тварин, отримують інформацію про характеристики вироблених туш (Russo, 1991) і можуть поступово пристосовувати їх до вимог ринку, щоб досягти найвищої ціни. Це стимулює більш ретельний вибір генетичного типу, удосконалення годівлі, методів утримання тощо.

Характеристики, що визначають якість туші, є численними та відрізняються як між різними державами, так і часто між окремими регіонами однієї країни. Саме тому ця тема розглядатиметься з урахуванням європейської класифікації (Busk, Olsen, & Brøndum, 1999), яка через 45 років після запровадження стала обов'язковою і в країнах Євросоюзу, зокрема і в Італії (Russo та ін., 1989) (табл. 1).

Таблиця 1. Етапи класифікації туш у ЄС та в Італії

Рік	Подія
1967	Перша таблиця класифікації: суб'єктивні та об'єктивні критерії
1970	Зміна таблиці; рекомендація застосування в усіх країнах
1974	Регламент щодо співіснування таблиці СЕС 1970 року з системами оцінки РМС у Великій Британії, Данії та Ірландії
1984	Таблиця EUROP: відмова від суб'єктивних критеріїв, прийняття РМС як єдиного критерію оцінки
1988	Дозвіл на використання перших методів класифікації в Італії: FOM, DESTRON, OP
2001	В Італії замінено рівняння 1988 року на нові та впроваджено нові інструменти
2007	Обов'язкове використання таблиці EUROP у всіх країнах
2011	Запроваджено обов'язкову класифікацію в Італії

Європейська класифікація свинячих туш була запроваджена у 1967 році. Спочатку оцінювання здійснювалося на основі поєднання об'єктивних і суб'єктивних критеріїв. У 1984 році від суб'єктивних критеріїв відмовилися й перейшли до нинішньої системи, що базується виключно на відсотках м'яса нежирної частини «Percentuale di Carne Magra» (PCM), яка об'єктивно визначається за допомогою інструментальних вимірювань товщини шпигу на спині або інших частинах туші.

У системі класифікації свинячих туш PCM — це ключовий показник, за яким передбачають (рис. 1):

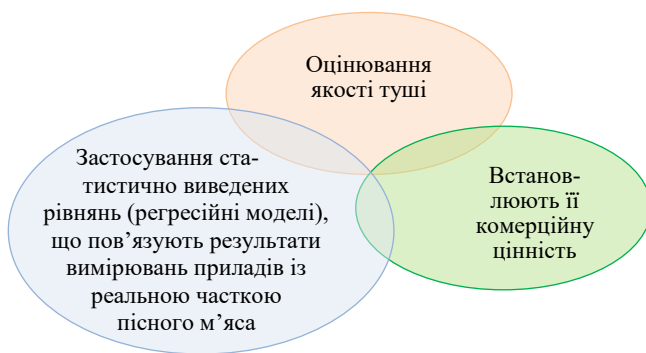


Рис. 1. Класифікація свинячих туш у системі PCM

Сортування свинячих туш, засноване на інструментальній класифікації, є стимулом для виробництва свиней бажаної якості. Класифікація ґрунтується на (прогнозованому) відсотках нежирного м'яса (LMP) в туші, отриманій шляхом дисекції всієї поперечно-смугастої м'язової тканини з туші, наскільки це можливо зробити ножом (Європейське Співтовариство, 2008; Walstra, & Merkus, 1995). LMP є основою для оплати виробникам та для продажу свинячих туш у Європейському Співтоваристві. За допомогою LMP можна об'єктивно передбачити онлайн проведення вимірювань на туші, на бойнях за допомогою різних типів пристроїв. Пристрої можуть бути ручними, напівавтоматичними або автоматичними (Reichert, 2006), а вимірювання можуть бути отримані за допомогою коефіцієнта відбиття світла (FOM, HGP, CGM), ультразвуку (UFOM, AUTOFOM), електромагнетизму (TOBEC) або зору (VCS2000, CSB-Image-Meater) (Font, & Gisbert, 2009). Останнім часом комп'ютерна томографія розглядається як альтернатива досить трудомісткій дисекції. Рівняння прогнозування, засноване на об'єктивних вимірюваннях, отриманих за допомогою пристрою, має відповідати правилам ЄС (Європейське Співтовариство, 2008) для належного відбору проб туш для розтину та точності прогнозування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У дослідженні (Branscheid, & Dobrowolsk, 2000) вказується, що ринкова вартість туші в цілому повинна бути представлена сумою цінностей усіх окремих частин, відрізнаних від туші. Ці значення окремих відрізів визначаються відповідно їхнім тканинним складам і характеристиками якості м'яса (рН тощо). Визначення ринкової вартості на лінії забою вимагає дуже швидких методів, що базуються на інструментальних вимірюваннях

та електронному управлінні даними. Наразі в Німеччині для визначення ринкової вартості доступні чотири технічно різні типи інструментів. Порівнюються та оцінюються такі інструментальні пристрої: оптоелектронні пристрої, ультразвукові сканери, Autoform (компанія SFK, Данія), система відеозображення VCS 2000. Ці чотири технічні системи дають однаково хороші результати у прогнозуванні ринкової вартості свинячої туші. Можна стверджувати, що повністю автоматичні пристрої представляють новий етап розвитку. Вони розраховують ринкову вартість на основі великої кількості вимірювань і в більшості аспектів з високою надійністю.

У статті (Marcoux, Pomar, & Faucitano, 2007) дані розділення та препарування 265 туш свиней використані для вивчення виходу пісного м'яса і можливості розрізняти пісні туші і жирні. Ті ж дані були використані для оцінки взаємозв'язку між різними визначеннями виходу пісного м'яса із застосуванням оптичного зонду Destron (LYDESTRON), виходу товарного м'яса (SMY), виходу пісного м'яса за Канадою (LY2000) та відсотка пісного м'яса (TVM), а також ринкової вартості туші. З огляду на найбільшу кількість туш, віднесених до крайніх категорій (пісніші та жирніші), TVM мав найбільшу розрізнявальну здатність на основі пісного м'яса туші. Коефіцієнти кореляції, отримані між ринковою вартістю туші та LYDESTRON, SMY, LY2000 та TVM, становили 0,14, 0,54, 0,36 та 0,23 відповідно. Ці слабкі кореляції демонструють, що сам вихід пісного м'яса не пояснює адекватно різницю в ринковій вартості між тушами, тому вихід пісного м'яса не може бути використаний для оцінки ринкової вартості незалежно від прийнятого визначення виходу пісного м'яса.

Результати цього дослідження підтвердили, що визначення виходу пісного м'яса впливає на здатність точно визначати пісний ступінь туші. Відсоток пісного м'яса — це визначення виходу, яке є найефективнішим для розрізнення туш. Ринкова вартість туші має лише слабкий зв'язок з різними визначеннями виходу пісного м'яса. Цей слабкий зв'язок означає, що використання виходу пісного м'яса як критерію оцінки може призвести до доплати виробникам за деякі пісні туші.

У праці (Aboah, & Lees, 2020) проаналізовано критерії, що застосовуються для оцінки ключових ознак промислової якості м'яса, та визначено характеристики, які споживачі вважають найбільш важливими під час прийняття рішень про купівлю. Для порівняння результатів різних досліджень і узагальнення їхніх висновків використано мережевий аналіз публікацій у наукових журналах і непараметричний порівняльний аналіз.

Отримані результати свідчать, що основним методом збору даних є опитування у місцях продажу, де фіксуються заявлені уподобання споживачів щодо ознак якості м'яса. На агрегованому рівні аналізу визначено п'ять найважливіших характеристик: країна походження, сертифікація безпеки харчових продуктів, ціна, система виробництва та наявність етикеток сертифікації якості. Усі вони належать до зовнішніх ознак і відносяться до атрибутів довіри.

Водночас на дезагрегованому рівні спостерігаються відмінності у рейтингах значущості цих характеристик залежно від виду м'яса. Автори статті пропонують розвивати подальші дослідження у напрямі вивчення взаємозв'язку між ознаками якості та їхнім впливом на поведінку споживачів у різних ринкових сегментах, спираючись на ціннісну пропозицію роздрібного продавця.

Дослідження (Schinckel, Wagner, & Einstein, 2009) знайомить з оцінками альтернативних показників складу туш. Дослідження проводили на 203 свинях живої масою за чотирма цільовими рівнями (100, 114, 128 та 152 кг), які представляють сім генетичних популяцій і які були оцінені за показниками м'язової маси туші (м'язова маса без жирової тканини, FFLM; м'язові тканини без ліпідів, LFASTIS; препарована м'язова маса у чотирьох розрізах, DL), жиру (загальна жирова тканина туші, TOFAT) та ліпідна маса (ліпіди м'яких тканин, STLIP).

Загалом, показник LFASTIS був на 22,8% більшим, ніж FFLM (47,8 проти 38,9 кг), а TOFAT був на 30% більшим, ніж STLIP (38,5 проти 29,6 кг). Алометричні коефіцієнти росту відносно маси туші були різними для вимірювань: $b = 0,776, 0,828, 0,794, 1,37$ та $1,49$ для FFLM, LFASTIS, DL, TOFAT та STLIP відповідно. При масі туші 90 кг прогнозоване зростання FFLM, LFASTIS, TOFAT та STLIP становило 0,314, 0,420, 0,553 та 0,446 кг/кг збільшення маси туші. Різниця між FFLM та LFASTIS, які відображають неліпідні компоненти жирової тканини туші, була більшою у кастратів, ніж у свинок (9,2 проти 8,6 кг). Безжирова маса м'яких тканин прогнозувалася точніше на основі вимірювань туші або живої тварини. Безжирова маса м'яких тканин (LFASTIS) прогнозувалася точніше, ніж безжирова м'язова маса (FFLM), із меншим відносним коефіцієнтом варіації (4,6 проти 6,5% від їхніх середніх значень). Альтернативні показники складу туші оцінювалися як предиктори маси білка (MTPRO) та жиру (MTLIP) порожнього тіла. Маса білка порожнього тіла прогнозувалася з подібною точністю ($R^2 = 0,74 - 0,81$) як за DL, FFLM, LFASTIS, так і за вимірюваннями розпилених туш. Маса жиру порожнього тіла прогнозувалася точніше за TOFAT ($R^2 = 0,92$) або STLIP ($R^2 = 0,93$), ніж за вимірюваннями розпилених туш ($R^2 = 0,88$). Хоча альтернативні показники м'язової маси (LFASTIS проти FFLM) та жирової маси (TOFAT проти STLIP) були тісно пов'язані між собою ($r = 0,93 - 0,98$), вони мали різні відносні темпи росту (алометричні коефіцієнти), і тому не можуть бути передбачені як лінійні функції схожої змінної без суттєвих похибок залежно від вагової групи. У діапазоні цільової ваги від 100 до 152 кг свинки отримали на 12,9% більшу FFLM і на 12,1% більшу MTPRO, але лише на 4,4% більшу LFASTIS порівняно з кастратами. Безжирова м'язова маса є точнішим показником росту м'язів і предиктором потреби в лізіні. Безжирова маса м'яких тканин може бути визначена швидше і прогнозована точніше на основі вимірювань туші або живої тварини.

У праці (Engel, Lambooi, & Vereijken, 2012) показано, що рівняння прогнозування відсотка нежирного м'яса в тушах свиней у Нідерландах були отримані для Hennessy Grading Probe 7, Capteur Gras/Maigre — Sydel та CSB-Image-Meater. Оскільки очікується, що кастровані самці зникнуть з популяції свиней у Нідерландах найближчим часом, точність прогнозування було оцінено для різних сценаріїв, що представляють широкий діапазон різних пропорцій для кнурців, кастрованих самців і самок у популяції свиней у Нідерландах. Рівняння прогнозування для інструментів відповідають правилам ЄС щодо точності прогнозування для різних сценаріїв. Отже, ці рівняння залишатимуться дійсними, коли кастровані самці будуть (поступово) видалені з популяції забійних свиней у Нідерландах. Результати цього дослідження становлять інтерес для дослідників з країн або регіонів, які розглядають можливість використання прийнятих в ЄС інструментів. Статистичний підхід до оцінки точності прогнозування представляє особливий інтерес, коли перед-

бачаються зміни у пропорціях важливих субпопуляцій порівняно з цільовою популяцією.

Дослідження (Berg, Forrest, & Fisher, 1994; Font, Furnols, & Gispert, 2009) присвячені сучасним підходам до оцінювання якості свинини й охоплюють низку важливих аспектів. Зокрема, вивчається можливість застосування електромагнітного сканування свинячих туш у промислових умовах для забезпечення швидкого та безперервного контролю їх характеристик. Значну увагу (Font, Furnols, & Gispert, 2009; Patton та ін., 2008) приділено використанню рентгенівської комп'ютерної томографії у поєднанні з методами PLS-регресії для точного визначення вмісту пісного м'яса у тушах. Поряд із цим здійснюється порівняння ефективності різних технічних засобів та приладів, призначених для прогнозування відсотка пісного м'яса, що дає змогу обґрунтовано обирати найбільш результативні методи у виробничій практиці. Окремий напрям досліджень пов'язаний з аналізом впливу систем відгодівлі з використанням глибокої підстилки на продуктивність свиней, морфологічним складом їхніх туш та якісними показниками свинини, що дає змогу комплексно оцінити зв'язок між умовами утримання тварин і кінцевими параметрами продукції.

Прогнозування вмісту жиру, м'язової маси та ваги первинних відрубів для свиней різних генотипів та статей на зростанні (Carabús, Sainz, & Furnols, 2015) рекомендується проводити за допомогою комп'ютерної томографії.

Мета дослідження: провести порівняльний аналіз методів оцінки туш свиней на вміст пісного м'яса, які використовуються в Україні і країнах ЄС різними інструментальними методами, і надати рекомендації виробникам щодо їх застосування.

Матеріали і методи. Використовувались методологічні підходи до оцінки рівня розвитку інструментальних методів досліджень туш свиней, формування технології визначення вмісту пісного м'яса із застосуванням високопродуктивного обладнання та необхідності впровадження ефективних механізмів дослідження якості туш свиней. Сукупність загальнонаукових і спеціальних методів наукового дослідження, зокрема логічного узагальнення, методи індукції та дедукції, — для визначення і моделювання технологічних параметрів туш свиней. Методологія побудована на реалізації взаємозалежних етапів, необхідних для досягнення поставленої мети та вирішення завдань дослідження. При виконанні роботи використовувалися загальноприйняті та сучасні методи досліджень. Застосовано рівняння оцінки РСМ для побудови математичних моделей (зазвичай регресійних), які надають можливість розрахувати відсоток пісного м'яса в туші на підставі об'єктивних вимірювань.

Викладення основних результатів дослідження. Якісна свинина для харчової промисловості визначається об'єктивними факторами, такими як яскраво-рожева, тверда та волога текстура, висока вологоутримувальна здатність (низькі втрати рідини) та відповідний рівень рН, суб'єктивними якістьми, такими як бажана мармуровість для соковитості та смаку, а також загальний гарний зовнішній вигляд та відсутність дефектів. На ці характеристики впливає генетика тварини, годівля, обробка перед забійним процесом і післязабійна обробка. Класифікація свинячих туш здійснюється відповідно до стандартів, встановлених для оцінки якості м'яса. Основні критерії класифікації визначені у ДСТУ 7158:2010 М'ясо.

Свинина в тушах і півтушах. Технічні умови. Згідно з наказом № 4296 «Про затвердження Вимог щодо класифікації туш великої рогатої худоби, свиней і овець», туші свиней діляться на кілька класів залежно від їхньої маси, конституції, стану вгодованості та якості м'яса. В Україні, зазвичай, виділяють такі класи (табл. 2).

Таблиця 2. Класифікація туш свиней відповідно до очікуваного вмісту в них пісного м'яса

Класи	Пісне м'ясо, виражене як відсоток від маси туші
S	60 або більше
E	55 або більше, але менше ніж 60
U	50 або більше, але менше ніж 55
R	45 або більше, але менше ніж 50
O	40 або більше, але менше ніж 45
P	менше ніж 40

Оцінювання свинячих туш доцільно також здійснювати на основі комплексного підходу, що враховує як морфологічні, так і якісні характеристики продукції. Основні критерії класифікації наведено на рис. 2.

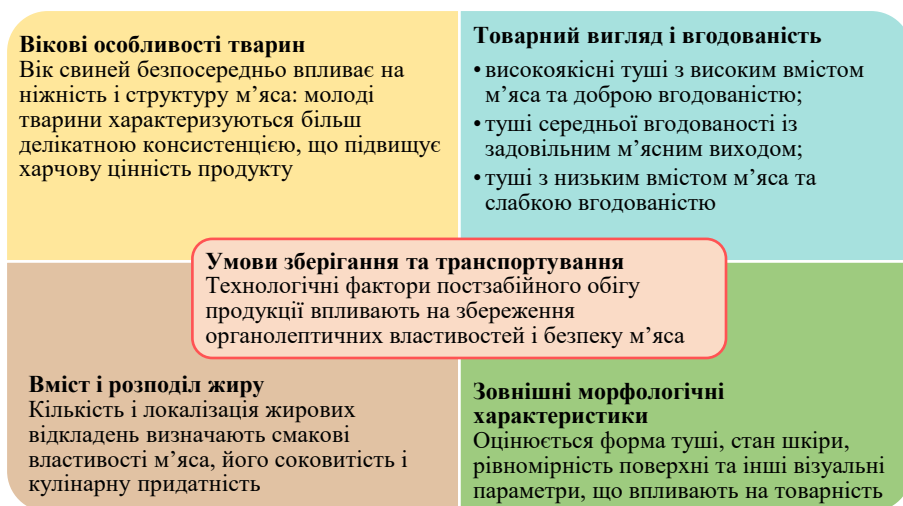


Рис. 2. Класифікація та оцінювання свинячих туш

Комплексне врахування зазначених ознак дає змогу здійснювати науково обґрунтовану класифікацію туш, що забезпечує дотримання стандартів якості, підвищує конкурентоспроможність продукції та відповідає вимогам кінцевих споживачів. Ключовою умовою є проведення оцінки кваліфікованими фахівцями, що гарантує точність класифікації й стабільну якість кінцевого продукту.

В Італії, де й досі традиційно комерціалізація свиней здійснюється за живою вагою, ані стара, ані нова класифікація ніколи не застосовувалася, за винятком деяких кооперативних забійних підприємств, які оплачували свиней за вагою піс-

ля забою. Водночас Італія, створивши ще з 1988 року передумови для застосування системи шляхом визначення національних рівнянь оцінки відсотка м'яса без жиру, перейшла на європейську класифікацію обов'язковою для виконання вимог європейських регламентів.

Попит споживачів і всіх учасників ланцюга виробництва, що працюють після етапу вирощування, орієнтований на м'ясо та м'ясопродукти, багаті на м'язову тканину, з низьким вмістом жиру та високими харчовими, органолептичними й технологічними властивостями (табл. 3).

Таблиця 3. Якісні характеристики свинини

Категорія	Показники при купівлі	Показники при споживанні / виробництві
А — харчові	- вміст білка - вміст вітамінів - вміст мінералів - калорійність	- ніжність - соковитість - смакові якості - відсутність сторонніх запахів
В — органолептичні	- колір - структура та текстура - втрата ексудату з поверхні зрізу — мармуровість	- ніжність - соковитість - смакові якості - відсутність сторонніх запахів
С — технологічні	- упаковка - форма - спосіб виготовлення - простежуваність продукту - якість	- вміст води - здатність утримувати вологу - рН - здатність до поглинання солі - вміст ненасичених жирних кислот - йодне число жиру

Ідеальна оцінка свинячої туші повинна враховувати як вміст м'яса без жиру, так і всі якісні характеристики. Однак, якщо вміст м'яса без жиру вважається важливою характеристикою у всіх європейських країнах і може бути визначений об'єктивно, точно, відтворювано, швидко й економічно на лінії забою, то якісні характеристики м'яса мають різне значення в різних країнах і серед різних учасників тваринницької (свинарство) галузі (табл. 4).

Таблиця 4. Якісні характеристики свинини, що враховуються різними учасниками свинарства та споживачами

Забійник/промисловий переробник	Переробник	Споживач
Втрата маси при охолодженні	Втрата маси під час варіння	Привабливий вигляд м'яса за споживчими характеристиками
Втрата маси при стіканні (ексудат)	Втрата маси під час дозрівання	Кількість між- та внутрішньом'язового жиру
Привабливий вигляд м'яса	Придатність до переробки в різні види ковбасних виробів Свіжий вигляд м'яса	Ніжність Соковитість
Консистенція, колір і запах жиру	Консистенція, колір і запах жиру відповідно нормативних показників	Смакові якості
Втрата маси під час варіння	Нормативні втрати	Найменші втрати

Однак ці характеристики неможливо визначити універсальним способом, оскільки на сьогодні не існує відповідних технологій. Натепер єдиним універсально визнаним параметром оцінки туші є вміст м'яса без жиру, який, у свою чергу, тісно і позитивно корелює з кількістю відбірних частин туші. Вміст м'яса туші без жиру виражається у відсотках до загальної її маси (рис. 3).

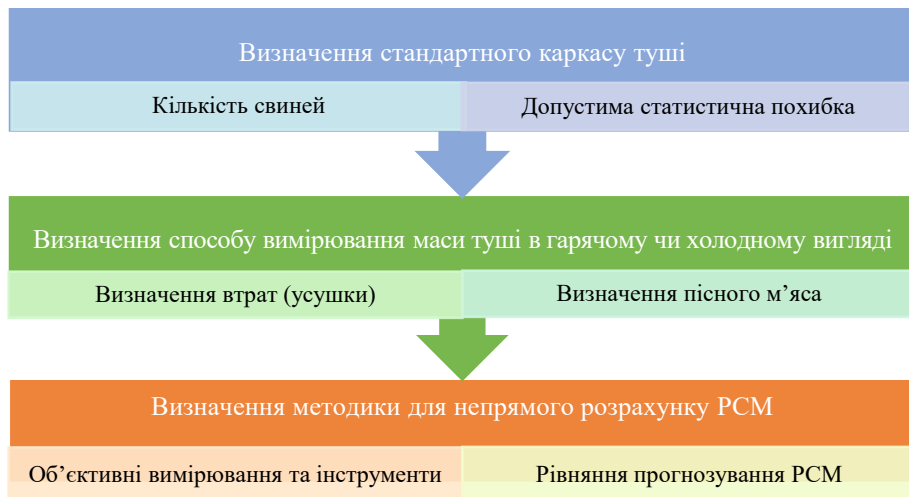


Рис. 3. Технологія оцінювання м'яса туші

Пряма оцінка вмісту пісного м'яса вимагала б розтину та хімічного аналізу всієї туші або лише однієї половини туші і, отже, не є здійсненною при комерційній оцінці, тому необхідно використовувати методи непрямой оцінки, які базуються на вимірюванні характеристик туші, що корелюють із вмістом пісного м'яса і які легко визначити на лінії забою швидко, точно та недорого.

Характеристики, що задовольняють ці вимоги, — це товщина спинного жиру, товщина та площа деяких м'язових ділянок і їхні співвідношення. Серед них товщина спинного жиру є тією характеристикою, яка найповніше відповідає всім необхідним критеріям. Її вимір можна здійснювати за допомогою ручних і автоматичних інструментів вздовж лінії розділення половин туш або збоку від неї, оскільки показано, що всі ці вимірювання негативно корелюють із відсотком пісного м'яса та позитивно — із вмістом жиру (Russo, & Benatti, 1989), як це показують прості коефіцієнти кореляції, наведені в табл. 5.

Таблиця 5. Діапазон коефіцієнтів кореляції між вимірюваннями на туші та РСМ

Показник	Місце вимірювання	Діапазон коефіцієнтів кореляції
Товщина спинного жиру	Центральна частина попереку (lombi a)	-0,60 — -0,85
	Останнє ребро (ultima costola a)	-0,60 — -0,80
	3/4 від останнього ребра, лінія 8 см (3/4 U L 8 cm b)	-0,65 — -0,85

Продовження таблиці 5

	3/4 від останнього ребра, центральна лінія 8 см (3/4 U C 8 cm c)	-0,70 — -0,85
	Центральна лінія 6 см (U C 6 cm d)	-0,70 — -0,80
Товщина м'язу LD	3/4 від останнього ребра, центральна лінія 8 см (3/4 U C 8 cm c)	0,25 — 0,50

Примітка: а — на медіанній лінії половини туші; b — на 8 см між третьою та передостанньою поперековою хребцями; c — на 8 см між третьою та передостанньою ребровою кісткою; d — на 6 см на рівні останнього ребра.

Вимірювання, проведені з бокової частини туші, мають перевагу не стільки через те, що в них, зазвичай, трохи вищі коефіцієнти кореляції з вмістом пісного м'яса, скільки тому, що, будучи виконаними автоматично за допомогою зонда, вони не піддаються сумнівам щодо маніпуляцій з боку операторів.

Для прогнозування вмісту пісного м'яса можуть використовуватися одне або кілька вимірювань товщини шпигу, проте збільшення точності при використанні декількох вимірювань, як правило, не виправдовує додаткові витрати на їх проведення.

Товщина м'язу longissimus dorsi, хоча і менш значуща, корелює позитивно з вмістом пісного м'яса і, зазвичай, використовується для підвищення точності оцінки, отриманої лише за вимірюванням товщини спинного жиру.

Для проведення вимірювань застосовують різні інструменти, принцип роботи яких ґрунтується на різних фізичних принципах, для визначення на лінії забою товщини спинного жиру та м'язу longissimus dorsi або інших об'єктивно вимірюваних характеристик туші. Це можуть бути прості лінійки, напівавтоматичні або автоматичні системи, а також складні системи, розроблені на основі високотехнологічних методів у біомедичній сфері.

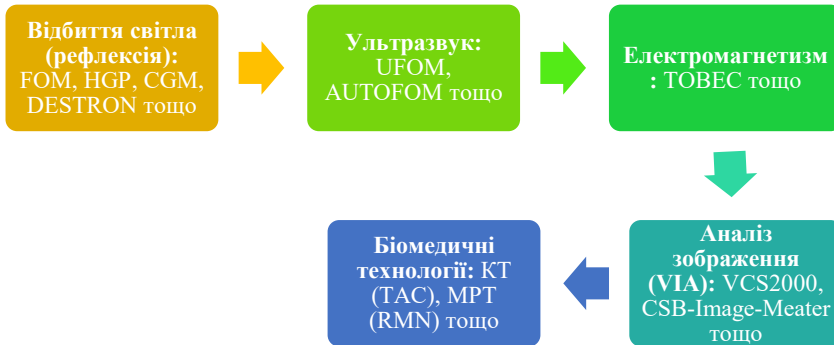


Рис. 4. Категорії інструментів, класифіковані за фізичним принципом, використаним для проведення вимірювань, необхідних для визначення PCM

На сьогодні у Німеччині (Feldhusen, Neumann-Fuhrmann, & Leitfahigkeit, 1987) доступні чотири технічно різні типи інструментів для визначення ринкової вартості:

1. Оптиелектронні пристрої: вимірювання проводяться шляхом проникнення в тушу та визначення глибини жиру та м'язів як різниці в яскравості відбитого світла.

2. Ультразвукові сканери. Цей неінвазивний метод визначає межі між тканинними компонентами за допомогою сонографії з використанням лінійного або реального сканування. Для цілей сортування вони повинні брати ту саму глибину жиру та м'язів, що й оптоелектронні пристрої (на 2-му /3-му останньому ребрі, 7 см поруч із середньою лінією). Формули оцінки для цих інструментів розраховуються за допомогою покрокової регресії. Слід зазначити, що національним калібрувальним апаратом для всіх інструментів для сортування також є ультразвуковий сканер.

3. Autofom (компанія SFK, Данія). Autofom — це ультразвуковий сканер, оснащений 16 перетворювачами, які розташовані у U-подібному масиві. Тушу необхідно виміряти на лінії забою між піччю для знешешерствування та обпалюванням. Вимірюється понад 2000 первинних показників, які перетворюються на 127 показників глибини жиру та м'язів у спинній ділянці. З даних тридцять ретельно відібрані для розрахунків на основі методу PLS.

4. Система відеозображення VCS 2000 (e, & v, Оранієнбург). VCS 2000 не допущена до сортування в Німеччині та була спеціально розроблена для цілей маркетингу на основі цінності м'яса. За допомогою трьох камер система вимірює 126 показників глибини, довжини та ширини жиру і м'язів, а також деякі кути та площі. Формули розраховуються за допомогою прямої та зворотної покрокової регресії. Зазвичай, шість або сім ознак вводяться як змінні у функції оцінки. Апарат наразі доступний лише як прототип.

Слід згадати потенціал біомедичних технологій, на базі яких були розроблені високотехнологічні системи для оцінки складу туші. До таких технологій відносяться комп'ютерна томографія (КТ, ТАС) та магнітно-резонансна томографія (МРТ, RMN). Ці системи дозволяють отримати детальні тривимірні зображення внутрішньої структури туші, визначати об'єм і розподіл жиру та м'язової тканини з високою точністю. Вони забезпечують об'єктивну і повторювану оцінку складу м'яса, проте на практиці застосовуються переважно в дослідницьких цілях через високі витрати та складність обладнання.

Кожна з цих технологій має свої переваги та обмеження. Наприклад, методи на основі ультразвуку та аналізу зображень дають змогу автоматизувати процес вимірювань, підвищити швидкість оцінки та зменшити вплив людського фактора, тоді як біомедичні методи забезпечують максимальну точність, але потребують складного обладнання і високих витрат.

Також були випробувані методи на основі ультразвуку та електромагнітної провідності. Серед них для оцінки відсотка пісного м'яса були досліджені комп'ютерна томографія (КТ, ТС) та ядерно-магнітний резонанс (МРТ, RMN). Як і очікувалося, результати були надзвичайні: залишкова стандартна девіація оцінки РСМ за допомогою цих приладів зменшувалася більш ніж удвічі порівняно з іншими системами.

Наразі їхнє практичне використання неможливе через високі витрати на придбання та експлуатацію, а також через те, що ці прилади, спроектовані для роботи у зручних медичних умовах, потребують переналаштування для використання у складних умовах м'ясокомбінатів.

Водночас комп'ютерна томографія була схвалена Європейським Союзом як метод еталонного визначення загальної маси м'язів туші, замість повного розтину, з метою розробки рівнянь оцінки РСМ для різних приладів.

Нижче коротко наведено правила, встановлені Європейською Комісією, яка затверджує національні методи оцінки, запропоновані країнами-членами (рис. 5).

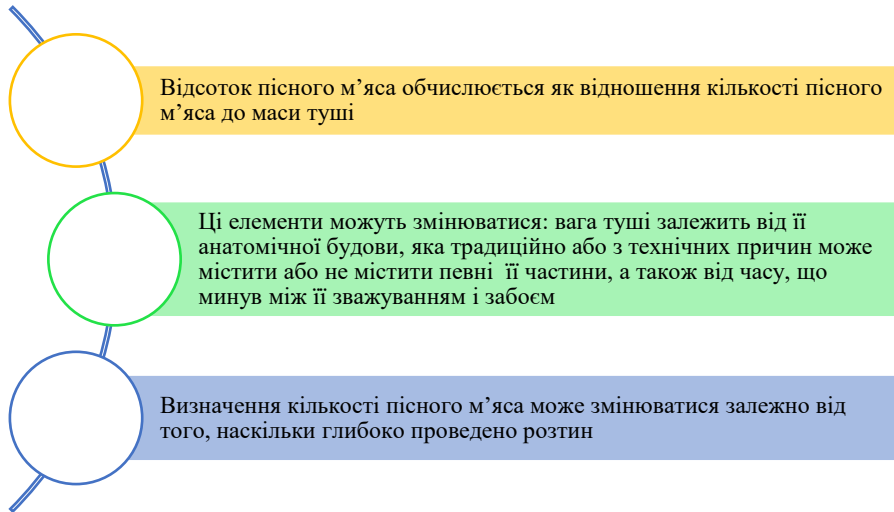


Рис. 5. Методи оцінки свинячих туш, запропоновані країнами-членами ЄС

Усі прилади для визначення оцінки РСМ повинні супроводжуватися рівнянням, яке за результатами вимірювань розраховує відсоток пісного м'яса. Для отримання цього рівняння необхідно провести експериментальне розтинання туш, дотримуючись точних методологічних вимог і встановлених меж похибок. Ці параметри можуть відрізнятися на різних світових ринках.

Щоб уніфікувати ці вимірювання, усі ці аспекти були точно визначені у регламентах ЄС (табл. 6).

Таблиця 6. Визначення стандартної туші та ваги пісного м'яса

Критерій	Опис/Вимоги
Стандартна туша	Туша забитої свині, знекровлена та випорожнена, ціла або розділена на половини, без язика, щетини, копит, статевих органів, шпигу, нирок та діафрагми
Маса туші	Фіксується протягом 45 хв після забою, зменшена на 2%
Пісне м'ясо для класифікації (EUROP)	Вага всіх червоних скелетних м'язів, які можна відокремити ножом (повний розтин). Вага червоних скелетних м'язів стегна, плеча, спини з філе та підчеревини (частковий розтин)
Експериментальні випробування	Проводяться на вибірці ≥ 120 туш, що репрезентують відповідне виробництво. Повний розтин: вага всіх червоних скелетних м'язів, які можна відокремити ножом. Частковий розтин: вага червоних м'язів стегна, плеча, спини з філе та підчеревини
Рівняння оцінки	Розробляються за допомогою визнаних статистичних методів. Допускаються лише якщо статистична похибка $< 2,5\%$ (для ЄС-класифікації)

Продовження таблиці 6

Критерій оцінки якості туші	Відсоток пісного м'яса (основний та об'єктивний критерій)
Засоби вимірювання	Різні прилади, що відрізняються: - рівнем складності; - ступенем автоматизації; - експлуатаційними можливостями; - вартістю придбання та обслуговування
Вибір приладу	Залежить від потреб та бюджету конкретного м'ясокомбінату

Таким чином, вибір методу оцінки туші залежить від конкретних потреб м'ясокомбінату, обсягу виробництва, бюджету та необхідної точності оцінки пісного м'яса (PCM).

Висновки

У сучасній системі класифікації свинячих туш важливе місце займають методи непрямой оцінки, що базуються на морфологічних характеристиках, тісно пов'язаних із вмістом пісного м'яса. До найбільш інформативних параметрів належать товщина спинного жиру, товщина та площа окремих м'язових ділянок і їхні співвідношення. Вимірювання цих показників може здійснюватися як ручними, так і автоматизованими приладами безпосередньо на лінії забою. Серед усіх ознак ключове значення має товщина спинного жиру, яка демонструє високу кореляцію з відсотком пісного м'яса та рівнем жирових відкладень. Залежно від фізичного принципу дії застосовуються різні типи обладнання: ультразвукові системи, методи аналізу зображень і біомедичні технології, що відрізняються за точністю, швидкістю оцінки та рівнем витрат.

1. Методи непрямой оцінки дають змогу забезпечити баланс між швидкістю, точністю та економічністю визначення вмісту пісного м'яса у свинячих тушах.

2. Найбільш надійним індикатором для практичного використання визнано товщину спинного жиру, що поєднує інформативність і простоту вимірювання.

3. Використання автоматизованих технологій (ультразвук, аналіз зображень) підвищує ефективність контролю, мінімізує людський фактор і прискорює процес оцінки.

4. Біомедичні методи забезпечують найвищу точність результатів, проте їх застосування обмежується високою вартістю обладнання та складністю експлуатації.

5. Остаточний вибір методу визначається виробничими потребами, масштабами переробки та бюджетними можливостями конкретного підприємства.

Література

Бірта, Г. О., Бургу, Ю. Г. (2010). Взаємозв'язок між окремими показниками якості м'яса свинини. *Вісник Полтавської державного аграрного університету*, 4, 90—92.

Ощипок І. М. (2022). Класифікаційні ознаки свинячого м'яса з різним ходом автолізу та методи усунення його нестабільної якості під час переробки. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету*, 59—65. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2022-29-08>.

Aboah, J., Lees, N. (2020). Consumers use of quality cues for meat purchase: Research trends and future pathways. *Meat Science*, 166, 108142. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108142>.

- Berg, E. P., Forrest, J. C., Fisher, J. E. (1994). Electromagnetic scanning of pork carcasses in an on-line industrial configuration *Journal of Animal Science*, 72(7), 1728—36. <https://doi.org/10.2527/1994.7271728x>.
- Branscheid, W., Dobrowolsk, A. (2000). Evaluation of market value: Comparison between different techniques applied on pork carcasses (short communication). *Archiv für Tierzucht*, 3(2), 131—137. <https://doi.org/10.5194/aab-43-131-2000>.
- Busk, H., Olsen, E. V., Brøndum, J. (1999). Determination of lean meat in pig carcasses with the Autofom classification system. *Meat Science*, 52, 307—314. [https://doi.org/10.1016/S0309-1740\(99\)00007-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1740(99)00007-8).
- Carabús, A., Sainz, R. D., Oltjen, J. W., Gispert, M., Font-i-Furnols, M. (2015). Predicting fat, lean and the weights of primal cuts for growing pigs of different genotypes and sexes using computed tomography. *J. Anim. Sci.*, 93, 1388—1397. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8697>.
- Chang, J., Jung, J., Lee, H., Chang, D., Yoon, J., Choi, M. (2011). Computed tomographic evaluation of abdominal fat in minipigs. *J. Vet. Sci.*, 12, 91—94. <https://doi.org/10.4142/jvs.2011.12.1>.
- Council Regulation (EEC) # 3220/84. (1984). *Official Journal of the EC*, 3, 97.
- Demo, P., Poltarsky, J., Fulpol, L., Lukacova, A. (1995). Instrumental prediction of some carcass parameters of pigs at a progeny testing station. *Animal production*, 4(40), 181—185.
- Feldhusen, F., Neumann-Fuhrmann, D., Wenzel, S. Die Leitfähigkeit als (1987). Parameter der Fleischbeschaffenheit. *Fleischwirtschaft*, 67(4), 455—460.
- Font i Furnols, M., Teran, F., Gispert, M. (2009). Estimation of lean meat content in pig carcasses using X-ray computed tomography and PLS regression. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 98(1), 31—37. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2009.04.009>.
- Font i Furnols, M., Gispert, M. (2009). Comparison of different devices for predicting the lean meat percentage of pig carcasses. *Meat Science*, 83, 443—446. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.06.018>.
- Engel, B., Lambooi, E., Buist, W. G., Vereijken, P. (2012). Lean meat prediction with HGP, CGM, and CSB- Image-Meater, with prediction accuracy evaluated for different proportions of gilts, boars and castrated boars in the pig populations. *Meat Science*, 90, 338—344. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2011.07.020>.
- European Community (2008). Commission regulation (EC) No 1249/2008 laying down detailed rules on the implementation of the Community scales for the classification of beef, pig and sheep carcasses and the reporting prices thereof.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. (2015). *Delving deep into rectifiers: Surpassing human level performance on imagenet classification*. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 1026—1034. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.123>.
- Marcoux, M., Pomar, C., & Fautitano, L. (2007). The relationship between different pork carcass lean yield definitions and the market carcass value. *Meat Science*, 75(1), 94—102. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2006.07.001>.
- Reichert, J. E. (2006). Possible methods of automatic on — leni determination of quality parameters when classifying and selecting carcasses and meat cuts. *Fleischwirtschaft International*, 4, 2—4.
- Russo, V., Lo Fiego, D. P., Badiani, A., Bigi, D., Fabbri, R., Bosi, P., Barchi, D., Benatti, L. (1989). Metodi di classificazione delle carcasce suine in Italia. *Suinicoltura*, 30(4), 109.
- Russo, V. (1991). Qualità totale della carne suina: valutazione, produzione e valorizzazione. Atti della Società Agraria di Lombardia, anno CXXIX. *Bullettino dell' Agricoltura, fascicolo n 2/91*, 5.
- Patton, B. S., Huff-Lonergan, E., Honeyman, M. S., Crouse, J. D., Kerr, B. J., Lonergan, S. M. (2008). Effects of deep-bedded finishing system on market pig performance, composition and pork quality. *Animal*, 2(3), 459—470. <https://doi.org/10.1017/S1751731107001292>.
- Schinckel, A. P., Wagner, J. R., Forrest, J. C., Einstein, M. E. (2009). Evaluation of the prediction of alternative measures of pork carcass composition by three optical probes. *Journal of Animal Science*, 88(2), 767—794. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-2286>.

УДК 577.112.083

COMBINATION OF DEXTRAN GELS FOR THE OBTAINING OF LACTOFERRIN FROM MILK WHEY BY GEL FILTRATION IN NATIVE CONDITIONS

V. Yukalo, <http://orcid.org/0000-0003-3553-6713>K. Datsyshyn, <http://orcid.org/0000-0002-9229-9059>D. Levin, <http://orcid.org/0009-0003-6275-6284>*Ternopil Ivan Puluj National Technical University***Key words:***Native lactoferrin**Gel filtration**Disc electrophoresis***Article history:**

Received 04.11.2025

Received in revised form

17.11.2025

Accepted 05.12.2025

Corresponding author:

V. Yukalo

E-mail:

katkostyuk3103@gmail.com

Citation: Юкало В. Г., Дацишин К. Є., Левін Д. С. (2025). Комбінація декстранових гелів для виділення лактоферину з сироватки молока гелі-фільтрацією в нативних умовах. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 216—225.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-17

ABSTRACT

Research the known and work out of new types of biological action of lactoferrin can be suppressed by partial loss of native structure during its isolation. First of all, this concerns the production of lactoferrin preparations on an industrial scale. This is especially important when it is used in baby food and pharmaceuticals. Therefore, the purpose of this study was to select a combination of Sephadexes to obtain a lactoferrin preparation from milk whey in native conditions. Fresh milk with an acidity of 180T and a control preparation of cow's milk lactoferrin were obtained at PJSC "Ternopil Dairy Plant". Gel filtration was performed on columns of a chromatographic system for liquid chromatography "Reanal" (Hungary). Sephadexes G-25, G-75, G-100 and G-150 from the company "Pharmacia" (Sweden) were used for gel filtration. The composition of protein fractions in milk whey and selected samples were determined by analytical disc electrophoresis in native conditions in polyacrylamide gel plates. As a result of single-stage gel filtration of milk whey on four types of Sephadexes, it was found that none of them allows to obtain purified lactoferrin. Gel filtration on different Sephadexes showed that the optimal combination for two-stage gel filtration is the sequential use of Sephadexes G-25 and G-150 with the separation of chromatographic peaks with lactoferrin into sectors. The preparation obtained in such way after gel filtration on Sephadex G-150 contains 37±2% of lactoferrin isolated in native conditions. In addition to lactoferrin, the preparation contains a part of immunoglobulins (Ig G1 and Ig G2), as well as lactoperoxidase. The lactoferrin preparation obtained in native conditions by a combination of gel filtration on Sephadexes G-75 and G-150 can be used for studying new types of biological action or for further purification.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-17

КОМБІНАЦІЯ ДЕКТРАНОВИХ ГЕЛІВ ДЛЯ ВИДІЛЕННЯ ЛАКТОФЕРИНУ З СИРОВАТКИ МОЛОКА ГЕЛЬ-ФІЛЬТРАЦІЄЮ В НАТИВНИХ УМОВАХ

В. Г. Юкало, <http://orcid.org/0000-0003-3553-6713>

К. Є. Дацишин, <http://orcid.org/0000-0002-9229-9059>

Д. С. Левін, <http://orcid.org/0009-0003-6275-6284>

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Дослідження відомих і відкриття нових видів біологічної дії лактоферину може гальмуватися частковою втратою нативної структури в процесі його виділення. Насамперед це стосується виробництва препаратів лактоферину у промислових масштабах. Особливо це важливо при його використанні у продуктах дитячого харчування і фармацевтичних засобах, тому мета дослідження полягала в тому, щоб підібрати комбінацію сефадексів для отримання препарату лактоферину із сироватки молока в нативних умовах. Свіже молоко кислотністю 180Т і контрольний препарат лактоферину коров'ячого молока отримували на ПрАТ «Тернопільський молокозавод». Гель-фільтрацію проводили на колонках хроматографічної системи для рідинної хроматографії «Reanal» (Угорщина). Для гель-фільтрації використовували сефадекси G-25, G-75, G-100 і G-150 фірми «Pharmacia» (Швеція). Склад білкових фракцій у сироватці молока і відібраних взірцях визначали аналітичним диск-електрофорезом в нативних умовах у пластинках поліакриламідного гелю. В результаті проведених одностадійних гель-фільтрацій сироватки молока на чотирьох видах сефадексів було встановлено, що жоден з них не дозволяє отримати очищений лактоферин. Проведення гель-фільтрації на різних сефадексах показало, що оптимальним поєднанням для двостадійної гель-фільтрації є послідовне використання сефадексів G-25 і G-150 з розділенням хроматографічних піків з лактоферином на сектори. Отриманий таким чином препарат після гель-фільтрації на сефадексі G-150 містить $37 \pm 2\%$ лактоферину, виділеного в нативних умовах. Окрім лактоферину, в препараті є частина імуноглобулінів (Ig G1 та Ig G2), а також лактопероксидаза. Препарат лактоферину, отриманий в нативних умовах комбінацією гель-фільтрації на сефадексах G-75 і G-150, може бути використаний для дослідження нових видів біологічної дії або подальшого очищення.

Ключові слова: нативний лактоферин, гель-фільтрація, диск-електрофорез.

Постановка проблеми. Лактоферин — це білок молока, який можна віднести до парафармацевтиків (Iglesias-Figueroa, Espinoza-Sanchez, Siqueiros-Cendon, & Rascon-Struz, 2019; Юкало, 2021). Основною його функцією є різні види біологічної дії на організм у постнатальний період розвитку. Натеper відомі десятки видів позитивного впливу лактоферину на фізіологічні системи організму — антибактеріальна й антивірусна дія, засвоєння іонів двовалентних металів, антиканцерогенна, імуномодуляторна й антиоксидантна дія, регуляція обміну ліпідів та ін. (Kell, Neu-

den, & Pretorius, 2020; Cutone et al., 2020; Superti, 2020; Min, 2018). Основні процеси виділення лактоферину були розроблені ще в 90-х роках минулого сторіччя і включають вплив денатуруючих факторів, які можуть призводити до часткової або повної втрати відомих і ще не досліджених видів його біологічної дії. У зв'язку з цим актуальним завданням залишається розробка методів виділення лактоферину в умовах збереження його нативної структури і, відповідно, всіх його біологічних властивостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що ефективні методи отримання білків часто супроводжуються використанням денатуруючих факторів. Це екстремальні значення температури, рН, високі концентрації солей, органічних розчинників, поверхнево-активних речовин тощо (Singh, Kumar, Chaudhary, Kumar, & Pandey, 2023). Для багатьох харчових білків це не має великого значення, оскільки денатурація за визначенням не впливає на первинну структуру молекул білків і мало змінює будову амінокислотних залишків. Тобто амінокислотний склад майже не змінюється, що становить основу біологічної цінності харчових білків (Damodaran, & Parkin, 2017). Зовсім інша ситуація з природними харчовими білками, для яких основною функцією є захисна дія і регуляторний вплив на різні фізіологічні системи організму. Ці функції тісно пов'язані з вторинною і третинною структурою білка. Лактоферин молока відноситься саме до таких білків. Незважаючи на значну кількість наукових публікацій, всі види його біологічної дії не встановлені до теперішнього часу (Iglesias-Figueroa, Espinoza-Sanchez, Siqueiros-Cendon, & Rascon-Cruz, 2020; Demir, Sarita, Bechelany, & Karav, 2025). Однією з причин цього може бути використання різних способів отримання лактоферину в промислових масштабах (Perraudin, & De Valck, 2020; Krolitzki, Schwaminger, Page, Ostertag, & Berensmeier, 2022). При цьому денатуруючий вплив можливий ще при одержанні сировини для лактоферину. Це знежирене молоко (нагрівання, пастеризація), різні види сироватки (кислота, сіль, нагрівання). Далі основним процесом є препаративна та іонообмінна хроматографія на колонах з катіонообмінниками. Тут денатурація лактоферину може відбуватись завдяки дії солі та зміні його складу під час іонного обміну. Після іонообмінної хроматографії очищення препарату проводять різними видами фільтрації і завершують отримання лактоферину його висушуванням. Усі види висушування, окрім сублімаційного, теж спричиняють денатураційні зміни. Існує великий ризик того, що отримані препарати містять в різній мірі денатурований лактоферин з частково або повністю втраченими окремими біологічними функціями (Wakabayashi, Yamauchi, & Abe, 2018).

Аналізуючи властивості молекул основних білків молока, від яких очищують лактоферин (табл. 1), можна зробити висновок, що вони, окрім ізоелектричних точок, також суттєво відрізняються молекулярними масами. Це робить можливим використання для виділення лактоферину гель-фільтрації на декстранових гелях. Основною перевагою гель-фільтрації є те, що вона мало впливає на нативну просторову структуру білків. Відносно низьку її роздільну здатність можна компенсувати повторною гель-фільтрацією, а також розділенням хроматографічних піків на сектори. Таким способом було успішно виділено окремі гомогенні фракції з білків сироватки молока (Yukalo, & Datsyshyn, 2018; Yukalo, Datsyshyn, & Storozh, 2019). Доцільним при виділенні нативного лактоферину може бути використання повторної гель-фільтрації з розділенням хроматографічних фракцій на сектори.

Таблиця 1. Вміст і властивості білків молока, адаптовано за (Farrell et al., 2004)

Білки молока	Назва показника		
	вміст у знежиреному молоці, г/л	молекулярна маса	ізоелектрична точка
α_{s1} -казеїн (α_{s1} -CN)	12—15	23615	4,44—7,76
α_{s2} -казеїн (α_{s2} -CN)	3—4	25226	—
β -казеїн (β -CN)	9—11	23983	4,83—5,07
κ -казеїн (κ -CN)	2—4	19037	5,45—5,77
β -лактоглобулін (β -CN)	2—4	18363	5,13
		18277	5,13
α -лактоглобулін (α -La)	0,6—1,7	141778	4,2—4,5
Альбумін сироватки (BSA)	0,4	66399	4,7—4,9
Імуноглобулін (Ig G1)	0,3—0,6	161000	5,5—4,9
Лактопероксидаза (LP)	0,03	80288	9,6
Лактоферин (LF)	0,02—0,1	76110	8,81

Метою дослідження є підбір комбінації сефадексів для отримання препарату лактоферину із сироватки молока в нативних умовах.

Матеріали і методи. Контрольний препарат лактоферину, а також сире молоко кислотністю 18°Т отримали з ПрАТ «Тернопільський молокозавод». Для виділення жиру з молока і осадження казеїну в ізоелектричній точці використовували центрифугу ОПН-8.

Концентрацію білків у взірцях сироватки для гель-фільтрації, у хроматографічних фракціях, препаратах лактоферину і взірцях для електрофоретичних досліджень визначали спектрофотометрично при довжині хвилі $\lambda=280$ нм. Оптичну густину вимірювали на спектрофотометрі СФ-46. Розрахунок концентрації білків сироватки проводили з використанням коефіцієнта поглинання ($D_{\text{CM}}^{1\%}$) — 12,3, а для взірців лактоферину — 9,91 (Fox, Uniacke-Lowe, McSweeney, & O'Mahony, 2015; McSweeney, & O'Mahony, 2016).

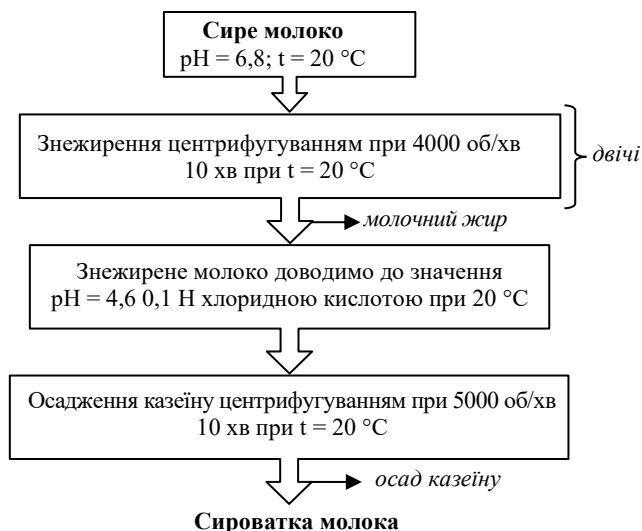
Гель-фільтрацію молочної сироватки і препаратів лактоферину для повторної гель-фільтрації проводили на колонках набору для рідинної хроматографії фірми «Reanal» (Угорщина). Для гель-фільтрації використовували сефадекси G-25 (fine), G-75 (superfine), G-100 (superfine) і G-150 (superfine) фірми «Pharmacia» (Швеція).

Для аналізу фракційного складу білків сироватки, а також відібраних зразків об'єднаних хроматографічних фракцій і препаратів лактоферину використовували аналітичний диск-електрофорез у вертикальних пластинках поліакриламідного гелю (ПАГ). Електрофорез проводили в апараті, виготовленому в лабораторії біохімії ТНТУ імені Івана Пулюя, як описано в (Yukalo, Datsyshyn, Krupa, & Storozh, 2024). Кількісну обробку електрофореграм проводили з використанням функцій зчитування графічних зображень imread.

Хроматографічні та електрофоретичні аналізи виконували у триразовій повторності. Розрахунок вмісту лактоферину в препараті після другої гель-фільтрації на сефадексах G-100 і G-150 проводили з урахуванням середньої частки встановлених електрофоретично білкових фракцій.

Результати і обговорення. На першому етапі дослідження було виділено сировину, яка містить в нативному стані практично весь лактоферин молока. Такою

сировиною є сироватка молока, отримана без впливу денатуруючих факторів. Вона подібна за складом до промислової сироватки, яка є поширеною вторинною молочною сировиною при виробництві казеїну, кисломолочних сирів, твердих і м'яких сичужних сирів. Оскільки лактоферин є стабільним при температурі від 18 °C до 60 °C (Abdou, & Elbarbary, 2016) і в діапазоні значень pH від 4,0 до 7,4 (Paulsson, Svensson, Kishore, & Naidu, 1993), то сироватку було отримано за такою схемою:



Отримана таким чином сироватка далі була використана для гель-фільтрації, а також як контроль для аналітичного диск-електрофорезу. Враховуючи широкий діапазон молекулярних мас молекул, що входять до складу молочної сироватки (від 100 до 1000000 Да) повторну гель-фільтрацію було проведено на різних типах сефадексів. На першому етапі для виділення низькомолекулярних компонентів з молекулярною масою меншою, ніж у лактоферину, було відібрано сефадекси G-25 і G-75. Результати гель-фільтрації сироватки молока на колонці з сефадексами G-25 показані на рис. 1. Хромотограма на рис. 1, а складається з двох основних піків І і ІІ. Пік І перед електрофоретичним аналізом умовно розділили на два сектори 1 і 2. Результати аналітичного диск-електрофорезу взірців об'єднаних фракцій секторів 1 і 2 показані на електрофореграмах 1 і 2 (рис. 1, б). Якісний і кількісний фракційний склад обох електрофореграм ідентичний. Зважаючи на розміщення на електрофореграмі контрольного взірця лактоферину (рис. 1, б, 3), прогнозовано можна стверджувати, що лактоферин знаходиться в обох секторах першого хромотографічного піку разом з іншими білками сироватки молока. Компоненти об'єднаних фракцій піку ІІ (сектор 3) не фіксуються в ПАГ і не проявляються на електрофореграмі.

Результати гель-фільтрації сироватки молока на сефадексі G-75 показані на рис. 2. Хромотограма теж складається з двох основних піків І і ІІ. Причому І пік асиметричний і очевидний містить всі білкові фракції. Для електрофоретичного аналізу було виділено три сектори на хромотограмі. Результати диск-електрофорезу контрольного взірця сироватки і взірців об'єднаних фракцій секторів 1 і 2 показані

на рис. 2, б. Контрольна сироватка містить всі основні білкові фракції (Lf, LP, IG, BSA, α -La, β -lg).

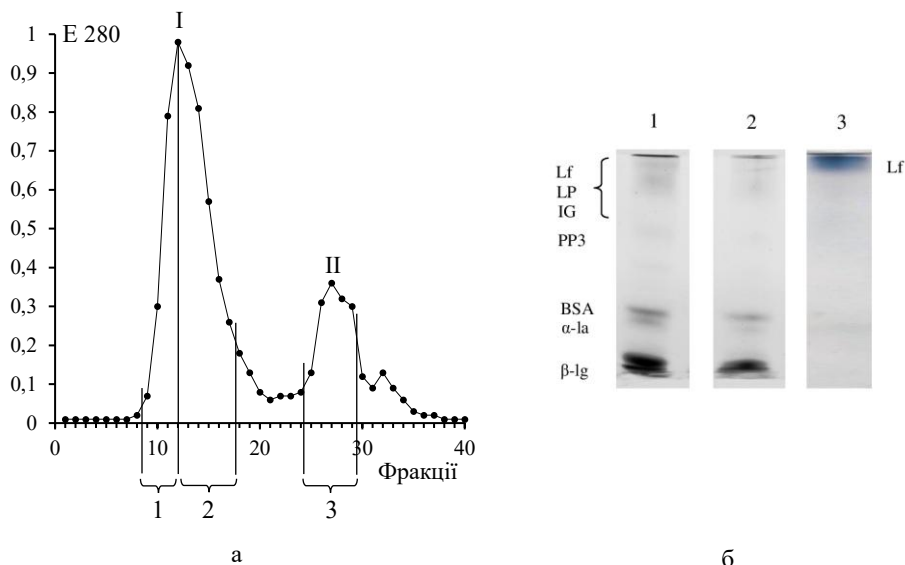


Рис. 1. Хроматограма сироватки молока (а), отримана гелі-фільтрацією на сефадексі G-25; б — електрофореграми об'єднаних фракцій секторів 1 (б, 1) і 2 (б, 2), позначених на хроматограмі (а), і контрольного взірця лактоферину (б, 3)

Білковий склад секторів 1 і 2 різний. Так сектор 1 містить всі фракції білків сироватки, а сектор 2 переважно складається з β -lg, α -La й BSA і лише слідів інших: Lf, LP та IG. Сектор 3 включає низькомолекулярні молекули (пептиди і амінокислоти), які не фіксуються в гелі.

Для повторної гелі-фільтрації на сефадексах G-100 і G-150 був відібраний взірець з об'єднаних фракцій сектора 1 першого піку після гелі-фільтрації на сефадексі G-75. Результати його гелі-фільтрації на сефадексі G-100 показані на рис. 3, а. Хроматограма теж складається з двох піків, але об'єм елюції другого піку значно менший ніж повний об'єм колонки. Це свідчить про те, що в обох піках знаходяться білки. Після розділення піків хроматограми на чотири сектори був проведений електрофоретичний аналіз об'єднаних фракцій кожного сектора. Результати електрофорезу (рис. 3, б) свідчать, що в секторі 1 знаходиться IG з масою молекули від 150000 до 1000000 Да. Сектори 2 і 3 містять IG, Lf та LP, а також сектор 3 містить сліди BSA. Четвертий сектор представлений основними білками сироватки — β -lg, α -La й BSA. В ньому відсутні високомолекулярні білки включаючи лактоферин.

Для повторної гелі-фільтрації на сефадексах G-100 і G-150 був відібраний взірець з об'єднаних фракцій сектора 1 першого піку після гелі-фільтрації на сефадексі G-75. Результати його гелі-фільтрації на сефадексі G-100 показані на рис. 3, а. Хроматограма теж складається з двох піків, але об'єм елюції другого піку значно менший ніж повний об'єм колонки. Це свідчить про те, що в обох піках знаходяться білки. Після розділення піків хроматограми на чотири сектори був

проведений електрофоретичний аналіз об'єднаних фракцій кожного сектора. Результати електрофорезу (рис. 3, б) свідчать, що в секторі 1 знаходиться ІГ з масою молекули від 150000 до 1000000 Да. Сектори 2 і 3 містять ІГ, Lf та LP, а також сектор 3 містить сліди BSA. Четвертий сектор представлений основними білками сироватки — β -Іг, α -La й BSA. В ньому відсутні високомолекулярні білки включаючи лактоферин.

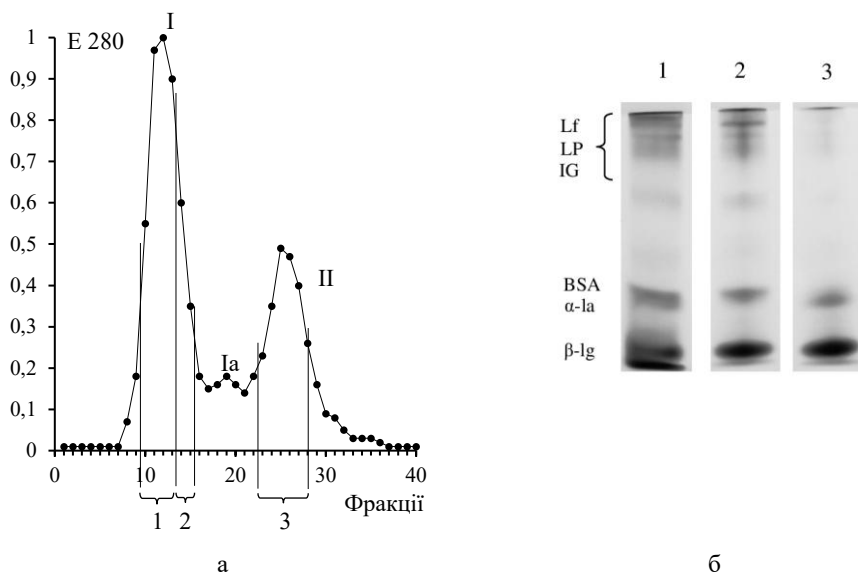


Рис. 2. Хроматограма сироватки молока (а), отримана гель-фільтрацією на сефадексі G-75; б — електрофореграми контрольної сироватки (б, 1) і об'єднаних фракцій секторів 1 (б, 2) і 2 (б, 2), позначених на хроматограмі (а)

Для повторної гель-фільтрації на сефадексах G-100 і G-150 був відібраний взірець з об'єднаних фракцій сектора 1 першого піку після гель-фільтрації на сефадексі G-75. Результати його гель-фільтрації на сефадексі G-100 показані на рис. 3, а. Хроматограма теж складається з двох піків, але об'єм елюції другого піку значно менший ніж повний об'єм колонки. Це свідчить про те, що в обох піках знаходяться білки. Після розділення піків хроматограми на чотири сектори був проведений електрофоретичний аналіз об'єднаних фракцій кожного сектора. Результати електрофорезу (рис. 3, б) свідчать, що в секторі 1 знаходиться ІГ з масою молекули від 150000 до 1000000 Да. Сектори 2 і 3 містять ІГ, Lf та LP, а також сектор 3 містить сліди BSA. Четвертий сектор представлений основними білками сироватки — β -Іг, α -La й BSA. В ньому відсутні високомолекулярні білки включаючи лактоферин.

Результати повторної гель-фільтрації на сефадексі G-150 взірця з об'єднаних фракцій сектора 1 після гель-фільтрації на сефадексі G-75 представлені на рис. 4, а. Хроматографічний профіль подібний до отриманого на сефадексі G-100. Для електрофоретичного аналізу хроматограму теж розділили на чотири сектори. Результати електрофоретичного аналізу об'єднаних фракцій кожного сектора показані

на рис. 4, б. В першому секторі — високомолекулярні імуноглобуліни, в другому — всі інші високомолекулярні фракції включаючи Lf. В секторі 3 знаходиться BSA і майже відсутні високомолекулярні білки. Четвертий сектор містить всі β -lg, α -La і сліди BSA.

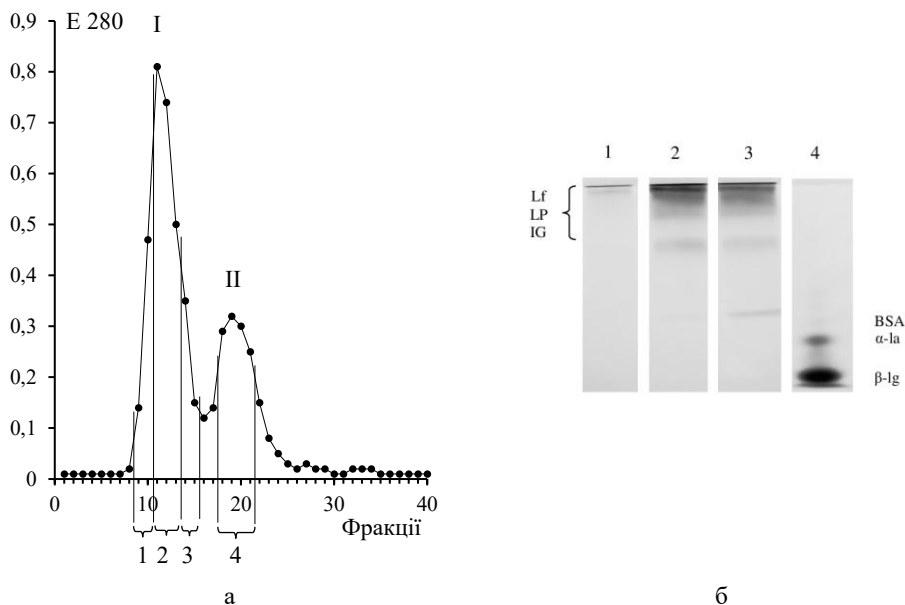


Рис. 3. а — хроматограма об'єднаних фракцій сектора 2 (рис. 2, а), отримана гель-фільтрацією на сефадексі G-100; б — електрофореграми об'єднаних фракцій секторів 1 (б, 1), 2 (б, 2), 3 (б, 3) і 4 (б, 4), позначених на хроматограмі (а)

Оскільки високомолекулярні білки IG, Lf та LP нашаровуються на електрофореграмах важко точно встановити кількість Lf у взірцях об'єднаних фракцій секторів 2 після гель-фільтрації на сефадексах G-100 і G-150.

Розрахунок показав, що у випадку сефадексу G-100 частка лактоферину в препараті становить $31 \pm 2\%$, а у випадку сефадексу G-150 — $37 \pm 2\%$. Кращі результати показує препаративна гель-фільтрація при розділенні низькомолекулярних (1000—25000 Да) фракцій казеїну і білків сироватки молока (Kang, Moon, & Lee, 2011; Fox, 2015). Для таких білків різниця у значенні молекулярних мас від 2000—3000 Да є суттєвою і дозволяє отримати препарати зі ступенем очищення від 70% і вище. Введення стадії іонообмінної хроматографії дозволяє досягнути від 85—95% вмісту лактоферину в препараті (Perraudin, & De Valck, 2020; Krolitzki et al., 2022). Проте іонообмінна хроматографія може спричинити зміну складу і часткову денатурацію лактоферину, що, відповідно, вплине на його біологічну дію. Окрім лактоферину, в препараті, отриманому повторною гель-фільтрацією на сефадексі G-100 (сектор хроматографічного піку I), основними домішками є низькомолекулярні імуноглобуліни, лактопероксидаза і альбумін сироватки крові. У випадку

повторної гель-фільтрації на сефадексі G-150 до білків домішок входять низькомолекулярні імуноглобуліни (Ig G1 — 161000 Да, Ig G2 — 150000 Да) і лактопероксидаза.

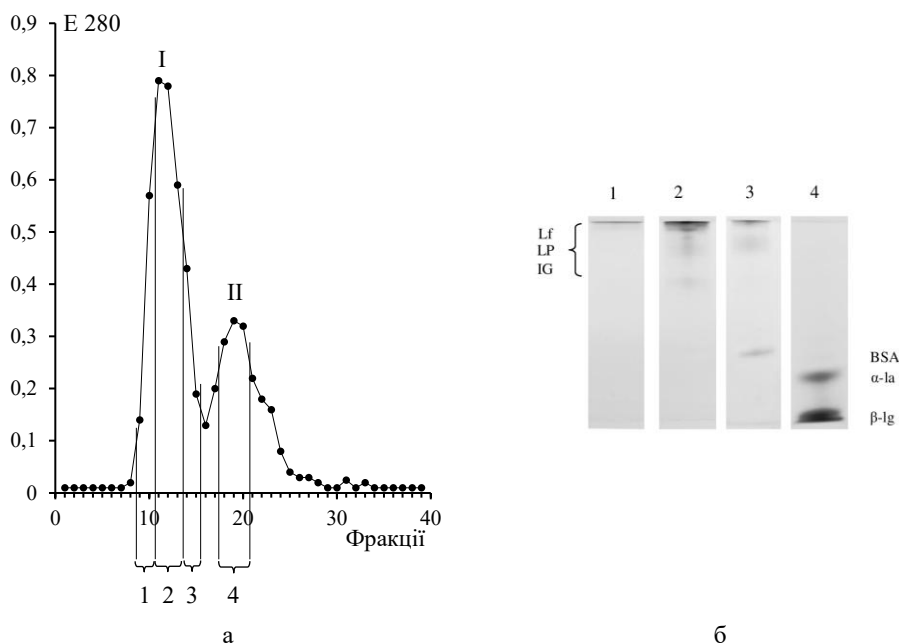


Рис. 4. а — хроматограма об'єднаних фракцій сектора 2 (рис. 2, а), отримана гель-фільтрацією на сефадексі G-150; б — електрофореграми об'єднаних фракцій секторів 1 (б, 1), 2 (б, 2), 3 (б, 3) і 4 (б, 4), позначених на хроматограмі (а)

Препарат лактоферину, отриманий в нативних умовах комбінацією гель-фільтрації на сефадексах G-75 і G-150, може бути використаний для подальшого очищення. Також його можна використати для дослідження нових видів біологічної дії, на які не впливають імуноглобуліни і лактопероксидаза.

Висновки

1. Одностадійна гель-фільтрація сироватки молока в нативних умовах на чотирьох видах сефадексів G-25, G-75, G-100 і G-150 показала, що жоден з них не дозволяє отримати очищений лактоферин. Це може бути досягнуто при повторній гель-фільтрації на різних сефадексах.

2. Оптимальним поєднанням для двостадійної гель-фільтрації є послідовне використання сефадексів G-75 і G-150. Причому в кожному випадку проводиться розділення хроматографічного піку з лактоферином на сектори. Взірець з об'єднаних хроматографічних фракцій з другого сектора після гель-фільтрації на сефадексі G-150 містить $37 \pm 2\%$ лактоферину, виділеного в нативних умовах. Окрім лактоферину, в препараті присутні частина імуноглобулінів (Ig G1 і Ig G2), а також лактопероксидаза.

Література

- Юкало, В. Г. (2021). *Біологічна активність протеїнів і пептидів молока*: монографія. Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/36801>.
- Abdou, A. M., & Elbarbary, H. A. (2016). Bioactive Lactoferrin-Derived Peptides. In I. G. Rijeka (Eds.), *Milk Proteins — From Structure to Biological Properties and Health Aspects* (pp. 157—180). Croatia: InTech. <https://doi.org/10.5772/62569>.
- Cutone, A., Rosa, L., Ianiro, G., Lepanto, M. S., Bonaccorsi di Patti, M. C., Valenti, P., & Musci, G. (2020). Lactoferrin's Anti-Cancer Properties: Safety, Selectivity, and Wide Range of Action. *Biomolecules*, 10(3), 456. <https://doi.org/10.3390/biom10030456>.
- Damodaran, S., & Parkin, K. L. (Eds.) (2017). *Fennema's food chemistry* (5th ed.). Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315372914>.
- Demir, R., Sarita, S., Bechelany, M., & Karav, S. (2025). Lactoferrin: Properties and Potential Uses in the Food Industry. *Int. J. Mol. Sci.*, 26(4), 1404. <https://doi.org/10.3390/ijms26041404>.
- Farrell, H. M., Jimenez-Flores, R., Bleck, G. T., Brown, E. M., Butler, J. E., Creamer, L. K., ..., & Swaisgood, H. E. (2004). Nomenclature of the proteins of cows' milk sixth revision. *Journal of Dairy Science*, 87(6), 1641—1674. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73319-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73319-6).
- Fox, P. F., Uniacke-Lowe, T., McSweeney, P. L. H., & O'Mahony, J. A. (2015). *Dairy Chemistry and Biochemistry* (Second Edition). New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14892-2>.
- Iglesias-Figueroa, B. F., Espinoza-Sanchez, E. A., Siqueiros-Cendon, T. S., & Rascon-Cruz, Q. (2019). Lactoferrin as a Nutraceutical Protein from Milk, an Overview. *International Dairy Journal*, 89, 37—41. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.09.004>.
- Kang, D. Y., Moon, J. M., & Lee, S. (2011). Comparison of Size-Exclusion Chromatography and Flow Field-Flow Fractionation for Separation of Whey Proteins. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 32, 1315—1320. <https://doi.org/10.5012/bkcs.2011.32.4.1315>.
- Kell, D. B., Heyden, E. L., & Pretorius, E. (2020). The Biology of Lactoferrin, an Iron-Binding Protein That Can Help Defend Against Viruses and Bacteria. *Frontiers in Immunology*, 11, 1221. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.01221>.
- Krolitzki, E., Schwaminger, S. P., Pagel, M., Ostertag, F., & Berensmeier, S. (2022). Current practices with commercial scale bovine lactoferrin production and alternative approaches. *International Dairy Journal*, 126, 105263. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105263>.
- McSweeney, P. L. H., & O'Mahony, J. A. (Eds.). (2016). *Advanced Dairy Chemistry. Volume 1B: Proteins: Applied Aspects*. USA: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2800-2>.
- Min, Q. Q., Qin, L. Q., Sun, Z. Z., Zuo, W. T., Zhao, L., & Xu, J. Y. (2018). Effects of Metformin Combined with Lactoferrin on Lipid Accumulation and Metabolism in Mice Fed with High-Fat Diet. *Nutrients*, 10(11), 1628. <https://doi.org/10.3390/nu10111628>.
- Paulsson, M. A., Svensson, U., Kishore, A. R., & Naidu, A. S. (1993). Thermal behavior of bovine lactoferrin in water and its relation to bacterial interaction and antibacterial activity. *Journal of Dairy Science*, 76, 3711—3720. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77713-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77713-9).
- Perraudin, J.-P., & De Valck, L. (2020). Lactoferrin Production from Bovine Milk or Cheese Whey. *Journal of Engineering and Applied Sciences Technology*, 2(1), 1—9. [http://dx.doi.org/10.47363/JEAST/2020\(2\)103](http://dx.doi.org/10.47363/JEAST/2020(2)103).
- Singh, A., Kumar, K., Chaudhary, D. P., Kumar, N., & Pandey, D. (2023). Protein purification: Basic principles and techniques. In Bhatt, A. K., Bhatia, R. K., & Bhalla, T. Ch. (Eds.). *Basic Biotechniques for Bioprocess and Bioentrepreneurship* (pp. 165—171). UK: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816109-8.00009-X>.
- Superti, F. (2020). Lactoferrin from Bovine Milk: A Protective Companion for Life. *Nutrients*, 12(9), 2562. <https://doi.org/10.3390/nu12092562>.
- Yukalo, V. G., & Datsyshyn, K. Ye. (2018). Gel filtration of cow milk serum proteins. *Food science and technology*, 12(4), 72—78. <https://doi.org/10.15673/fst.v12i4.1183>.
- Yukalo, V., Datsyshyn, K., & Storozh, L. (2019). Obtaining of β -lactoglobulin by gel filtration of cow milk whey. *EUREKA: Life Sciences*, 2, 33—39. <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2019.00859>.
- Yukalo, V., Datsyshyn, K., Krupa, O., & Storozh, L. (2024). Adaptation of Stadler's apparatus for electrophoresis of main milk proteins. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (11 (127)), 73—80. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.296753>.
- Wakabayashi, H., Yamauchi, K., Abe, F. (2018). Quality control of commercial bovine lactoferrin. *BioMetals*, 31, 313—319. <https://doi.org/10.1007/s10534-018-0098-2>.

УДК 634.8:631.53.01:634.2:613.2

NATURAL FOOD SUPPLEMENTS FROM GRAPE SEEDS AND STONE FRUIT KERNELS

Ye. Kotliar, <http://orcid.org/0000-0002-2173-8018>

B. Iegorov, <http://orcid.org/0000-0001-7526-0315>

Odesa National University of Technology

Key words:

Food additives

Seeds

Kernels

Cake

Dyes

Article history:

Received 11.11.2025

Received in revised form
28.11.2025

Accepted 15.12.2025

Corresponding author:

Ye. Kotliar

E-mail:

yevhenii11@ukr.net

Citation: Котляр Є. О., Ігоров Б. В. (2025). Натуральні харчові добавки з виноградного насіння та ядер кісточкових фруктів. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 226—246.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-18

ABSTRACT

One of the problems nowadays is the development of new domestic technologies for special-purpose food products aimed at protecting and preserving human health. Modern scientific experience in the field of special nutrition indicates that regular human consumption of compounds that reduce the level of neutral fat in the blood prevents the occurrence of diseases associated with atherosclerosis: ischemic heart disease, myocardial infarction, hyperlipidemia and obesity. The most rational approach to creating special fat products is the design of disperse systems, namely food additives containing various physiologically active ingredients, the composition of which provides the specified properties of food products.

The article contains a literature search on the use of cake and meal as food additives obtained during the processing of grape seeds, stone fruit kernels: apricot, cherry, peach and plum at oil and fat enterprises. The impact of these food additives on human health, nutraceuticals and functional (healthy) foods as a factor in the health effects of the human body was analyzed.

The results obtained are quite positive and encouraging, as defatted grape flour is already used on the world market as a food additive or as an ingredient that enriches healthy food. Its most common use is the enrichment of grain flour, bakery products, snacks to reduce the starch and sugar content in finished products, providing them with antioxidants, polyphenols and minerals.

Apricot, peach, cherry and plum fiber also has a unique composition and beneficial properties for health. Dietary supplements made from cake and meal obtained from the processing of grape seeds, stone fruit kernels: apricot, cherry, peach and plum are widely used in folk and traditional medicine for the prevention and treatment of many diseases. A special benefit of apricot kernel cake is its ability to fight cancer cells. This property is provided by the presence of vitamin B₁₇ in apricot kernels.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-18

НАТУРАЛЬНІ ХАРЧОВІ ДОБАВКИ З ВИНОГРАДНОГО НАСІННЯ ТА ЯДЕР КІСТОЧКОВИХ ФРУКТІВ

Є. О. Котляр, <http://orcid.org/0000-0002-2173-8018>

Б. В. Єгоров, <http://orcid.org/0000-0001-7526-0315>

Одеський національний технологічний університет

Однією з проблем нашого часу є розроблення нових вітчизняних технологій харчових продуктів спеціального призначення, спрямованих на захист і збереження здоров'я людини. Сучасний науковий досвід у сфері спеціального харчування свідчить про те, що регулярне вживання людиною в їжу сполук, які знижують рівень нейтрального жиру в крові, запобігає виникненню хвороб, пов'язаних з атеросклерозом: ішемічної хвороби серця, інфаркту міокарда, гіперліпідемії та ожиріння. Найбільш раціональний підхід до створення спеціальних жиркових продуктів — конструювання дисперсних систем, зокрема харчових добавок, що містять різноманітні фізіологічно активні інгредієнти, склад яких забезпечує задані властивості продуктам харчування.

У статті узагальнено інформацію щодо використання макух і шротів як харчових добавок, одержаних при переробці виноградного насіння, ядер кісточкових фруктів: абрикосових, вишневих, персикових і сливових на олійно-жирових підприємствах. Проаналізовано вплив дії цих харчових добавок на здоров'я людини, ну-трицевтика та функціональні (здорові) харчові продукти як чинник оздоровчої дії організму людини.

Отримані досить позитивні та обнадійливі результати, що знежирене виноградне борошно вже використовується на світовому ринку як харчова добавка або як інгредієнт, що збагачує здорову їжу. Найпоширенішим використанням його є збагачення зернового борошна, хлібобулочних виробів, снєків для зменшення вмісту крохмалю та цукру в готових продуктах, забезпечення їх антиоксидантами, поліфенолами і мінералами.

Абрикосова, персикова, вишнева та сливова клітковина також володіє унікальним складом і корисними властивостями для зміцнення здоров'я. Харчові добавки, виготовлені з макух і шротів, одержаних при переробці виноградного насіння, ядер кісточкових фруктів (абрикосових, вишневих, персикових та сливових) широко використовуються в народній і традиційній медицині для профілактики та лікування багатьох хвороб. Особлива користь макухи з ядер абрикосових кісточок, яка полягає в її здатності боротися з раковими клітинами. Ця властивість забезпечується за рахунок наявності в ядрах кісточок абрикоса вітаміну В₁₇.

Ключові слова: харчові добавки, насіння, ядра, макуха, барвники.

Постановка проблеми. Сучасне суспільство занурене у зміну концепції харчування і населення вимагає харчових продуктів, які мають додаткову цінність, надаючи щось більше, ніж необхідні поживні речовини та задоволення голоду. Переконливі докази підтверджують важливість харчування для здоров'я людини,

оскільки нездорові харчові звички є одним із численних факторів ризику хронічних захворювань, що є величезною проблемою, яка виникає в розвинених країнах (Domínguez Díaz, Fernández-Ruiz, & Cámara, 2020; Da Costa, 2017). Функціональні продукти, такі як функціональні продукти харчування, харчові добавки та нутрицевтики, відповідають цим вимогам, оскільки вони призначені для покращення якості життя шляхом запобігання захворюванням, пов'язаним з харчуванням. Незважаючи на те, що між цими поняттями існують значні відмінності, споживачі зазвичай плутають їх і використовують як взаємозамінні. У більшості випадків спеціальних правил не існує і вони залежать від характеру кожного продукту (Santini, & Novellino, 2018; Kuster-Boluda, & Vidal-Capilla, 2017).

Усе частіше визнається, що більшість хронічних захворювань, які викликають занепокоєння сьогодні, мають багатфакторне походження. Для боротьби з такими захворюваннями та несприятливими станами здоров'я підхід до лікування, за якого ліки та харчування доповнюють одне одного, може виявитися найуспішнішим. У сфері харчування, окрім дієтичних режимів (пов'язаних із захворюваннями), на ринок виходить все більше функціональних продуктів харчування та дієтичних добавок, кожна з яких має власну заяву про користь для здоров'я. Ці харчові продукти вважаються такими, що знаходяться між традиційними продуктами харчування та ліками на так званому «інтерфейсі фармацевтики та харчування». Використання функціональних продуктів харчування або дієтичних добавок може запропонувати можливості для зниження факторів ризику для здоров'я та ризику захворювань як у вигляді монотерапії, так і в поєднанні з рецептурними препаратами. Сучасна медицина рекомендує частіше використовувати для порівняння економічної ефективності та співвідношення користі та ризику ліків, функціональні продукти харчування та дієтичні добавки (Eussen et al., 2011).

Однак натеper недостатньо науково обґрунтованих підходів розробки технологій спеціальних жирових продуктів, які мають лікувально-профілактичні властивості. Розв'язання цієї проблеми — створення теоретично обґрунтованих, ефективних способів виробництва олійно-жирових продуктів спеціального призначення, зокрема харчових добавок і медичних препаратів на їх основі.

Узагальнюючи вищевикладене, можна стверджувати, що розробка комплексних технологій виробництва харчових продуктів і добавок на основі вторинних ресурсів переробки винограду та кісточкових фруктів є актуальними щодо створення харчових продуктів спеціального призначення, спрямованих на захист і збереження здоров'я людини, є реальним вкладом у вирішення національної програми оздоровлення населення у післявоєнні роки та й, власне, під час війни, що й визначає актуальність обраної теми досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нутрацевтики та функціональні продукти харчування були широко досліджені в останні роки, особливо відповідно до розвитку харчової хімії/біохімії, основних аналітичних методів і підходів, а також їхньої клінічної значущості (Yeung, Mocan, & Atanasov, 2018; Belwal et al., 2018). Термін «нутрицевтик» був введений Стівеном ДеФелісом, головою та засновником Фонду інновацій у медицині, і визначається як їжа або частина їжі, що має медичні або оздоровчі переваги, включаючи профілактику та лікування захворювань. Термін «функціональна їжа» звучить більш загально, але історію нутрицевтиків/функціональних продуктів можна датувати, наприклад, кінцем 1960-х років,

коли було виявлено, що поліненасичені жирні кислоти можуть контролювати рівень холестерину в крові (Keys, Anderson, & Grande, 1965). Ця галузь останнім часом значно розширилася завдяки тому, що біоактивні натуральні продукти, які входять до складу кількох натуральних продуктів, мають фармакологічні ефекти і тому практично додають «функціональності» продуктам.

Нагальне питання прогнати зростаюче населення світу створило потребу в розширенні виробництва продуктів харчування, які мають бути дешевшими, але водночас відповідати високим стандартам якості. Смак, зовнішній вигляд, текстура та мікробіологічна безпека повинні зберігатися в харчовому продукті протягом максимально тривалого періоду часу. Хоча у сфері харчових добавок досягнуто значних покращень, деякі з них все ще викликають суперечки. Відсутність єдності у світовому законодавстві щодо добавок, а також суперечливі результати багатьох досліджень сприяють цій суперечці.

Науковці з Іспанії та Португалії проаналізували з точки зору безпеки та токсичності найважливіші консерванти, харчові добавки, барвники, ароматизатори, текстури, затвори та різні агенти. Натуральні добавки та екстракти, які викликають інтерес через зміни у споживчих звичках, також оцінили з точки зору їхньої користі для здоров'я та комбінованого ефекту. Коротко розглянули технології виготовлення їстівного покриття та плівки, які допомогли подолати деякі недоліки добавок. Вони узагальнили майбутні тенденції, такі як наноінкапсуляція та розробка «розумних» добавок та упаковок, специфічні вакцини від непереносимості добавок, виробництво добавок і технології рекомбінантної ДНК (Carocho, Barreiro, Morales, Ferreira, & Gomez, 2014).

Загальновідомо, що агропродовольчий сектор виробляє велику кількість целюлозних побічних продуктів. Для вирішення проблеми кліматичної надзвичайної ситуації та зменшення впливу на навколишнє середовище, агропромислові відходи від механічних, хімічних або біологічних процесів можуть бути використані для нових продуктів і застосувань. Ці заходи з відновлення та покращення є основою циркулярної економіки, спрямованої на суспільство «нульових відходів», що повністю відповідає Порядку денному на 2030 рік. У зв'язку з цим побічні продукти переробки фруктів, у тому числі і кісточкових, зазвичай становлять понад 50% свіжого продукту, і ці відходи часто мають вищий вміст поживних і функціональних речовин, ніж самі вихідні фрукти. Порівняно з цією тенденцією, виробництво вина не є винятком, оскільки відходи, цілі вичавки, становлять близько 50% у свіжому вигляді (Torres-Leon et al., 2018; Ayala et al., 2011; Bordiga, Traviglia, & Locatelli, 2019).

За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (ФАО), світове виробництво винограду у 2020 році становило 78 мільйонів тон, з яких приблизно 71% було використано для виноробства (www.FAO.org). Більше винограду переробляється в Європі — понад 23 мільйони тон на рік. Виробництво виноградного соку призводить до утворення великої кількості важливих побічних продуктів та органічних залишків, включаючи вичавки, насіння, стебла, дріжджі й обрізки, які недостатньо цінуються як високоприбуткові відходи. Лише невелика кількість цієї біомаси використовується як компост для добрива, корм для тварин або для виробництва інших продуктів. Серед них виноградне насіння має більше при-

кладне значення, оскільки з нього видобувається олія, яка цінується як у косметичному, так і в харчовому секторах (Zúñiga-Muro et al., 2020; Mandic, Dilas, Cetkovic, Canadanovic-Brunet, & Tumbas, 2008; Marin et al., 2020). За своїм складом виноградне насіння являє собою особливо складні відходи: вони містять деякі цінні речовини, головним чином фенольні сполуки (тобто флавоноїди) та рослинну олію, а також натуральні волокна, білки, вуглеводи та інші мікрокомпоненти. Флавоноїди, які є ізольованими неомилювальними хімічними речовинами, відіграють важливу роль у пригніченні канцерогенезу, мутагенезу та серцево-судинних захворювань, а також проявляють активність проти виразкової хвороби та кількох шкірних захворювань, таких як акне та дерматит. Хіміопрофілактична та протиракова ефективність виноградного насіння призвела до поширення оздоровчих і дієтичних добавок у формі капсул або таблеток. Фенольні сполуки не є особливо розчинними в ліпідах за температури процесу, необхідної для отримання олії з виноградного насіння (Yilmaz, & Toledo, 2004; Kaur, Agarwal, & Agarwal, 2009). Тому, незважаючи на високий вміст фенолів у виноградному насінні, було встановлено, що лише незначна частина цих важливих антиоксидантів переходить у віджату олію. Крім того, вихід цього процесу особливо низький (в діапазоні 100 г олії/кг насіння), тому велика кількість обробленого насіння залишається втраченою. У цьому контексті було досліджено цю підфракцію відходів, знежирене виноградне насіння, з думкою, що воно може стати кінцевим відходом через його численні залишкові фітосполуки (Shi et al., 2003; Salem et al., 2022).

Мета дослідження: узагальнити інформацію щодо харчових добавок з виноградного насіння та ядер кісточкових фруктів, проаналізувати їх дію на здоров'я людини та можливість застосування в харчових продуктах.

Матеріали і методи. Огляд сформовано на основі опрацювання наукових публікацій, у яких висвітлюються питання використання макух і шротів як харчових добавок, одержаних при переробці виноградного насіння, ядер кісточкових фруктів: абрикосових, вишневих, персикових і сливових на олійно-жирових підприємствах. Пошук джерел здійснювався у міжнародних базах даних Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink і Google Scholar за ключовими словами. Виноградне насіння, ядра кісточкових фруктів: абрикосових, вишневих, персикових, сливових та макухи і шроти, одержані при їх переробці на олійно-жирових підприємствах, для виробництва харчових добавок.

Результати і обговорення. У літературі описані деякі дослідження, що стосуються термогравіметричного аналізу в поєднанні з аналізом виділених газів (TGA-MS-EGA) виноградного насіння. Однак немає жодних доказів щодо термічного розкладу та протилітичної поведінки лігноцелюлозної матриці (тобто зразка DGS). Оскільки вона містить велику кількість цінних органічних складових та високий вміст енергії, її перетворення на відновлювану енергію може бути важливою галуззю для дослідження. Використання цінної біомаси як джерела енергії далеко від процесів розкладу та ферментації, типових для органічних відходів, є досить суперечливим питанням, оскільки можна було б шукати рішення для її вигідного впровадження в ланцюг постачання продуктів харчування людини. З іншого боку, DGS має величезний потенціал, оскільки це відходи, які не знаходять подальшого використання в харчовій промисловості. Тому детальне дослідження

її термічної поведінки, включаючи характеристику газів, що виділяються в результаті горіння, може надати цінну інформацію про склад матриці, зокрема, шляхом оцінки вмісту геміцелюлози, целюлози та лігніну.

Знежирені зразки виноградного насіння були надані компанією з виробництва виноградної олії Randi Group (Фаенца, Італія). Ця компанія повністю використовує вичавки, які є відправною точкою для отримання різних побічних продуктів. Їх промивають гарячою водою для отримання спиртової рідини. Остання надходить на дистиляційну установку, де її концентрують приблизно до 96% етанолу. Цей продукт продається, як сирий спирт для промислового використання, або ж він може пройти другу фазу дистиляції та «очищення» та перетворитися на харчовий етиловий спирт. Спиртова рідина відокремлюється від виннокам'яної складової, яка надходить на завод з виробництва тартрату кальцію, а потім на завод з виробництва винної кислоти. Відпрацьовані вичавки, позбавлені спиртової та виннокам'яної складових, просіюють для вилучення насіння. Потім останні сушать та пресують для вилучення сирої олії. Відходи цього процесу використовуються як паливо в когенераційних установках та для виробництва гранул з виноградного насіння. Потім сира олія надходить у рафінувальний завод, де за допомогою виключно фізичних і механічних процесів вона перетворюється на винограду олію. Важливо зазначити, що виноградне насіння не піддається попередньому промиванню. З цього випливає, що ці відходи можуть містити залишкові сліди молекул, які високо присутні у вичавках, таких як цукри, амінокислоти та органічні кислоти. Серед різних маніпуляцій, яким піддається матриця, термічна обробка сушінням, безумовно, призводить до зміни її складу та легкої фракції (Makris, Boskou, & Andrikopoulos, 2007; Brebu, Yanik, Uysal, & Vasile, 2014).

Знежирене виноградне борошно вже використовується на світовому ринку як харчова добавка або як інгредієнт, що збагачує здорову їжу. Найпоширенішим використанням є збагачення зернового борошна, хлібобулочних виробів, снєків для зменшення вмісту крохмалю та цукру в готових продуктах, забезпечення їх антиоксидантами, поліфенолами і мінералами. Таким чином, хлібобулочні вироби, що містять це борошно, отримують позначку «низькокалорійної їжі» завдяки значній присутності неперетравлюваної клітковини, тому головною метою цього дослідження було отримання детальної інформації про хімічний склад DGS для оцінки його можливого використання в промислових секторах, відмінних від харчової та кормової промисловості, таких як косметична та фармацевтична. Фактично ця матриця все ще мало вивчена, тоді як, з іншого боку, вона має величезний потенціал і тому заслуговує на більшу увагу (D'Eusania, Malferrari, Marchetti, Roncaglia, & Tassi, 2023).

Деякі дослідження складу DGS показали, що ця біомаса зовсім не є побічним продуктом відходів, який слід видаляти з навколишнього середовища як компост або паливо для виробництва біоенергії. Останні способи застосування, безумовно, відповідають принципам циркулярної економіки. Однак можуть існувати альтернативні способи застосування та методи його утилізації. DGS може бути дуже корисною харчовою добавкою, оскільки вона є цінним джерелом багатьох різних поживних речовин, здатних покращити здоров'я людини та сприяти поліпшенню здоров'я тварин. Проксимальний аналіз виявив значний вміст білка, тоді як за-

лишковий вміст ліпідів після екстракції олії був надзвичайно низьким. Ці дані свідчать про великий потенціал як низькожирового, так і високобілкового інгредієнта для харчових продуктів і кормів. Крім того, DGS є чудовим джерелом металевих макроелементів і незамінних мікроелементів. Наявність дуже малої кількості токсичних важких металів не слід вважати небезпечною для здоров'я людини, враховуючи їх низьку концентрацію згідно з міжнародними нормами (Gomes et al., 2019; Gollücke, 2010).

Науковці із Саудівської Аравії та Єгипту дослідили біологічну активність побічних продуктів виноградного насіння та їх потенційне використання як природних джерел харчових добавок у виробництві хліба Баладі. Це дослідження має на меті виробництво хліба, збагаченого харчовими волокнами, мінералами та фенольними сполуками, шляхом додавання порошку виноградного насіння на різних рівнях (5%, 10% та 15% як часткова заміна пшеничного борошна). На основі одержаних результатів рекомендується пшеничне борошно замінювати до 10% порошком із виноградного насіння при виробництві збагаченого хліба Баладі за задовільними фізико-хімічними та сенсорними характеристиками і високою антиоксидантною активністю (Elkatry, Ahmed, El-Beltagi, Mohamed, & Eshak, 2022).

Вивчали потенційне використання борошна з виноградного насіння у хлібопекарській промисловості вчені з: Румунії (Oprea, Popa, Apostol, & Gaceu, 2022); Чехії (Antonic et al., 2021; CIIA Rosales Soto, Brown, & Ross, 2012).

Дослідники з Узбекистану досліджували насіння винограду як джерело харчових добавок. Запропоновано комплексну технологію переробки виноградного насіння, яка дозволяє одночасно виробляти виноградну олію та сухий екстракт виноградного насіння, що містить проантоціанідини. Також було виділено сухий екстракт з виноградного шроту після надкритичної флюїдної екстракції, створено технологію комплексної переробки виноградного насіння для отримання олії та сухого екстракту, що містить проантоціанідини (Саноев, Хажибаєв, Халилов, & Сагдуллаєв, 2020).

Виноградний шрот — це залишок виноградного насіння після екстракції олії. Флавоноїди представляють переважний клас поліфенолів, що містяться у виноградному шроті, включаючи галову кислоту, катехін, епікатехін, галокатехін, епігалокатехін та проціанідини (Viveros et al., 2011). Ці сполуки викликали великий інтерес у харчовій промисловості завдяки своїм перевагам і дією: омолоджувальною, протизапальною, протиконцерогенною, антимутогенною, противиразковою, антиатерогенною та антимікробною, а також як інгібітори окислення ліпопротеїнів низької щільності у людини (Jara-Palacios et al., 2015).

Включення промислових побічних продуктів у раціон тварин є економічно та екологічно вигідною практикою для виробництва тваринницької продукції. Основними обмеженнями використання шроту з виноградного насіння у кормах для одношлункових тварин є високий рівень фракції лігніфікованих клітинних стінок і високий вміст танинів. Однак дослідження *in vivo* та *in vitro*, проведені протягом останніх кількох років, показали корисний вплив введення біологічно активних сполук виноградного насіння завдяки їхній антиоксидантній та антимікробній активності (Ky, & Teissedre, 2015).

Виноградне насіння продемонструвало важливі антиоксидантні властивості завдяки високому вмісту поліфенолів. Харчові поліфеноли є однією з найважливіших груп природних антиоксидантів, що містяться в раціоні людини й тварин, і їхня антиоксидантна активність базується не лише на прямій реакції з ROS, але й на агоністичній активації клітинних сигнальних шляхів, що беруть участь в оксидативному стресі (Brenes, Viveros, Chamorro, & Arija, 2016).

Оскільки оксидативний стрес відіграє важливу роль у механізмі токсичності AFB1, деякі антиоксидантні сполуки, присутні у шроті виноградного насіння, можуть бути корисними для запобігання або принаймні зменшення несприятливих наслідків хронічної токсичності AFB1 у тварин. Деякі дослідження показали, що флавоноїди, такі як флавон, флаванон і тангеретин, можуть діяти як антиініціатори гепатокарциногенезу, індукованого AFB1, шляхом підвищення активності ферментів, що беруть участь у детоксикації AFB1 (глутатіон-S-трансфераза, UDP-глюкуронілтрансфераза), збільшення утворення кон'югатів AFB1-глутатіон та пригнічення утворення аддуктів AFB1-ДНК. Також полігідроксильовані флавоноїди та фенольні кислоти можуть модулювати хімічні процеси (Xu et al., 2014).

Дослідники із Румунії вивчали вплив дієтичного шроту з виноградного насіння на здорову та уражену афлатоксин B1 мікробіоту свиней після відлучення. Механізми дії афлатоксину B1 та виноградного шроту, які призводять до змін у мікробіоті товстого кишечника, невідомі та потребують подальших досліджень (Grosu, Pistol, Taranu, & Marin, 2019).

Вплив включення шроту з виноградного насіння у раціон інших тварин на травлення та продуктивність також досліджували науковці з: Іспанії (García, Nicodemus, Carabano, & De Blass, 2002); Португалії (Câmara, et al., 2020); Китаю (Xu et al., 2022; Wei et al., 2022); Італії (Maggiolino et al., 2022).

Виноградні вичавки багаті біоактивними фітохімічними речовинами та харчовими волокнами (DF). DFs — це багата фенолом матриця DF і є дієтичною добавкою з перевагами для здоров'я людини. У результаті підвищеної уваги до стійкості побічних продуктів виноробства було докладено зусиль для використання виноградних вичавок у різних біоіндустріях. Крім того, обговорюється біологічна активність DF, така як протиракова активність, антибактеріальна активність, протизапальна активність, антиоксидантна активність, покращення здоров'я шлунково-кишкового тракту, антиапоптозна активність, запобігання серцево-судинним захворюванням, антигіперхолестеринемічна активність. Нарешті, також узагальнено можливі застосування та майбутні перспективи DF виноградних вичавок у різних сферах (Zhu, Du, Zheng, & Li, 2015).

Функціоналізація харчових продуктів — це постійно зростаючий ринок, який потребує нових біоактивних інгредієнтів, які можуть бути використані харчовою промисловістю для розробки інноваційних функціональних продуктів з науково обґрунтованими заявами. У зв'язку з цим останніми роками велика увага приділяється природним сполукам і пов'язаним з ними біоактивності. Однак природні ресурси обмежені, і необхідно шукати нові альтернативи для підтримки постійно зростаючих потреб харчової промисловості в інгредієнтах і добавках (Faustino et al., 2022).

План дій Європейського Союзу (ЄС) щодо циркулярної економіки та зменшення харчових відходів включає стратегічний підхід, заснований на скороченні, повторному використанні, відновленні та переробці матеріалів та енергії, що підвищує цінність і, отже, термін корисного використання продуктів, матеріалів та ресурсів в економіці. Повторне використання побічних продуктів агропромислової сфери може бути відновлюваним джерелом для деяких уже використовуваних харчових добавок або навіть створювати нові інгредієнти з доданою вартістю з функціональними сполуками та властивостями, що принесе користь усій продовольчій системі (Chen, & Xia, 2024; Szűcs, & Bánáti, 2013; Saltmarsh, 2015). Наприклад, побічні продукти винограду та кісточкових фруктів містять полісахариди, органічні кислоти, білки та інші сполуки, які без додаткових виробничих витрат та зі зменшеними промисловими витратами роблять їх багатим джерелом природних сполук, які потенційно можуть бути застосовані в харчовій промисловості як джерела харчових добавок (Farang, Bahaa Eldin, & Khalifa, 2022; Mateus et al., 2023; Lara et al., 2020).

Крім того, ці природні сполуки також можна розглядати як нутрицевтичні інгредієнти або дієтичні добавки, що дозволяє розробляти продукти з підвищеною харчовою цінністю, потенційною користю для здоров'я, довшим терміном зберігання, а також гарним сенсорним профілем (Bak et al., 2010; Cocci et al., 2021; Carrocho, Morales, & Ferreira, 2015).

Багато авторів оцінювали потенціал ядер кісточок фруктів для виробництва біоактивних пептидів з ізольованих білків. Як правило, вивільнення біоактивних пептидів може здійснюватися шляхом: ферментативного гідролізу *in vitro*, шлунково-кишкового травлення та ферментації з неактивних батьківських білків. Ці пептиди можуть мати широкий спектр фізіологічних функцій, включаючи антитромботичну, антимікробну, зниження рівня холестерину, антиоксидантну та інгібуючу антигіпертензивну активність.

Ведеться постійний пошук нетрадиційних нових джерел білка для використання як функціональних харчових інгредієнтів і одночасно як харчових добавок.

Турецькі вчені довели, щоб покращити поживний і функціональний вміст безглютенових продуктів на основі крохмалю, до них додають безглютенові зернові та зерноподібні продукти та альтернативні інгредієнти. Протеїн, один із найважливіших відсутніх компонентів продуктів на основі крохмалю, збільшується за рахунок додавання альтернативних джерел. У цьому дослідженні порошкоподібний концентрат білка отримували з ядер кісточок вишні, які є одним із важливих відходів промисловості фруктових соків, і отримані концентрати білка замінювали на борошно при виробництві безглютенового торта в трьох різних співвідношеннях (2, 5 і 10%). Визначено фізичні, функціональні, кольорові, морфологічні, сенсорні та текстурні властивості виготовлених коржів-батонів і властивості текучості кексового тіста. Відповідно до результатів було встановлено, що додавання білкового концентрату ядер кісточок вишні збільшило загальний вміст фенолів і антиоксидантну здатність зразків макухи (за методами FRAP та DPPH). Визначено, що показник твердості зразків макухи, які зберігалися протягом 60 днів, підвищувався більш ніж на 2% при заміні білкового концентрату ядер кісточок вишні. У результаті було встановлено, що білковий концентрат вишневих ядер кісточок збагачує поживними властивостями торт без глютену, збільшуючи їх білковий і

функціональний вміст, і не викликає жодних негативних впливів на фізичні властивості зразків тортів до рівня додавання 5%. З цих причин білковий концентрат ядер вишневих кісточок був оцінений як функціональна сировина, придатна для використання у виробництві тортів без глютену (Ali, Vişne, Protein, & Tozu, 2023).

Нещодавно (Khallouki et al., 2012) досліджували фітохімічний склад та антиоксидантну здатність різних ботанічних частин сливи Мірабель з територій Франції, Німеччини та Люксембургу. Використовуючи метод HPLC-ESI-MS, вони визначили, що вміст амідгаліну становить понад 90% фенольних сполук, присутніх у ядрах. Використовуючи аналізи DPPH, FRAP і ORAC, було виявлено, що амідгалін з цих рослинних матеріалів не виявляє жодної антиоксидантної активності.

Відомо, що амідгалін дуже ефективно «вловлює» гідроксильні радикали. Ця властивість дозволяє застосовувати амідгалін як добавку проти старіння організму людини (South, 2000). Наприкінці 70-х і на початку 80-х років XX століття було підтверджено, що амідгалін виявляє протипухлинну дію на додаток до вищезазначених ефектів. Вважається, що амідгалін є основним нетоксичним агентом для метаболічного лікування раку. Хоча застосування амідгаліну має обмеження, ця біологічно активна сполука показала свою ефективність проти пухлин легенів, молочної залози, простати, товстої кишки та лімфом (Milazzo, Lejeune, & Ernst, 2007; Park et al., 2005; Chang et al., 2006). У (Jiagang et al., 2011) активували амідгалін за допомогою ферменту β -D-глюкозидази та спостерігали за його дією на проліферативні клітини Hep G2. Сучасні технології сильніше запобігли росту цих клітин після його активації.

У (Farag et al., 2022) вивчали валоризацію та оптимізацію видобутку ядер кісточок чорносливу для харчових і функціональних харчових добавок. Дослідники представили детальний аналіз фітохімічного складу олії та екстрактів ядер чорносливу як потенційних джерел ненасичених жирних кислот, фенольних сполук і фітостеролів. Крім поживної цінності, ці ядра можуть бути використані для виробництва продуктів з доданою вартістю, таких як харчові підсилювачі та антиоксиданти. Представлені найкращі практики валоризації одного з найбільших у світі культивованих ядер кісточок фруктів та їх різні застосування в харчовій промисловості та промисловості функціонального харчування.

Вчені з Індії та Іспанії вивчали ядра кісточок персика як потенційні функціональні харчові інгредієнти рослинного походження. Вони вважаються надзвичайно багатими джерелами натрію, калію, цинку, міді, заліза, жирних кислот (лінолевої, олеїнової, пальмітинової та лінолевої кислот), клітковини та вуглеводів (сахарози, глюкози та фруктози). Попередні результати різних досліджень показали, що ядра кісточок персика містять велику кількість білка та біоактивних пептидів. Вони продемонстрували властивості проти старіння, утворення біоплівки, захист від оксидативного стресу, проліферації ракових клітин, пригнічення діабету II типу, хвороби Альцгеймера та ожиріння. Було зроблено висновок, що біологічні властивості стимулюються наявністю гідроксикоричних кислот, полімерних проціанідинів, ціаногенних глікозидів, каротиноїдів та інших метаболітів (Kumari et al., 2023).

Амідгалін присутній в ядрах кісточок персика, який перетворюється на ціанід і, як вважається, знищує ракові клітини. Проводяться різноманітні дослідження для вилучення можливих біологічно активних сполук з ядер кісточок персика,

щоб запобігти забрудненню навколишнього середовища, а також економічним втратам. Таким чином, відходи, побічні продукти при переробці персика та їх утилізовані сполуки можуть бути використані як стійке джерело різних важливих сполук, які можуть мати велике значення в різних функціональних харчових продуктах, фармацевтичній промисловості, кормовій промисловості та косметичі. Також було зроблено висновок, що бракує важливих досліджень щодо харчових, фітохімічних та біологічних властивостей ядер персикових кісточок і продуктів після їх переробки. Як результат, у цьому огляді наголошується на харчовому профілі, фітохімічному складі, біологічній активності, можливостях використання як інгредієнтів у функціональних харчових продуктах, токсичності ядер кісточок персика, а також на інших дослідницьких напрямках, яким приділялося менше уваги або які раніше не вивчалися. Ця інформація може бути цінною для дослідників, виробників продуктів харчування та споживачів, які зацікавлені в розробці і споживанні функціональних продуктів харчування рослинного походження, що можуть сприяти здоров'ю та запобігати хронічним захворюванням (Kumari et al., 2023).

Також вчені дослідили фізико-хімічні властивості ядер кісточок абрикоса: нутрицевтичний склад, амінокислотний та жирнокислотний профіль. Олейнова кислота була домінуючою жирною кислотою, що становила понад 60% жирних кислот і коливалася від 60,96 до 73,17 г/100 г жиру. Лінолева кислота була основною жирною кислотою і коливалася від 24,63 до 36,77 г/100 г жиру. Аспарагінова кислота й тирозин були основними амінокислотами в ядрах кісточок, складаючи понад 40% від загальної кількості. Незамінні амінокислоти, лізин і метіонін, були найвищими в генотипах Roxana та CITH-A-3. Амігдалін, токсична глікозидна сполука, була виявлена лише в ядрах сортів абрикосів Roxana та Gold Cot і була відсутня в сортах Shakarpara, CITH-A-2, CITH-A-3, CITH-A-1. Загальний вміст фенолів у ядрах коливався від 39,71 до 130,87 мг GAE/100 г сухої речовини, а антиоксидантна активність коливалася від 10,21 до 23,49 мкмоль TE/г сухої речовини. Хімічний склад ядер кісточок абрикоса робить їх цікавим джерелом корисних для здоров'я речовин для розробки функціональних харчових продуктів (Zhang, Guo, Zhang, Wu, & Zheng, 2021; Alajil et al., 2022).

Науковці із Себії та Хорватії у своєму дослідженні пропонують оцінити потенціал олійної макухи з ядер абрикосових кісточок для виробництва білкового ізоляту з хорошими біофункціональними властивостями, такими як розчинність, здатність до адсорбції води та олії, піноутворююча і емульгуюча здатність, а також потенційна гіпоглікемічна активність (Čakarević et al., 2019).

У доклінічних дослідженнях (Hwang et al., 2008) довели, що амігдалін з абрикосів *Prunus armeniaca* має протизапальну дію. Крім того, була також підтверджена антибактеріальна активність амігдаліну, виділеного з *Prunus armeniaca* (Akaberi, Forouzanfar, Rakhshandeh, & Moshirian-Farahi, 2024).

Науковці з Індії довели, що борошно з ядер кісточок диких абрикосів можна ефективно детоксикувати, використовуючи простий, безпечний, вітчизняний та економічно ефективний метод, який також має потенціал для розробки білкових добавок і харчових продуктів з доданою вартістю (Tanwar, Modgil, & Goyal, 2018).

Існує зростаючий попит на розробку нових продуктів з дієтичними властивостями. Борошно з ядер абрикосових кісточок може запропонувати захопливий потенціал як джерело білка в зернових продуктах. Дослідники із Тунісу збагатили хліб борошном з ядер абрикосових кісточок. Результати показали, що таке борошно може бути успішно використано для приготування хліба, збагаченого білком, золотом та жиром. Приготовлений хліб має низький вміст вуглеводів. Часткова заміна до 12% показала, що якість хліба дещо змінилася, і споживачі цінують новий продукт, особливо до сніданку (Dhen, Rejeb, Boukhris, Damergi, & Gargouri, 2018). Китайські науковці вивчали використання шкірки ядер абрикосових кісточок шляхом ультразвукової обробки тіста для виробництва хліба з кращим смаком і тривалим терміном зберігання. Результати показують, що шкірка ядер абрикосових кісточок може бути використана в розробці нових видів хліба, щоб зменшити втрату ресурсів і забруднення навколишнього середовища (Yao, Zhang, & Liu, 2021).

Як недостатньо використаний ресурс побічного продукту переробки абрикосових кісточок, було проаналізовано борошно з ядер абрикосових кісточок (АКФ) та його похідні, які частково замінили пшеничне борошно в інгредієнтах хліба, щоб дослідити їх повторне використання. Вплив додавання похідних АКФ на реологічні й текстурні властивості зразків тіста досліджували за допомогою конфокальної лазерної скануючої мікроскопії, реометра та аналізатора текстури відповідно. Результати показують, що білок є основним компонентом борошна з похідних АКФ, а на текстуру та реологічні властивості зразків тіста значно вплинуло додавання харчового борошна до хлібної суміші. Використання похідних АКФ призводить до отримання тіста з вищою твердістю та слабшою взаємодією між крохмалем і глютенем, ніж у контрольній групі (Liu, & Zhang, 2022).

У (Mahde et al., 2022) використовували ядра кісточок абрикоса для виготовлення кексів. Індійські вчені вивчали вплив борошна з ядер кісточок абрикоса (побічний продукт) на фізико-хімічні, сенсорні й антиоксидантні властивості печива. Результати дослідження показують, що борошно з ядер кісточок абрикоса має великий потенціал для покращення якості кондитерських виробів, можливість розширити його застосування та зменшити забруднення довкілля відходами харчової промисловості (Sheikh, Rather, & Anjum, 2020). Дослідники з Туреччини оцінювали фізико-хімічні властивості та стабільність турецької кави, збагаченої порошком з ядер абрикосових кісточок, при зберіганні (Gunel, Parlak, Adsoy, & Topuz, 2022).

Абрикосова клітковина володіє унікальним складом і корисними властивостями для зміцнення здоров'я. Особлива користь абрикосових кісточок полягає в їх здатності боротися з раковими клітинами. Це властивість забезпечується за рахунок наявності в кісточках абрикоса вітаміну В₁₇. Саме в ньому і знаходиться ціанід, якому медики приписують можливість знищення ракових клітин.

Більшість досліджень спрямовані на пошук ліків від раку. Едвард Гріффін стверджує, що рак є хворобою, безпосередньо пов'язаною з дефіцитом вітаміну В₁₇ (амігдаліну), який знаходиться у великих кількостях в ядрах абрикосових кісточок. Але найсумніше і найтривожніше полягає в тому, що політика терапії раку наскрізь корумпована, і не зацікавлена в появі на ринку нових ліків для лікування раку. Мета його книги — довести, що рак є наслідком авітамінозу і викликаний не присутністю бактерій і вірусів, а відсутністю необхідних речовин, які людина

видалила з раціону. Якщо це вірно, тоді лікування і профілактика раку прості — необхідно відновити здоровий раціон харчування (Гріффін, 1974).

Дійсно науковцями багатьох країн доведено, що речовина, яка знаходиться в ядрах абрикосових кісточок — амігдалін. Субстанція, про яку ми говоримо, має три різних імені: амігдалін, вітамін В₁₇ або лаєтрил. За своєю суттю, це схожі речовини, які знаходяться в природі і називаються амігдаліном. Про нього багато писали, адже амігдалін був виявлений у природі дуже давно. Коли амігдалін очищають, з нього виділяють концентрат, який застосовують у лікуванні раку. Він називається лейтрил (або лаєтрил). Доктор Ернест Джуліон Кребс — науковець, який вперше виділив цей компонент, очистив для застосування в лікуванні раку і назвав його вітамін В₁₂. Це його неофіційна назва. Ви не зможете знайти його в офіційній енциклопедії, але Кребс сказав, що властивості цієї речовини дуже близькі до властивостей вітамінів цієї групи і він незамінний для здоров'я і лікування раку. Оскільки вже було відомо 16 вітамінів цієї групи, Кребс вирішив, що у нього повинен бути номер 17. Так з'явилася назва вітамін В₁₇, але його субстанція називається амігдалін. Це не теоретичні міркування, все було підтверджено лабораторними дослідженнями. Молекула амігдаліну складається з чотирьох компонентів: дві частини глюкози цукру, бензальдегіт і ціанід. Слово ціанід лякає людей, адже він відомий як токсичний елемент, люди бояться приймати його, адже це отрута, і ним можна отруїтися. Ціанід токсичний лише в чистому вигляді, тоді він здатний вбити людину, але коли ціанід укладено в молекулу, він наче замкнений іншими компонентами, втрачає свою токсичність. Наприклад, вітамін В₁₂ — це його офіційне ім'я, — це ціанокобаламін і він містить ціанід. Існує достатньо багато продуктів в нашій їжі, які містять ціанід. Вони нетоксичні, адже необхідні нашому організму. Ми не змогли б жити без вітаміну В₁₂, тому інформація про те, що продукт містить ціанід, зовсім не тривожний знак. Питання тут у тому, що може звільнити ціанід. Якщо ціанід і бензальдегіт, який теж, до речі, є дуже токсичною речовиною, звільнити з молекули амігдаліну, тоді вони стають отруйними. Питання: що може зробити це? І відповідь дуже цікава. На це здатний фермент, дуже специфічний, який розриває молекулу амігдаліну. Цей фермент знаходиться в раковій клітині. Це означає, що ви їсте їжу, яка містить лише невелику кількість, тільки ознаки цієї речовини — амігдаліну. Коли він вступає в контакт з раковою клітиною, він також вступає в контакт з тим ферментом, який відкриває, руйнує молекулу амігдаліну, звільняє ціанід і бензальдегіт, які, у свою чергу, атакують ракову клітину. Звичайні, нормальні клітини не мають цього ферменту, тому це досить вибіркового механізму, який атакує тільки ракові клітини. Автор вважає, що це унікальний природний механізм, який очевидно є частиною природного процесу (Гріффін, 1974).

Шрот з ядер абрикосових кісточок є незамінним продуктом для прихильників сировідіння. Вживання шроту з ядер абрикосових кісточок є натуральним глистогінним засобом, заварений, як чай, він може допомогти при лікуванні серцево-судинних захворювань. Крім зцілення ракових клітин, ядра абрикоса є найефективнішим засобом від бронхіту, коклюшу та нефриту. В шроті з абрикосових ядер міститься синильна кислота, яка у великих кількостях чинить негативний вплив на тканини кишечника і на весь організм в цілому, тому вживати його варто в

розумних кількостях. Денна норма для дорослих не повинна перевищувати 50 г, а для дітей — 25 г.

Макуха з ядер абрикосових кісточок — натуральний продукт, що видобувається методом холодного пресування. В її складі є білки, жири та вуглеводи, а також синильна кислота та амігдалін, який може знищити патогенні та пошкоджені клітини. Вона багата калієм, залізом, магнієм, вітамінами груп E і C. Ця речовина вбиває і ракові клітини, причому в здорових клітинах вона перетворюється на звичайний вуглевод. Як лікувальний засіб, цей продукт використовується проти кашлю, ларингіту, трахеїту, бронхіту, бронхіальної астми та при онкологічних захворюваннях: робить профілактичний і лікувальний ефект в боротьбі з онкологією, перешкоджає утворенню ракових клітин. Застосовується як харчова добавка в боротьбі проти гельмінтів, покращує пам'ять, самопочуття та надає життєвих сил.

Макуху абрикоса можна вживати в сирому вигляді. Цей порошок додають в супи, овочі, каррі, фруктові соки або крупи. В кулінарії макуху абрикосових кісточок застосовують для приготування морозива, йогуртів, кремів, вафель та інших солодких страв.

Науковці з Пакистану та Китаю підтвердили, що ядра кісточок абрикосів, макуха і шрот з них є багатими джерелами вторинних метаболітів і мають чудову антиоксидантну й антилюмінесцентну активність, що може зробити значний внесок у лікування та профілактику багатьох хронічних проблем зі здоров'ям людей і тварин (Tareen et al., 2021; Zhang, Wei, Fan, & Shi, 2018).

Дослідники із Сербії, Хорватії, Іспанії, Єгипту, Туреччини, Індії та Шрі-Ланки оцінили потенціал макухи з ядер абрикосових, вишневих кісточок і насіння винограду для виробництва білкового ізоляту з хорошими біофункціональними властивостями, такими як розчинність, здатність до адсорбції води та олії, піноутворюючу та емульгуючу здатність, а також потенційну гіпоглікемічну активність (Čakarević et al., 2019; Abdel-Khalek, & Mattar, 2022; Mehtap, Melih, & Metin, 2019).

Хоча в галузі харчових добавок досягнуто значного прогресу, суперечки, якими деякі з них все ще оповиті, стимулювали дослідження щодо безпечніших і здоровіших наступних поколінь. Ці добавки можуть походити з природних джерел і надавати численні переваги для здоров'я, окрім використання лише для фарбування чи консервування. Як обмежувальні фактори, ці добавки часто пов'язані з питаннями стабільності, сталості й економічної ефективності, що виправдовує потребу в інноваційних рішеннях. У цьому контексті, а також з досягненнями, здобутими в комп'ютерах та обчислювальних методологіях для допомоги в експериментах *in silico*, розробка нових безпечніших та ефективніших натуральних добавок з подвійною функціональністю (барвник і консервант), наприклад, за допомогою явища копігментації, може бути досягнута більш ефективно (Novais et al., 2022).

Барвники важливі для харчової промисловості, оскільки покращують сенсорні якості, що втрачаються під час харчового процесу, та розширюють асортимент продуктів. Загалом, штучні барвники мають нижчу вартість і кращу стабільність, ніж натуральні. Проте дослідження показали їх зв'язок з деякими розладами здоров'я. Крім того, споживачі приділяють більше уваги харчовим продуктам з корисним впливом на здоров'я, що відкриває нову перспективу для використання

натуральних барвників. У цьому контексті фрукти є чудовим альтернативним джерелом природних сполук, які дозволяють отримувати широкий спектр молекул барвників, таких як антоціани, беталаїни, каротиноїди та хлорофіли. Крім того, окрім своєї барвної здатності, вони мають різні біоактивні властивості. Були розглянуті основні пігменти, що містяться у фруктах, та методи їх екстракції і стабілізації для використання як харчових добавок (Albuquerque, Oliveira, Barros, & Ferreira, 2021).

Харчові добавки та барвники широко використовуються в харчовій промисловості для покращення якості та безпеки харчових продуктів під час обробки, зберігання й пакування. Отримання цих молекул здійснюється переважно трьома способами: екстракцією з природних джерел, хімічним синтезом і біовиробництвом, причому перші два є найбільш використовуваними. Однак зростаючий попит на сталий розвиток, безпеку та «натуральні» продукти відновив інтерес до використання біометодів виробництва. Так само перехід до більш культивованих продуктів харчування та альтернатив м'ясу вимагає виробництва нових добавок і барвників. Виробництво біохарчових добавок і барвників є міждисциплінарним дослідницьким проектом і являє собою зростаючу тенденцію в майбутньому харчовій промисловості. Перспективні підходи, а також поточні проблеми та майбутні напрямки також будуть ретельно обговорені для біовиробництва цих харчових добавок і барвників (Sun, Xin, & Alper, 2021; Seo, & Jin, 2022; Bocker, & Silva, 2022).

Білкові гелі рослинного походження мають добру біосумісність і біорозкладаність, що забезпечує нереактивне середовище та контролює вивільнення чутливих або біоактивних сполук. Досліджувався вплив зшивання, каталізованого мікробною трансглютаміназою (MTGase), на хімічні взаємодії, текстурні властивості та контрольоване вивільнення гелів, виготовлених з використанням білкового концентрату гірких ядер абрикосових кісточок (APC). Зі збільшенням концентрації MTGase зменшувалися вільні аміно- та вільні сульфгідрильні групи, тоді як ступінь зшивання, дисульфідних зв'язків і поверхневої гідрофобності збільшувалися. За допомогою SEM спостерігалася компактна та однорідна мережева структура. Аналіз текстурного профілю показав, що зшивання, індуковане MTGase, збільшувало твердість, пружність та когезивність гелю. Крім того, дослідження контрольованого вивільнення *in vitro* показали, що індуковані MTGase APC гелі здатні протистояти кислим умовам і перетравленню пепсином, захищати рибофлавін від імітованого шлункового соку та дозволяти поступове вивільнення в імітованому шлунковому соці. APC гелі можуть бути придатними для доставки чутливих сполук у функціональні харчові продукти, а також у харчові добавки та фармацевтичні продукти (Wen, Jin, Regenstein, & Wang, 2018).

Біорозкладні плівки на основі крохмалю були виготовлені методом лиття з розчину та армовані сільськогосподарськими відходами (порошок шкаралупи абрикоса та волоського горіха). Порошок обох оболонок додавали в різних співвідношеннях (0, 2,5, 5, 7,5 та 10%) для дослідження мікроструктур та характеристик (механічних і термічних властивостей) плівки на основі крохмалю. Оскільки всі компоненти, що використовуються у виробництві плівок, є харчовими інгредієнтами, очікується, що ці плівки будуть використовуватися для упаковки харчових продуктів (Ali et al., 2019).

Мета подальшої дослідницької роботи: виробити харчові продукти та добавки на основі отриманих макух і шротів із насіння винограду, ядер плодових фруктових кісточок: абрикосів, персиків, вишень та слив, які б володіли дієтичними і лікувально-профілактичними властивостями.

Для цього потрібно:

- виконати комплекс досліджень з макухами та шротами, отриманими з різних сортів виноградного насіння, ядер плодових фруктових кісточок: абрикосів, персиків, слив і вишень;
- розробити математичну модель щодо рецептур натуральних харчових добавок, яка дозволяє на основі даних про компонентний склад, прогнозувати їх консистенцію та вирішувати зворотну задачу;
- з'ясувати особливості використання цих натуральних харчових добавок;
- провести комплекс досліджень з натуральними харчовими добавками щодо кристалічних структур з подальшою розробкою математичної моделі, що дозволить прогнозувати строк придатності до вживання харчових продуктів спеціального призначення;
- провести реологічні, фізико-хімічні, мікробіологічні дослідження в одержаній продукції;
- здійснити комплекс медико-біологічних досліджень щодо харчової та біологічної цінності натуральних харчових добавок спеціального призначення, отриманих за розробленими технологіями.

Висновки

Із наведеної інформації літературного огляду видно, що мета науковців усього світу — отримати інформацію про склад насіння винограду, ядер кісточок фруктів та ідентифікувати деякі біоактивні сполуки, що входять до складу матриці, з огляду на можливе майбутнє застосування. Результати свідчать про те, що макухи та шроти, отримані з різних сортів виноградного насіння, ядер плодових фруктових кісточок: абрикосів, персиків, слив і вишень, можуть бути додатково використані як натуральна харчова добавка або як збагачувальний інгредієнт у харчових продуктах, наприклад, у хлібобулочних виробках, медицині при лікуванні багатьох хвороб. Вони придатні для споживання як людиною, так і тваринами, оскільки є джерелом функціональних макро- та мікроелементів, які допомагають підтримувати оптимальний стан здоров'я та самопочуття. Можуть мати велике значення в різних функціональних харчових продуктах, фармацевтичній і кормовій промисловостях та косметичі. Тому доцільно розробляти, виробляти харчові продукти і натуральні харчові добавки на основі отриманих макух і шротів із насіння винограду, ядер плодових фруктових кісточок: абрикосів, персиків, вишень, слив, які б володіли дієтичними, лікувально-профілактичними властивостями.

Література

- Гріффін, Д. Е. (1974). *Світ без раку. Історія вітаміну В₁₇*. 350.
- Саноев, А., Хажібаєв, Т., Халілов, Р., Сагдуллаєв Ш. (2020). Полноценное использование косточек винограда. *Farmatsevtika jurnali.*, 2, 68—73. https://www.researchgate.net/profile/RavsanjonHalilov/publication/346786396_Polnocennoe_ispolzovanie_kostoczek_vinograda/links/5fd0aac892851c00f85f4f63/Polnocennoe_ispolzovanie-kostoczek-vinograda.pdf.

- Abdel-Khalek, H. H., Mattar, Z. A. (2022). Biological activities of Egyptian grape and mulberry by-products and their potential use as natural sources of food additives and nutraceuticals foods. *J. Food Meas. Charact.*, 16(2), 1559—1571. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01289-2>.
- Akaberli, M., Forouzanfar, F., Rakhshandeh, H., Moshirian-Farahi, S. (2024). Analgesic effect of apricot kernel oil on neuropathic pain in rats. *Heliyon*, 10(15), e34988. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34988>.
- Alajil, O., Sagar, V., Kaur, C., Rudra, S., Vasudev, S., Chandran, D., Lorenzo, J. (2022). Chemical Characterization of Apricot Kernel: Nutraceutical Composition, Amino Acid, and Fatty Acid Profile. *Food Anal Methods*, 15(9), 2594—2604. <https://doi.org/10.1007/s12161-022-02317-z>.
- Albuquerque, B. R., Oliveira, M. B. P. P., Barros, L., Ferreira I. C. F. R. (2021). Could fruits be a reliable source of food colorants? Pros and cons of these natural additives. *Crit Rev. Food Sci. Nutr.*, 61(5), 805—835. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1746904>.
- Ali, C., Vişne, Ç., Protein, K., Tozu, İ. (2023). Effect of Sour Cherry Seed Protein Concentrate Powder Addition on Some Quality Characteristics of Gluten-Free Baton Cakes. *Akademik Gıda*, 21(3), 254—263. <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.1382925>.
- Ali, A., Ali, S., Yu, L., Liu, H., Khalid, S., Hussain, A., Ying, C. (2019). Preparation and characterization of starch-based composite films reinforced by apricot and walnut shells. *J. Appl. Polym. Sci.*, 136(38), 47978. <https://doi.org/10.1002/app.47978>.
- Antonic, B., Dordevic, D., Jancikova, S., Holeckova, D., Tremlova, B., Kulawik, P. (2021). Effect of Grape Seed Flour on the Antioxidant Profile, Textural and Sensory Properties of Waffles. *Processes*, 9(1), 131. <https://doi.org/10.3390/pr9010131>.
- Ayala, J., Vega, V., Rosas, C., Palafox, H., Villa, J., Siddiqui, W. (2011). Agro-industrial potential of exotic fruit byproducts as a source of food additives. *Food Res. Int.*, 44, 1866—1874.
- Bak, I., Lekli, I., Juhasz, B., Varga, E., Varga, B., Gesztelyi, R., Szendrei, L., Tosaki, A. (2010). Isolation and analysis of bioactive constituents of sour cherry (*Prunus cerasus*) seed kernel: an emerging functional food. *J. Med. Food*, 13, 905—910. doi: 10.1089/jmf.2009.0188.
- Belwal, T. T., Devkota, H. P., Hassan, H. A., Ahluwalia, S., Ramadan, M. F., Mocan, A. G. (2018). Phytopharmacology of Acerola (*Malpighia* spp.) and its potential as functional food. *Trends in Food Science & Technology*, 74, 99—106. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.01.014>.
- Bordiga, M., Travaglia, F., Locatelli, M. (2019). Valorisation of grape pomace: An approach that is increasingly reaching its maturity — A review. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 54, 933—942.
- Bocker, R., Silva, E. K. (2022). Pulsed electric field assisted extraction of natural food pigments and colorings from plant matrices. *Food Chem. X.*, 15(2), 100398. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100398>.
- Brebu, M., Yanik, J., Uysal, T., Vasile, C. (2014). Thermal and Catalytic Degradation of Grape Seeds/Polyethylene Waste Mixture. *Cellul. Chem. Technol.*, 48, 665—674.
- Brenes, A., Viveros, A., Chamorro, S., Arija, I. (2016). Use of polyphenol-rich grape by-products in monogastric nutrition. A review. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 211, 1—17.
- Čakarević, J., Vidović, S., Vradić, J., Gavarić, A., Jokić, S., Pavlović, N., Blažić, M., Popović, L. (2019). Production of Bio-Functional Protein through Revalorization of Apricot Kernel Cake. *Foods*, 8(8), 318. <https://doi.org/10.3390/foods8080318>.
- Câmara, J. S., Lourenço, S., Silva, C., Lopes, A., Andrade, C., Perestrelo, R. (2020). Exploring the potential of wine industry by-products as source of additives to improve the quality of aquafeed. *Microchem. J.*, 155, 104758. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104758>.
- Carocho, M., Barreiro, M. F., Morales, P., Ferreira, I. C., Gomez, P. M. (2014). Adding molecules to food, pros and cons: a review on synthetic and natural food additives. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 13(4), 377—399. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12065>.
- Carocho, M., Morales, P., Ferreira, I. C. (2015). Natural food additives: Quo vadis? *Trends Food Sci. Technol.*, 45, 284—295.
- Chang, H. K., Shin, M. S., Yang, H. Y., Lee, J. W., Kim, Y. S., Lee, M. H., Kim, C. J. (2006). Amygdalin induces apoptosis through regulation of Bax and Bcl-2 expressions in human DU145 and LNCaP prostate cancer cells. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 29(8), 1597—1602.

- Chen, J., Xia, P. (2024). Health effects of synthetic additives and the substitution potential of plant-based additives. *Food Res. Int.*, 197(1), 115177. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115177>.
- Cocci, P., Moruzzi, M., Martinelli, I., Maggi, F., Cifani, C., Mosconi, G., Tayebati, S. K., Damiano, S., Palermo, F. A. (2021). Tart cherry (*Prunus cerasus* L.) dietary supplement modulates visceral adipose tissue CB1 mRNA levels along with other adipogenesis-related genes in rat models of diet-induced obesity. *Eur. J. Nutr.*, 60(5), 2695—2707. <https://doi.org/10.1007/s00394-020-02459-y>.
- Da Costa, J. P. (2017). A modern perspective on nutraceuticals — key concepts and future prospects. *Trends in Food Science and Technology*, 62, 68—78. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.02.010>.
- D'Eusano, V., Malferrari, D., Marchetti, A., Roncaglia, F., Tassi, L. (2023). Waste By-Product of Grape Seed Oil Production: Chemical Characterization for Use as a Food and Feed Supplement. *Life*, 13(2), 326. <https://doi.org/10.3390/life13020326>.
- Dhen, N., Rejeb, I., Boukhris, H., Damergi, C., Gargouri, M. (2018). Physicochemical and sensory properties of wheat- Apricot kernels composite bread. *LWT*, 95(11), 262—267. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.068>.
- Domínguez Díaz, L., Fernández-Ruiz, V., Cámara, M. (2020). The frontier between nutrition and pharma: The international regulatory framework of functional foods, food supplements and nutraceuticals. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 60(10), 1738—1746. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1592107>.
- Elkatry, H. O., Ahmed, A. R., El-Beltagi, H. S., Mohamed, H. I., Eshak, N. S. (2022). Biological Activities of Grape Seed By-Products and Their Potential Use as Natural Sources of Food Additives in the Production of Balady Bread. *Foods*, 11(13), 1948. <https://doi.org/10.3390/foods11131948>.
- Eussen, S. R. B. M., Verhagen, H., Klungel, O. H., Garssen, J., Van Loveren, H., Van Kranen, H. J., and Rompelberg, C. J. M. (2011). Functional foods and dietary supplements: Products at the interface between pharma and nutrition. *European Journal of Pharmacology*, 668(1): S2—S9. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2011.07.008>.
- Farag, M. A., Bahaa Eldin, A., Khalifa, I. (2022). Valorization and Extraction Optimization of Prunus Seeds for Food and Functional Food Applications: A Review with Further Perspectives. *Food Chem.*, 388, 132955. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132955>.
- Faustino, M., Veiga, M., Sousa, P., Costa, E. M., Silva, S., Pintado, M. (2019). Agro-food byproducts as a new source of natural food additives. *Molecules*, 24(6), 1056. <https://doi.org/10.3390/molecules24061056>.
- Garcia, J., Nicodemus, N., Carabano, R., De Blass, J. C. (2002). Effect of inclusion of defatted grape seed meal in the diet on digestion and performance of growing rabbits. *J. Anim. Sci.*, 80(1), 162—170. <https://doi.org/10.2527/2002.801162x>.
- Gollücke, A. P. (2010). Recent applications of grape polyphenols in foods, beverages and supplements. *Recent Pat. Food Nutr. Agric.*, 2(2), 105—109. <https://doi.org/10.2174/1876142911002020105>.
- Gomes, T. M., Toaldo, I. M., Haas, I. C. d. S., Burin, V. M., Caliari, V., Luna, A. S., de Gois, J. S., Bordignon-Luiz, M. T. (2019). Differential Contribution of Grape Peel, Pulp, and Seed to Bioaccessibility of Micronutrients and Major Polyphenolic Compounds of Red and White Grapes through Simulated Human Digestion. *J. Funct. Foods*, 52(6), 699—708. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.11.051>.
- Grosu, I. A., Pistol, G. C., Taranu, I., Marin, D. E. (2019). The Impact of Dietary Grape Seed Meal on Healthy and Aflatoxin B1 Afflicted Microbiota of Pigs after Weaning. *Toxins*, 11(1), 25. <https://doi.org/10.3390/toxins11010025>.
- Günel, Z., Parlak, A., Adsoy, M., Topuz, A. (2022). Physicochemical properties and storage stability of Turkish coffee fortified with apricot kernel powder. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(8), e16453. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16453>.
- Hwang, H. J., Kim, P., Kim, C. J., Lee, H. J., Shim, I., Yin, C. S., Yang, Y., Hahm, D. H. (2008). Antinociceptive effect of amygdalin isolated from *Prunus armeniaca* on formalin-induced pain in rats. *Biol. Farm. Bull.*, 31(8), 1559—1564. <https://doi.org/10.1248/bpb.31.1559>.
- Jara-Palacios, M. J., Hernanz, D., Cifuentes-Gomez, T., Escudero-Gilete, M. L., Heredia, F. J., Spencer, J. P. (2015). Assessment of white grape pomace from winemaking as source of bioactive compounds, and its antiproliferative activity. *Food Chem.*, 183, 78—82.

- Jiagang, D., Li, C., Wang, H., Hao, E., Du, Z., Bao, C., Lv, J., Wang, Y. (2011). Amygdalin mediates relieved atherosclerosis in apolipoprotein E deficient mice through the induction of regulatory T cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 411(3), 523—529.
- Kaur, M., Agarwal, C., Agarwal, R. (2009). Anticancer and Cancer Chemopreventive Potential of Grape Seed Extract and Other Grape-Based Products. *J. Nutr.*, 139, 1806S—1812S.
- Keys, A., Anderson, J. T., Grande, F. (1965). Serum cholesterol response to changes in the diet: IV. Particular saturated fatty acids in the diet. *Metabolism-Clinical and Experimental.*, 14(7), 759—65. [https://doi.org/10.1016/0026-0495\(65\)90002-8](https://doi.org/10.1016/0026-0495(65)90002-8).
- Khallouki, F., Haubner, R., Erben, G., Ulrich, C. M., Owen, R. W. (2012). Phytochemical composition and antioxidant capacity of various botanical parts of the fruits of *Prunus × domestica* L. from the Lorraine region of Europe. *Food Chemistry*, 133(3), 697—706.
- Kumari, N., Kumar, M., Puri, S., Zhang, B., Rais, N., Pundir, A., Chandran, D., and Lorenzo, M. (2023). Peach (*Prunus persica* (L.) Batsch) seeds and kernels as potential plant-based functional food ingredients: A review of bioactive compounds and health-promoting activities. *Food Bioscience*, 54, 102914. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102914>.
- Kuster-Boluda, I., Vidal-Capilla, I. (2017). Споживчі настрої щодо вибору функціональних продуктів харчування. *Spanish Journal of Marketing — ESIC*, 21, 65—79. <https://doi.org/10.1016/j.sjme.2017.05.002>.
- Ky, I., Teissedre, P. L. (2015). Characterisation of mediterranean grape pomace seed and skin extracts: Polyphenolic content and antioxidant activity. *Molecules*, 20, 2190—2207.
- Lara, M. V., Bonghi, C., Famiani, F., Vizzotto, G., Walker, R. P., Drincovich, M. F. (2020). Stone Fruit as Biofactories of Phytochemicals With Potential Roles in Human Nutrition and Health. 2(11), 562252. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.562252>.
- Liu, M.-J., Zhang, Q.-A. (2022). Valorization of the under-utilized apricot kernels protein based on the rheology and texture properties of dough. *LWT-Food Science and Technology*, 169(7), 114019. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114019>.
- Maggiolino, A., Greco, R., Blando, F., Tsiplakou, E., Casalino, E., De Palo, P. (2025). Nutritional, phenolic and in vitro digestion characteristics of dried grape pomace processed with different micronization/air-classification protocols. *Agricultural and Food Sciences Italian Journal of Animal Science*, 24(1), 393—410. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2025.2454922>.
- Mahde, N. F., Fayed, M. I. A. (2022). Using Apricot Seed Kernels for the Development of Supplemented Cakes. *CASP. J. Environ. Sci.*, 20(5), 911—918. <https://doi.org/10.22124/CJES.2022.6038>.
- Makris, D. P., Boskou, G., Andrikopoulos, N. K. (2007). Polyphenolic content and in vitro antioxidant characteristics of wine industry and other agri-food solid waste extracts. *J. Food Compos. Anal.*, 20, 125—132.
- Mandic, A. I., Dilas, S. M., Cetkovic, G. S., Canadanovic-Brunet, J. M., Tumbas, V. T. (2008). Polyphenolic Composition and Antioxidant Activities of Grape Seed Extract. *Int. J. Food Prop.*, 11, 713—726.
- Marin, D. E., Bulgaru, C. V., Anghel, C. A., Pistol, G. C., Dore, M. I., Palade, M. L., Taranu, I. (2020). Grape Seed Waste Counteracts Aflatoxin B1 Toxicity in Piglet Mesenteric Lymph Nodes. *Toxins*, 12, 800.
- Mateus, A. R. S., Pena, A., Sendón, R., Almeida, C., Nieto, G. A., Khwaldia, K., Silva, A. S. (2023). By-products of dates, cherries, plums and artichokes: A source of valuable bioactive compounds. *Trends in Food Science and Technology*, 131, 220—243. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.12.004>.
- Mehtap, C., Melih, G., Metin, Y. (2019). Effect of pH on protein extraction from sour cherry kernels and functional properties of resulting protein concentrate. *Journal of food science and technology-mysore*, 56(6), 30328—3023. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03785-8>.
- Milazzo, S., Lejeune, S., Ernst, E. (2007). Laetrile for cancer: a systematic review of the clinical evidence. *Supportive Care in Cancer*, 15(6), 583—595.
- Novais, C., Molina, A. K., Abreu, R. M. V., Santo-Buelga, C., Ferreira, I. C. F. R., Pereira, C., Barros, L. J. (2022). Natural Food Colorants and Preservatives: A Review, a Demand, and a Challenge. *Agric. Food Chem.*, 70(9), 2789—2805. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07533>.

- Oprea, O. B., Popa, M. E., Apostol, L., Gaceu, L. (2022). Research on the Potential Use of Grape Seed Flour in the Bakery Industry. *Foods*, 11(11), 1589. <https://doi.org/10.3390/foods11111589>.
- Park, H. J., Yoon, S. H., Han, L. S., Zheng, L. T., Jung, K. H., Uhm, Y. K., Chung, J. H., Hong, S. P. (2005). Amygdalin inhibits genes related to cell cycle in SNU-C4 human colon cancer cells. *World Journal of Gastroenterology*, 11(33), 5156—5161.
- Rosales Soto, M. U., Brown, K., Ross, C. F. (2012). Antioxidant Activity and Consumer Acceptance of Grape Seed Flour-Containing Food Products: Antioxidant Activity and Consumer Acceptance of Grape Seed Flour. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 47(3), 592—602. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02882.x>.
- Salem, Y., Rajha, H. N., Van den Broek, L. A. M., Safi, C., Togtema, A., Manconi, M., Manca, M. L. (2022). Multi-Step Biomass Fractionation of Grape Seeds from Pomace, a Zero-Waste Approach. *Plants*, 11, 2831. [Google Scholar] [CrossRef].
- Saltmarsh, M. (2015). Recent trends in the use of food additives in the United Kingdom. *J. Sci. Food Agric.*, 95(4), 649—652. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6715>.
- Santini, A., Novellino, E. (2018). Nutraceuticals: shedding light on the grey area between pharmaceuticals and food. *Expert Review of Clinical Pharmacology*, 11 (6), 545—547. <https://doi.org/10.1080/17512433.2018.1464911>.
- Seo, S. O., Jin, Y. S. (2022). Next-Generation Genetic and Fermentation Technologies for Safe and Sustainable Production of Food Ingredients: Colors and Flavorings. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.*, 13, 463—488. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-052720-012228>.
- Sheikh, M. A., Rather, M. A., Anjum, N. (2020). To study the effect of apricot kernel flour (by-product) on physico-chemical, sensorial and antioxidant properties of biscuits. *J. Curr. Res. Food Sci*, 1(1), 16—22.
- Shi, J., Yu, J., Pohorly, J., Young, J. C., Bryan, M., Wu, Y. (2003). Optimization of the extraction of polyphenols from grape seed meal by aqueous ethanol solution. *Food Agric. Environ.*, 1, 42—47.
- South, J. (2000). Laetrile-the answer to Cancer. *IAS Anti-Aging Bulletin*, 4(7), 10—20.
- Sun, L., Xin, F., Alper, H. S. (2021). Bio-synthesis of food additives and colorants-a growing trend in future food. *Biotechnol. Adv.*, 47, 107694. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107694>.
- Szücs, V., Bánáti, D. (2013). Trends in the utilization of food additives. *Orv. Hetil.*, 154(46), 1813—1819. <https://doi.org/10.1556/OH.2013.29755>.
- Tanwar, B., Modgil, R., Goyal, A. (2018). Antinutritional factors and hypocholesterolemic effect of wild apricot kernel (*Prunus armeniaca* L.) as affected by detoxification. *Food Funct.*, 9(4), 2121—2135. <https://doi.org/10.1039/C8FO00044A>.
- Tareen, A. K., Panezai, M. A., Sajjad, A., Achakzai, J. K., Kakar, A. M., Khan, N. Y. (2021). Comparative analysis of antioxidant activity, toxicity, and mineral composition of kernel and pomace of apricot (*Prunus armeniaca* L.) grown in Balochistan, Pakistan. *Saudi. J. Biol. Sci.*, 28(5), 2830—2839. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8117165/pdf/main.pdf>.
- Torres-Leon, C., Ramirez-Guzman, N., Lonzo-Hernandez, L., Martinez-Medina, G. A., Diaz-Herrera, R., Navarro-Macias, V., Ascacio-Valdes, J. (2018). Food Waste and Byproducts: An Opportunity to Minimize Malnutrition and Hunger in Developing Countries. *Front. Sustain. Food Syst.*, 2, 1—17.
- Viveros, A., Chamorro, S., Pizarro, M., Arijia, I., Centeno, C., Brenes, A. (2011). Effects of dietary polyphenol-rich grape products on intestinal microflora and gut morphology in broiler chicks. *Poult. Sci.*, 90, 566—578.
- Wei, X., Li, L., Yan, H., Li, Q., Gao, J., Hao, R. (2022). Grape seed procyanidins improve intestinal health by modulating gut microbiota and enhancing intestinal antioxidant capacity in weaned piglets. *Livest. Sci.*, 264, 105066.
- Wen, X., Jin, F., Regenstein, J. M., Wang, F. (2018). Transglutaminase induced gels using bitter apricot kernel protein: Chemical, textural and release properties. *Food Biosci.*, 26, 15—22. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2018.09.002>.
- Xu, H., Wang, L., Su, H., Gu, L., Han, T., Meng, F., Liu, C. (2014). Making good use of food wastes: Green synthesis of highly stabilized silver nanoparticles from grape seed extract and their antimicrobial activity. *Food Biophys.*, 10, 12—18.

Xu, M., Chen, X., Huang, Z., Chen, D., Li, M., He, J., Chen, H. (2022). Effects of dietary grape seed proanthocyanidin extract supplementation on meat quality, muscle fiber characteristics and antioxidant capacity of finishing pigs. *Food Chem.*, 367, 130781.

Yao, J.-L., Zhang, Q.-A., Liu, M.-J. (2021). Utilization of apricot kernel skins by ultrasonic treatment of the dough to produce a bread with better flavor and good shelf life. *LWT*, 145(2), 111545. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111545>.

Yeung, A. W. K., Mocan, A., Atanasov, A. G. (2018). Let food be thy medicine and medicine be thy food: A bibliometric analysis of the most cited papers focusing on nutraceuticals and functional foods. *Food Chem.*, 269, 455—465. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.139>.

Yilmaz, Y., Toledo, R. T. (2004). Health aspects of functional grape seed constituents. *Trends Food Sci. Technol.*, 15, 422—433. [Google Scholar] [CrossRef].

Zhang, Q.-A., Wei, C.-X., Fan, X.-H., Shi, F.-F. (2018). Chemical compositions and antioxidant capacity of by-products generated during the apricot kernels processing. *CyTA — Journal of Food*, 16(1), 422—428. <https://doi.org/10.1080/19476337.2017.1414077>.

Zhang, H. S., Guo, P. H., Zhang, Q. A., Wu, D. D., Zheng, H. R. (2021). Effects of saturated hot air pretreatment compared to traditional blanching on the physicochemical properties of Apricot (*Prunus armeniaca* L.) kernels and its skin during removing skin. *LWT*, 150, 111947. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111947>.

Zhu, F., Du, B., Zheng, L., Li, J. (2015). Advance on the bioactivity and potential applications of dietary fibre from grape pomace. *Food Chem.*, 186, 207—212. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.057>.

Zúñiga-Muro, N. M., Bonilla-Petriciolet, A., Mendoza-Castillo, D. I., Reynel-Ávila, H. E., Duran-Valle, C. J., Ghalla, H., Sellaoui, L. (2020). Recovery of grape waste for the preparation of adsorbents for water treatment: Mercury removal. *J. Environ. Chem. Eng.*, 8, 103738.

УДК 637.521.4.045:664.38

INNOVATIVE PROTEIN ADDITIVE AS A COMPONENT FOR OPTIMIZING THE FORMULATION OF MINCED MEAT SEMI-FINISHED PRODUCTS

A. Karapetian, <http://orcid.org/0009-0007-7659-5724>

N. Povarova, <http://orcid.org/0000-0003-3630-8384>

Odessa National Technological University

Key words:

Plant proteins
Meat analogues
Environmental sustainability
Technological innovations
Consumer perception

Article history:

Received 12.11.2025
Received in revised form 27.11.2025
Accepted 12.12.2025

Corresponding author:

A. Karapetian

E-mail:

dwa.rbk@gmail.com

Citation: Карапетян А. А., Поварова Н. М. (2025). Інноваційна білкова добавка як елемент оптимізації рецептури рубаних м'ясних напівфабрикатів. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 247—267.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-19

ABSTRACT

In modern conditions of global challenges caused by population growth, climate change, limited natural resources, and ethical issues, the meat industry is undergoing significant transformations. Traditional livestock farming, which forms the basis of meat production, causes considerable environmental impact, including greenhouse gas emissions (14.5% of total anthropogenic emissions), land degradation (70% of agricultural land), and excessive use of water resources (up to 15,000 liters of water per 1 kg of beef). Meanwhile, growing demand for sustainable, ethical, and healthy products, especially among flexitarians, vegetarians, and younger generations, stimulates the development of alternative protein ingredients, particularly plant-based ones, which offer solutions for reducing environmental footprint, ensuring food security, and meeting modern consumer trends.

The article is devoted to analyzing modern plant protein ingredients, their application in the meat industry, technological innovations, market trends, consumer perception, and challenges associated with their implementation. Plant proteins derived from soy, peas, wheat, hemp, sunflower, and pumpkin serve as the foundation for creating meat analogues that mimic the taste, texture, and nutritional value of traditional meat while ensuring economic efficiency and environmental sustainability. Soy isolate (90% protein) is used for burgers and sausages due to its water retention and gel-forming properties. Pea protein, hypoallergenic and rich in amino acids, is ideal for patties. Wheat gluten forms fibrous texture but is limited due to allergies. Hemp and sunflower proteins are distinguished by their solubility and nutritional value. Pumpkin products enhance nutrition and shelf life.

Plant proteins contribute to sustainable production by reducing environmental impact and meeting ethical requirements. Overcoming technological and economic barriers will facilitate their integration into the meat industry.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-19

ІННОВАЦІЙНА БІЛКОВА ДОБАВКА ЯК ЕЛЕМЕНТ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЦЕПТУРИ РУБАНИХ М'ЯСНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ

А. А. Карапетян, <http://orcid.org/0009-0007-7659-5724>

Н. М. Поварова, <http://orcid.org/0000-0003-3630-8384>

Одеський національний технологічний університет

У сучасних умовах глобальних викликів, зумовлених зростанням чисельності населення, зміною клімату, обмеженістю природних ресурсів і етичними питаннями, м'ясна промисловість зазнає значних трансформацій. Традиційне тваринництво, яке є основою м'ясного виробництва, спричиняє значний екологічний вплив, включаючи викиди парникових газів (14,5% від загального обсягу антропогенних викидів), деградацію земель (70% сільськогосподарських угідь) і надмірне використання водних ресурсів (до 15 000 літрів води на 1 кг яловичини). Водночас зростання попиту на сталі, етичні та здорові продукти, особливо серед флекситаріанців, вегетаріанців і молодшого покоління, стимулює розвиток альтернативних білкових інгредієнтів, зокрема рослинних, які пропонують рішення для зниження екологічного сліду, забезпечення продовольчої безпеки та відповідності сучасним споживацьким трендам.

Стаття присвячена аналізу сучасних рослинних білкових інгредієнтів, їхнього застосування в м'ясній промисловості, технологічних інновацій, ринкових тенденцій, споживацького сприйняття та викликів, пов'язаних з їхнім впровадженням. Рослинні білки, отримані із сої, гороху, пшениці, конопель, соняшнику та гарбуза, є основою для створення м'ясних аналогів, які імітують смак, текстуру та поживну цінність традиційного м'яса, забезпечуючи при цьому економічну ефективність й екологічну стійкість. Соевий ізолят (90% білка) використовується для бургерів і ковбас завдяки водоутриманню та гелеутворенню. Гороховий білок, гіпоалергенний і багатий амінокислотами, ідеальний для котлет. Пшеничний глютен формує волокнисту текстуру, але обмежений через алергії. Конопляний і соняшниковий білки вирізняються розчинністю та поживною цінністю. Гарбузові продукти підвищують поживність і термін зберігання.

Рослинні білки сприяють сталому виробництву, знижуючи екологічний вплив і відповідаючи етичним вимогам. Подолання технологічних і економічних бар'єрів сприятиме їх інтеграції в м'ясну промисловість.

Ключові слова: рослинні білки, м'ясні аналоги, екологічна стійкість, технологічні інновації, споживацьке сприйняття.

Постановка проблеми. М'ясна промисловість, що займає одне з провідних місць у структурі світового агропромислового комплексу, стикається з низкою викликів, які зумовлюють необхідність трансформації традиційних підходів до виробництва. Сучасне суспільство, дедалі більше орієнтуючись на принципи сталого розвитку, здорового харчування та екологічної відповідальності, вимагає від виробників м'ясних продуктів адаптації до нових реалій. Зростання чисельності населення планети, що, за прогнозами Організації Об'єднаних Націй, досягне 9,7 млрд

до 2050 р., посилює тиск на продовольчі системи, зокрема на м'ясну галузь, яка має забезпечити достатню кількість високоякісної продукції при обмежених природних ресурсах. Водночас традиційні методи виробництва м'яса, що суттєво залежать від тваринництва, спричиняють значний екологічний вплив, включаючи викиди парникових газів, деградацію земель і надмірне використання водних ресурсів (UNDESA, 2022).

У контексті зазначених проблем особливу увагу привертають сучасні білкові інгредієнти, які розглядаються як перспективна альтернатива традиційному м'ясу тваринного походження. Такі інгредієнти, отримані з рослинних, мікробних або комахових джерел, а також створені за допомогою клітинних технологій, відкривають нові можливості для м'ясної промисловості. Вони дають змогу не лише зменшити залежність від тваринництва, але й оптимізувати виробничі процеси, знижуючи собівартість продукції та підвищуючи її поживну цінність. Наприклад, рослинні білки, отримані з сої, гороху чи пшениці, характеризуються високим вмістом амінокислот, що робить їх привабливими для створення м'ясних аналогів, здатних задовольнити потреби споживачів у смакових і текстурних характеристиках. Проте впровадження таких інгредієнтів супроводжується низкою технологічних, економічних і соціальних викликів, які потребують ретельного аналізу та вирішення.

Одним із ключових питань, що постають перед м'ясною промисловістю, є збереження органолептичних властивостей продуктів, таких як смак, текстура та аромат, при використанні альтернативних білків. Споживачі, звиклі до традиційних м'ясних виробів, часто скептично ставляться до нововведень, що ускладнює ринкову адаптацію інноваційних продуктів. Дослідження, проведене у 2021 р., показало, що близько 60% споживачів у Європі готові спробувати рослинні м'ясні продукти, але лише за умови, що їхня смакова якість не поступатиметься традиційним аналогам (Smart Protein Project, 2021). Крім того, технологічні процеси, необхідні для виробництва альтернативних білків, часто потребують значних інвестицій в обладнання та наукові розробки, що може обмежувати їх доступність для малих і середніх підприємств. Економічний аспект також ускладнюється нестабільністю цін на сировину, наприклад, на сою чи горох, що залежить від кліматичних умов і глобальних ринкових тенденцій.

Не менш суттєвим є питання регуляторного середовища. У різних країнах світу законодавство щодо використання нових білкових інгредієнтів, особливо культивованого м'яса, залишається неоднозначним. Наприклад, у Європейському Союзі впровадження клітинного м'яса гальмується через складні процедури сертифікації та необхідність доведення його безпеки для здоров'я людини (Lanzoni et al., 2024). Водночас країни Азії, такі як Сінгапур, уже в 2020 р. дозволили комерційний продаж культивованого м'яса, що свідчить про значні регіональні відмінності у підходах до регулювання (Lucas, 2020). Такі розбіжності створюють нерівні умови для глобальних виробників і ускладнюють гармонізацію стандартів у м'ясній промисловості.

Ще одним викликом є етичний і культурний вимір. У багатьох суспільствах м'ясо залишається не лише джерелом поживних речовин, але й важливою частиною культурних традицій і гастрономічних практик. Перехід до альтернативних

білків може сприйматися як загроза традиційним цінностям, що вимагає від виробників не лише технологічних, але й комунікаційних зусиль для формування позитивного сприйняття нової продукції. Наприклад, у країнах із високим рівнем споживання м'яса, таких як США чи Бразилія, просування рослинних або культивованих білків потребує значних маркетингових кампаній, спрямованих на зміну споживацьких звичок (Good Food Institute, 2023).

Не менш вагомим є і етичний аспект. Промислове тваринництво часто критикують за умови утримання тварин, що викликає занепокоєння серед споживачів, особливо в країнах із високим рівнем свідомості щодо добробуту. У відповідь на ці виклики м'ясна промисловість інвестує в інновації, зокрема в розробку сучасних білкових інгредієнтів.

Отже, проблема впровадження сучасних білкових інгредієнтів у м'ясну промисловість є багатогранною, охоплює технологічні, економічні, екологічні, регуляторні та соціокультурні аспекти, кожен з яких потребує глибокого аналізу та пошуку збалансованих рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження сучасних білкових інгредієнтів у м'ясній промисловості за останні роки набули значного розмаху, відображаючи зростаючий інтерес до альтернативних джерел білка як відповіді на глобальні виклики продовольчої безпеки, екологічної стійкості та змін у споживацьких уподобаннях.

Провідним напрямком є розробка рослинних білків, які за своїми функціональними властивостями наближаються до тваринних аналогів. У 2018 р. дослідники з Університету Вагенінгена (Нідерланди) опублікували статтю, присвячену текстуруванню рослинних білків за допомогою технології екструзії високої вологості, яка дає змогу створювати волокнисту структуру, подібну до м'яса, що значно покращує органолептичні характеристики кінцевого продукту (Dekkers et al., 2018). Автори зазначають, що соєвий і гороховий білки є найбільш поширеними завдяки їхній доступності та високій поживній цінності, однак для досягнення оптимальної текстури необхідно точно контролювати такі параметри екструзії, як температура, тиск і вміст води. Подальші дослідження, проведені у 2019 р., показали, що додавання мікрокристалічної целюлози до рослинних білків може ще більше покращити їхню текстуру, роблячи її більш схожою на м'язову тканину (Schreuders et al., 2019).

Інший перспективний напрям стосується використання мікробних білків, отриманих із грибів (мікопротеїнів). У статті, опублікованій у журналі *Food Technology*, дослідники проаналізували потенціал мікопротеїнів у створенні м'ясних аналогів. Мікопротеїни, отримані з грибів, вирізняються високим вмістом білка (до 45% сухої маси) і низьким екологічним слідом, що робить їх привабливими для сталого виробництва (Akhtar et al., 2023). Проте автори вказують на проблему обмеженої смакової палітри таких продуктів, що вимагає додаткових досліджень у сфері ароматизації та покращення сенсорних властивостей.

Культивоване м'ясо, створене за допомогою клітинних технологій, стало ще одним фокусом уваги дослідників. У журналі *Nature Food* було опубліковано дослідження, яке аналізує прогрес у масштабуванні виробництва культивованого м'яса. Автори підкреслюють, що ключовим викликом залишається зниження вар-

тості поживних середовищ, які становлять до 80% собівартості кінцевого продукту (Post et al., 2020). У цьому контексті значну увагу приділено розробці рослинних поживних середовищ, які можуть замінити дорогі сироватки тваринного походження.

Комахові білки також набирають популярності як альтернативне джерело поживних речовин. У журналі *Insects* було опубліковано огляд, який підкреслює переваги використання борошняних хробаків (*Tenebrio molitor*) і цвіркунів (*Acheta domestica*) у м'ясній промисловості. Комахи вирізняються високим вмістом білка (до 60% сухої маси) і низьким екологічним впливом порівняно з традиційним тваринництвом (Van Huis, 2022). Однак автори зазначають, що основною перешкодою є психологічний бар'єр у споживачів, особливо в західних країнах, де вживання комах не є частиною культурної традиції.

Окремий блок досліджень присвячено функціональним властивостям білкових інгредієнтів у м'ясних продуктах. У журналі *Meat Science* було опубліковано статтю, яка аналізує вплив рослинних білків на водоутримувальну здатність і текстуру ковбасних виробів. Дослідники встановили, що комбінація горохового білка та картопляного крохмалю дає змогу досягти оптимальної консистенції продукту, знижуючи при цьому вміст жирів (Munialo et al., 2025). Такі комбінації відкривають нові можливості для створення низькокалорійних м'ясних продуктів, що відповідають сучасним дієтичним трендам.

Попри значний прогрес, у літературі залишаються прогалини, які потребують подальшого вивчення. По-перше, більшість досліджень зосереджені на технологічних аспектах, тоді як економічна доцільність і ринкова адаптація альтернативних білків аналізуються недостатньо. По-друге, бракує комплексних досліджень щодо довгострокового впливу вживання нових білкових інгредієнтів на здоров'я людини. Нарешті, регуляторні аспекти, особливо в контексті культивованого м'яса, залишаються недостатньо гармонізованими, що створює бар'єри для глобального впровадження інновацій.

Отже, аналіз сучасних досліджень свідчить про значний потенціал альтернативних білкових інгредієнтів у м'ясній промисловості. Водночас для їх успішної інтеграції необхідно подолати технологічні, економічні та соціокультурні виклики, що вимагає міждисциплінарного підходу та співпраці між науковцями, виробниками та регуляторними органами.

Метою дослідження є аналіз сучасних білкових інгредієнтів рослинного і тваринного походження, потенціалу їхнього використання у м'ясних напівфабрикатах і визначення технологічного рішення щодо формування комплексної добавки для рубаних м'ясних продуктів.

Матеріали та методи. Для проведення аналітичної частини було здійснено комплексне опрацювання сучасних публікацій, що висвітлюють тенденції розвитку технологій застосування рослинного білка як складової удосконалення рецептури м'ясних рубаних напівфабрикатів. Джерельну базу становили наукові статті українських та зарубіжних авторів, оприлюднені у фахових журналах як загального, так і вузькоспеціалізованого профілю.

У процесі відбору інформації були залучені найбільш авторитетні міжнародні платформи наукової комунікації, зокрема Google Scholar і Web of Science, а також

праці, опубліковані провідними іноземними виданнями, що спеціалізуються на інноваціях у сфері харчових технологій.

Викладення основних результатів дослідження. Білкові добавки поділяються на дві основні категорії: тваринного та рослинного походження. Тваринні білки, такі як желатин і колаген, широко застосовуються для покращення текстури та вологоутримання у м'ясних продуктах, зокрема ковбасах та консервах. Желатин, отриманий з колагену, має унікальну здатність утворювати гелі, які стабілізують емульсії, що робить його цінним для виробництва емульсійних продуктів. Гідролізовані білки, отримані шляхом гідролізу м'яса або риби, використовуються як підсилювачі смаку, зв'язувачі або емульгатори завдяки високій розчинності та здатності покращувати органолептичні властивості. М'ясні екстракти, як концентрати м'ясних білків, додають інтенсивний смак і аромат, що особливо важливо для оброблених м'ясних продуктів.

Рослинні білки, натомість, стають дедалі популярнішими через їх екологічну стійкість і доступність. Ринок рослинних м'ясних продуктів демонструє стрімке зростання, що зумовлене зміною споживчих уподобань і технологічними інноваціями. Згідно з даними GlobeNewswire («Plant based meat market size», 2025), глобальний ринок рослинного м'яса оцінюється в 10,2 млрд дол. США у 2025 р. і, за прогнозами, досягне 45 млрд дол. до 2034 р. з річним темпом зростання (CAGR) 17,9%. У 2023 р. ринок оцінювався в 9,2 млрд дол. США, а до 2032 року прогнозується зростання до 35,1 млрд дол. США з CAGR 18,5% (Ali, & Bharali, 2025).

Білкові добавки відіграють ключову роль у сучасній харчовій промисловості, забезпечуючи зручний спосіб підвищення споживання білка, необхідного для підтримки м'язової маси, імунної системи та загального метаболізму. Популярність таких продуктів зростає серед спортсменів, веганів, вегетаріанців та осіб, які прагнуть покращити стан шкіри, суглобів чи загальне здоров'я.

Білкові добавки, представлені переважно порошками, батончиками чи готовими напоями, виготовляються з тваринних або рослинних джерел. Тваринні білки, зокрема сироватковий білок, казеїн і колаген, вирізняються високою біологічною цінністю та повноцінним амінокислотним складом. Сироватковий білок, наприклад, широко застосовується для прискорення відновлення м'язів після фізичних навантажень, тоді як колаген сприяє здоров'ю шкіри, суглобів і зв'язок (Avila Rodríguez et al., 2018).

Останніми роками попит на рослинні білки зростає через поширення веганських дієт і алергії на молочні продукти. Соевий, гороховий, рисовий білки, а також білки з насіння льону, коноплі чи соняшнику стають дедалі популярнішими. Рослинні джерела не лише забезпечують білок, але й містять волокна, омега-3 жирні кислоти та антиоксиданти, що підвищує їхню харчову цінність. Наприклад, насіння льону сприяє зниженню рівня холестерину та підтримує серцево-судинне здоров'я завдяки високому вмісту альфа-ліноленової кислоти (Goyal et al., 2014).

Яловичий колаген, отриманий із шкіри та кісток великої рогатої худоби, є джерелом колагену типів I та III, які становлять основу сполучних тканин людини. У гідролізованій формі колаген легко засвоюється, сприяючи покращенню еластичності шкіри, зменшенню зморшок і підтримці здоров'я суглобів. Щоденне споживання 2,5 г колагенового пептидного комплексу протягом 12 тижнів значно покращило гідратацію шкіри та зменшило зморшки у 72 здорових жінок віком від 35

років (Evans et al., 2021). Крім того, колагенові добавки продемонстрували ефективність у зменшенні болю в суглобах і покращенні рухливості, що робить їх цінними для осіб з остеоартритом. Завдяки повноцінному амінокислотному профілю, яловичий колаген є цінним компонентом білкових добавок. Колаген, отриманий з тваринних джерел, містить близько 90% білка, але не є повноцінним через відсутність триптофану (табл. 1).

Таблиця 1. Склад і вміст есенціальних амінокислот у колагені

Компонент	Вміст (%)	Есенціальні амінокислоти (г/100 г)
Білок	90	Гістидин: 0,5
Ліпіди	0	Ізолейцин: 1,0
Вуглеводи	0	Лейцин: 2,5
Зола	5	Лізин: 3,0
		Метіонін: 0,5
		Фенілаланін: 1,5
		Триптофан: 0,0
		Треонін: 2,0
		Валін: 2,0

Джерело: Fitaudit, 2025.

У м'ясопереробній промисловості яловичий колаген застосовується як функціональна добавка для покращення текстури, зв'язування вологи та зменшення втрат маси під час приготування. Дослідження, проведене у 2019 р., оцінило використання двох типів яловичого колагену (волокнистого та порошкового) у рецептурах гамбургерів (Alexandretti et al., 2019). Волокнистий колаген мав молекулярну масу 100 кДа, вміст білка 97,81 г/100 г і міцність гелю 146,315 Па, тоді як порошковий колаген мав молекулярну масу 50—100 кДа, вміст білка 96,87 г/100 г і міцність гелю 91,888 Па. У дослідженні тестувалися формули з різними масовими частками колагену та флокулюючого соєвого білка:

T1: 0,75% волокнистого колагену, 3,25% соєвого білка;

T2: 1,5% волокнистого колагену, 2,5% соєвого білка;

T3: 0,75% порошкового колагену, 3,25% соєвого білка;

T4: 1,5% порошкового колагену, 2,5% соєвого білка;

Стандарт: 4,0% соєвого білка (без колагену).

Результати показали, що додавання 1,5% колагену (T2 і T4) збільшило вміст білка (T2: 17,7%, T4: 17,8% проти стандарту 16,93%) і вологи (T2: 68,0%, T4: 67,8% проти стандарту 67,6%). Вміст гідроксипроліну, маркера колагену, був значно вищим у формулах з колагеном, особливо у T4 (0,77 г/100 г, що в 4,8 раза більше, ніж у стандарті). Колаген також зменшував втрати маси під час термічної обробки завдяки своїм гелеутворюючим і водозв'язуючим властивостям. Сенсорний аналіз показав, що формула T3 (0,75% порошкового колагену) отримала найвищі оцінки за зовнішній вигляд (6,1), колір (5,92), запах (5,9), смак (6,2), текстуру (6,3) і загальну прийнятність (7,3 за 9-бальною шкалою, 81% прийнятності).

Соєві білки, зокрема соєвий ізолят білка та текстурований соєвий білок, є лідерами у цій категорії. Соя є одним із найпоширеніших джерел рослинного білка

завдяки високому вмісту білка (близько 40% у сухій масі) та відмінним функціональним властивостям, таким як здатність утримувати воду, емульгувати та формувати гелі. Соеві ізоляти, що містять до 90% білка, і концентрати, з вмістом білка близько 70%, широко застосовуються для створення продуктів, що імітують текстуру та зовнішній вигляд м'яса, таких як бургери, ковбаси та фарш (Seideman et al., 1977). Соевий білок також цінується за свою економічну ефективність, оскільки ціна за грам білка становить приблизно 0,01 дол. США, що значно нижче, ніж для тваринних білків (Rubio et al., 2020). Соевий ізолят використовується для зв'язування води та стабілізації емульсій, тоді як текстурований соєвий білок імітує волокнисту структуру м'яса, що робить його ідеальним для рослинних аналогів, таких як веганські бургери та ковбаси.

Соевий білок є одним із найпоширеніших рослинних білків завдяки високому вмісту амінокислот і функціональним властивостям. Ізолят соєвого білка містить приблизно 80% білка, що робить його ідеальним для м'ясних аналогів (табл. 2).

Таблиця 2. Склад і вміст есенціальних амінокислот в ізоляті соєвого білка

Компонент	Вміст (%)	Есенціальні амінокислоти (г/100 г)
Білок	80,69	Гістидин: 2,303
Ліпіди	3,39	Ізолейцин: 4,253
Вуглеводи	7,36	Лейцин: 6,783
Зола	~4	Лізин: 5,327
		Метіонін: 1,130
		Фенілаланін: 4,593
		Триптофан: 1,116
		Треонін: 3,137
		Валін: 4,098

Джерело: Fatsecret, 2025.

Соевий білок, завдяки універсальним функціональним властивостям, є одним з найпоширеніших інгредієнтів у м'ясній промисловості. Здатність білка утримувати воду, емульгувати жири та формувати гелі робить його незамінним як для рослинних, так і для традиційних м'ясних продуктів. У рослинних аналогах м'яса, таких як бургери, ковбаси та фарші, соєвий білок, зокрема у формі текстурованого рослинного білка (TVP), дає змогу створювати волокнисту структуру, що нагадує м'язову тканину. Технологія ж екструзії високої вологості забезпечує текстуру, яка за органолептичними характеристиками наближається до м'яса, що підтверджується дослідженнями (Dekkers et al., 2018).

У традиційних м'ясних продуктах, таких як ковбаси, паштети та гамбургери, соєвий білок використовується як зв'язуючий агент і емульгатор. Відтак дослідження показало, що додавання 1,5% соєвого ізоляту до м'ясних гамбургерів збільшує вміст вологи на 2% і знижує втрати маси на 5% під час термічної обробки, що сприяє економії сировини та покращенню соковитості (Alexandretti et al., 2019). Економічна ефективність соєвого білка, з вартістю приблизно 0,01 дол. США за грам, робить його привабливим для виробників, які прагнуть оптимізувати витрати без втрати якості (Rubio et al., 2020). Крім того, соєвий білок збагачує продукти

ізофлавонами, які можуть мати позитивний вплив на здоров'я, зокрема на серцево-судинну систему.

Гороховий білок, отриманий із жовтого гороху, набуває популярності завдяки нейтральному смаку, гіпоалергенним властивостям і високому вмісту розгалужених амінокислот, таких як лейцин, які важливі для м'язового синтезу. Здатність горохового білка формувати волокнисті структури робить його ідеальним для створення м'ясних аналогів, таких як котлети та стейки. Гороховий білок також є екологічно стійким, оскільки вирощування гороху потребує менше води та землі порівняно з іншими культурами. В останні роки гороховий білок став основним інгредієнтом для багатьох провідних брендів, таких як Beyond Meat, завдяки його універсальності та споживчій привабливості. Гороховий білок завдяки високій харчовій цінності використовується для водоутримування та емульгуючих властивостей, що робить його привабливим для виробництва функціональних м'ясних продуктів.

Гороховий білок набуває популярності завдяки нейтральному смаку та високому вмісту лізину. Його ізолят містить близько 80% білка, що робить цей білок цінним для рослинних м'ясних продуктів (табл. 3).

Таблиця 3. Склад і вміст есенціальних амінокислот в ізоляті горохового білка

Компонент	Вміст (%)	Есенціальні амінокислоти (г/100 г)
Білок	80	Гістидин: 1,6
Ліпіди	2	Ізолейцин: 2,3
Вуглеводи	3	Лейцин: 5,7
Зола	5	Лізин: 4,7
		Метіонін: 0,3
		Фенілаланін: 3,7
		Триптофан: 0,8
		Треонін: 2,5
		Валін: 2,7

Джерело: Gorissen et al., 2018.

Гороховий білок набуває популярності завдяки нейтральному смаку, високому вмісту лізину та екологічній стійкості. Ізолят, що містить 80—90% білка, є ідеальним для створення рослинних м'ясних аналогів, таких як котлети, стейки та ковбаси. Завдяки технології екструзії високої вологості гороховий білок формує волокнисту структуру, що імітує м'ясо. Це робить його головним інгредієнтом у продуктах таких брендів, як Beyond Meat (Schreuders et al., 2019). Дослідження показало, що як базовий білковий інгредієнт тваринного походження використовували свинину та шпик, натомість як альтернативне джерело білка — ізолят білка гороху. Дослідні зразки формували шляхом поступового заміщення м'яса на 12,5%, 25%, 37,5% і 50%. Для забезпечення оптимальних функціональних властивостей ізолят перед використанням гідратували у співвідношенні 1:3 (білок:вода) протягом пів години. Заміна свинячого м'яса ізолятом білка гороху продемонструвала низку помітних змін у хімічному складі, структурно-механічних властивостях, кольорі та органолептичних характеристиках консервованих паштетів. При зростанні частки

рослинного білка в рецептурі до 50% спостерігалася тенденція до підвищення вологості продукту, зокрема значуще зростання було зафіксовано в зразку з найвищим рівнем заміщення. Це, найімовірніше, обумовлено здатністю гідратованого білка гороху утримувати додану воду, компенсуючи відсутність м'ясного соку.

Водночас рівень загального білка в продукті залишився стабільним у межах 16,1—17,4%, що свідчить про ефективне збереження поживної цінності навіть при суттєвому зменшенні кількості м'ясної сировини. Також не було виявлено істотних змін у вмісті жиру чи золи, що підтверджує збалансованість рецептур при модифікації.

Показники активності води залишалися на сталому рівні (близько 0,97), незалежно від рівня заміщення. Це, власне, свідчить про те, що ізолят білка гороху не поступається м'ясу у здатності зв'язувати вільну вологу, що важливо для стабільності мікробіологічних характеристик готового продукту. Натомість рН зразків поступово зростав із підвищенням вмісту ізоляту, що пояснюється природною лужною реакцією горохового білка. Таке підвищення, у свою чергу, позитивно впливало на технологічні властивості продукту, зокрема на емульгування і стабільність структури (Trindade et al., 2022).

У традиційних м'ясних продуктах гороховий білок покращує водоутримувальну здатність і стабільність емульсій, що є критично важливим для ковбас і консервів. Наприклад, додавання горохового білка в комбінації з картопляним крохмалем до ковбасних виробів знижує вміст жиру на 10%, зберігаючи при цьому текстурні характеристики (Munialo et al., 2025). Екологічна перевага горохового білка полягає в меншій потребі у воді та землі порівняно з іншими культурами, що сприяє сталому розвитку (Shanthakumar et al., 2022). Високий вміст розгалужених амінокислот, таких як лейцин, робить його цінним для спортивного харчування та здорового способу життя.

Пшенична клейковина цінується за свою здатність створювати волокнисту текстуру, що нагадує м'ясо. Вона часто використовується у вегетаріанських продуктах, таких як котлети та шніцелі, завдяки своїй еластичності та міцності. Пшенична клейковина, завдяки своїй еластичності, застосовується для створення волокнистої структури у текстурованих продуктах, що досягається через такі процеси, як екструзія з високою вологістю (табл. 4).

Таблиця 4. Склад і вміст есенціальних амінокислот у пшеничній клітковині

Компонент	Вміст (%)	Есенціальні амінокислоти (г/100 г)
Білок	13—18	Гістидин: 1,71
Ліпіди	1,5	Ізолейцин: 2,93
Вуглеводи	55—60	Лейцин: 5,37
Зола	5—7	Лізин: 1,52
		Метіонін: 1,16
		Фенілаланін: 4,23
		Триптофан: 0,65
		Треонін: 2,15
		Валін: 3,16

Джерело: Feedtables, 2025.

Пшенична клітковина, відома як сеїтан, є основою для створення рослинних м'ясних аналогів завдяки своїй унікальній еластичності. При гідратації та механічній обробці сеїтан формує еластичну мережу, що дає змогу створювати продукти з текстурою, подібною до м'яса, такі як котлети, шніцелі та стейки. Дослідження підтверджують, що сеїтан із пшеничної клітковини має текстурні характеристики, подібні до курячого м'яса, що робить його популярним серед вегетаріанців (Wieser, 2023). У традиційних м'ясних продуктах глютен використовується як зв'язуючий агент, що покращує текстуру та знижує втрати вологи.

Однак використання пшеничного сеїтану обмежене для споживачів із целіакією або чутливістю до глютену, що вимагає розробки альтернативних інгредієнтів. Незважаючи на це, його здатність створювати м'ясоподібну текстуру залишається неперевершеною в рослинному сегменті.

Насіння льону є джерелом рослинного білка, розчинних волокон і омега-3 жирних кислот, зокрема альфа-ліноленової кислоти (ALA). Текстурована форма льону є білковим ізолятом або концентратом, який покращує текстурні властивості продуктів, таких як напої, батончики чи вегетаріанські аналоги м'яса. Встановлено, що 12-тижневе споживання 10 г льону, доданого до печива, значно знизило загальний холестерин на 36,9 мг/дл і ЛПНЩ на 21 мг/дл, а також підвищило ЛПВЩ на 6,0 мг/дл (Nowak, & Jeziorek, 2023). Льон також сприяє регуляції рівня цукру в крові та підтримує травлення завдяки високому вмісту волокон («Flaxseed: 8 health benefits», 2021). Протизапальні властивості та багатий нутрієнтний склад роблять льон важливим інгредієнтом. Нутрієнтний профіль льону робить його перспективним для білкових добавок (табл. 5).

Таблиця 5. Склад і вміст есенціальних амінокислот у лляному насінні

Компонент	Вміст (%)	Есенціальні амінокислоти (г/100 г)
Білок	20,0	Гістидин: 0,6
Ліпіди	42,0	Ізолейцин: 0,9
Вуглеводи	28,0	Лейцин: 1,2
Зола	3,9	Лізин: 0,9
		Метіонін: 0,4
		Фенілаланін: 1,0
		Триптофан: 0,3
		Треонін: 0,8
		Валін: 1,1

Джерело: Oomah, & Mazza, 1993.

Важливе дослідження опубліковано в British Journal of Nutrition у 2009 році. Вчені вивчали ефекти 12-тижневого перорального прийому лляної олії на властивості шкіри у жінок із чутливою та сухою шкірою. У рандомізованому, подвійному сліпому, плацебо-контрольованому дослідженні брали участь 45 жінок віком від 18 до 65 років, розподілених на три групи по 15 осіб. Учасниці однієї з груп отримували лляну олію, багату на АЛК. Результати показали значне зменшення чутливості шкіри, шорсткості та лущення, а також покращення гідратації та гладкості шкіри порівняно з плацебо. Ці зміни свідчать про позитивний вплив лляної олії на

здоров'я шкіри, що може бути пов'язано зі стимуляцією синтезу колагену або підтримкою його функції, хоча прямі вимірювання рівня колагену не проводилися (De Spirt et al., 2009). Автори припускають, що омега-3 жирні кислоти, зокрема АЛК, зменшують запалення та окислювальний стрес, що сприяє збереженню колагенових волокон.

Крім того, льон містить вітаміни та мінерали, такі як вітамін Е, магній і цинк, які підтримують синтез колагену шляхом активації ферментів, необхідних для формування колагенових волокон (Goyal et al., 2014). Наприклад, цинк відіграє роль у стабілізації колагенової матриці, а магній сприяє клітинному відновленню, що є важливим для здоров'я шкіри.

Також оцінено вплив додавання холодного меленого лляного порошку до м'ясної суміші (Yogesh et al., 2015). Результати показали, що при вмісті 5% лляного порошку продукт залишався помірно прийнятним, але вищі концентрації знижували сенсорні оцінки через специфічний запах і текстуру. Зокрема, запах продуктів із вищим вмістом льону нагадував фарбу або рибу через деградацію поліненасичених жирних кислот під час обробки. Власне, це обмежує використання текстурованого льону в традиційних м'ясних продуктах, але поживні властивості роблять його перспективним для функціональних продуктів.

Льон також використовується у годівлі тварин, що може впливати на якість м'яса. Так, додавання 8% льону до раціону корів збільшило вміст омега-3 жирних кислот у м'ясі, покращуючи його поживну цінність (Maddock et al., 2006).

Додавання лляного білка до м'ясних продуктів сприяє їхньому нутриціологічному збагаченню. Лляний білок є джерелом високоякісного білка, який містить усі незамінні амінокислоти, хоча його амінокислотний профіль обмежений нижчим вмістом метіоніну. Його поєднання з іншими білками, такими як соєвий чи гороховий, дає змогу створити повноцінний продукт. Крім того, лляний білок багатий на омега-3 жирні кислоти, зокрема АЛА, яка підтримує здоров'я серцево-судинної системи. Дослідження (Oomah, 2001) довело, що додавання лляного борошна до м'ясних продуктів підвищує вміст АЛА на 10%, що робить їх функціональними продуктами для здоров'яспрямованих споживачів.

Лляний білок також містить волокна, які сприяють травленню, та антиоксиданти, такі як лігнани, які знижують ризик серцево-судинних захворювань, що, власне, і робить його цінним для розробки м'ясних продуктів, які відповідають сучасним дієтичним трендам.

Конопляне насіння вирізняється повноцінним білковим складом, що включає всі незамінні амінокислоти, а також високим вмістом омега-3, омега-6 жирних кислот і мінералів, таких як магній і цинк. Текстурована конопля підходить для створення продуктів із м'ясоподібною текстурою або як добавка до смузі чи йогуртів. Її нейтральний смак і відсутність алергенів роблять коноплю ідеальним вибором для веганських добавок (House et al., 2010). В огляді Cerino та співавторів підкреслюється, що конопляні продукти, включаючи білкові порошки, сприяють здоров'ю серцево-судинної системи та зменшенню запальних процесів (Cerino et al., 2021). Також доведено антиоксидантні властивості конопляного білка, які захищають ор-

ганізм від окислювального стресу (Zhang et al., 2022). Конопляний білок є привабливим для веганів через нейтральний смак і відсутність алергенів, характерних для молочних чи соєвих білків.

Конопляний білок є повноцінним білком із високим вмістом аргініну, але його вміст в ізоляті може бути нижчим (близько 51%) (табл. 6).

Таблиця 6. Склад і вміст есенціальних амінокислот у ізоляті коноплі

Компонент	Вміст (%)	Есенціальні амінокислоти (г/100 г)
Білок	51	Гістидин: 1,1
Ліпіди	5	Ізолейцин + Лейцин: 5,21
Вуглеводи	5	
Зола	3	Лізин: 2,5
		Метіонін + цистеїн: 5,49
		Фенілаланін + Тирозин: 9,63
		Триптофан: 0,22
		Треонін: 1,3—3,3
		Валін: 4,53

Джерело: El-Sohaimy et al., 2001.

У дослідженні (Zahari et al., 2023) оцінено високоміцні м'ясні аналоги (НММА) з концентрату білка конопляного насіння (НПС) у поєднанні з пшеничним глютенном (WG) і білком нуту (CPC) Зразки з співвідношенням 90:10 (НПС:WG) показали вищу твердість, пружність, жувальність і зрізну силу порівняно з іншими формулами. Сенсорні оцінки підтвердили хорошу прийнятність продуктів із високим вмістом НПС. Це свідчить про потенціал текстурованої коноплі для створення м'ясоподібних текстур у веганських продуктах.

У (Yano, & Fu, 2023) підкреслюється, що конопляний білок може замінити соєвий у м'ясних аналогах без втрати якості завдяки високій температурі денатурації та здатності формувати ламінарну волокнисту структуру У традиційній м'ясопереробці конопляне борошно може використовуватися як наповнювач для підвищення вмісту білка.

Соняшникове насіння містить до 20% білка та є джерелом мінералів, таких як магній, фосфор і залізо. Згідно з даними Healthline, соняшникове насіння може знижувати рівень цукру в крові та сприяти здоров'ю серця завдяки вмісту білка, волокон і здорових жирів («Sunflower seeds: Nutrition», 2023). Відсутність алергенів, характерних для сої, робить його привабливим для широкої аудиторії.

Соняшникове насіння переважно вирощується для виробництва олії, але шрот, що залишається після екстракції, є багатим джерелом білка, з вмістом 17—22% сирого білка (Gassmann, 1983). Соняшниковий білок привабливий для харчової промисловості, оскільки не містить значної кількості антиживильних факторів, на відміну від деяких інших рослинних джерел, таких як соя. Амінокислотний склад соняшnikового білка відповідає вимогам FAO для людського харчування, за винятком дещо нижчого вмісту лізину.

Основні білкові фракції — альбуміни та глобуліни, надають соняшниковому білку високу розчинність, що робить його придатним для різних технологічних

процесів. Дослідження показують, що він має помірну водоутримуючу здатність, подібну до комерційних соєвих ізолятів, і добре підходить для використання як загусник (Kyriakopoulou et al., 2021). Крім того, соняшниковий білок демонструє хорошу стабільність емульсій і пін, що порівнюється із соєвим білком та альбуміном сироватки крові, особливо при рН 4—5 з застосуванням тепла.

Таблиця 7. Склад і вміст есенціальних амінокислот у ядрах соняшnikового насіння

Компонент	Вміст (%)	Есенціальні амінокислоти (г/100 г)
Білок	20,78	Гістидин: 0,632
Ліпіди	51,46	Ізолейцин: 1,139
Вуглеводи	20	Лейцин: 1,659
Зола	3,02	Лізин: 0,937
		Метіонін: 0,494
		Фенілаланін: 1,169
		Триптофан: 0,348
		Треонін: 0,928
		Валін: 1,315

Джерело: Fitaudit, 2025.

Такі властивості роблять соняшниковий білок особливо цінним для емульсійних м'ясних продуктів, таких як ковбаси, де стабільність емульсій критично важлива.

Соняшниковий білок має широкий спектр застосувань як у традиційних м'ясних продуктах, так і в рослинних аналогах. У рослинних м'ясних аналогах, які останнім часом набувають популярності, соняшниковий білок використовується для імітування текстури та відчуттів у роті, характерних для м'яса. Дослідження, опубліковані в ScienceDirect, підтвердили, що концентрати соняшnikового білка можна ферментувати та екструдувати за допомогою високоволового екструдування (НМЕР), що дає змогу утворювати волокнисті структури, схожі на м'язові волокна. Цей процес також зменшує вміст хлорогенової кислоти, антиживильного фактора, і підвищує вміст вільних амінокислот, що покращує смакові характеристики та поживність (Pögi et al., 2023).

Ферментація, за якою слідує зміна рН до нейтрального, допомагає зменшити кислий смак, який може виникати, і сприяє формуванню фібрилярних структур, що важливо для текстури. Наприклад, м'ясні аналоги, виготовлені на основі ферментованого соняшnikового білка з нейтральним рН, показали покращені органолептичні властивості, такі як колір, запах і структура, за оцінками тренованих сенсорних панелей.

Текстурований соняшниковий білок використовується в напоях, закусках чи аналогах м'яса через його функціональні властивості, такі як здатність утворювати емульсії (Zoumpoulakis et al., 2017).

У традиційних м'ясних продуктах соняшниковий білок може бути використаний для покращення функціональних властивостей, таких як зв'язуюча здатність і текстура. Його гелююча здатність, особливо після ультразвукової обробки при 95 °C з подальшим охолодженням до 25 °C, сприяє формуванню міцних гелів, що

можуть бути корисними для перероблених м'ясних продуктів, таких як фарші чи реструктуровані м'ясні вироби (Kyriakopoulou et al., 2021).

Процес виробництва текстурованого соняшникового білка включає подрібнення насіння, вилучення білка та екструзію для створення м'ясоподібної текстури. Соняшниковий білок має високу водо- і жиропоглинаючу здатність, що робить його придатним для використання у м'ясних продуктах (Qin et al., 2021). У веганських продуктах, таких як Sunflower Hache, текстурований соняшниковий білок імітує текстуру меленого м'яса.

Комбінація зазначених інгредієнтів дає змогу створити універсальний продукт, що відповідає різним дієтичним потребам. Поєднання тваринного та рослинних джерел білка забезпечує широкий амінокислотний профіль. Колаген підтримує сполучні тканини, льон сприяє здоров'ю серця, конопля забезпечує повноцінний білок, а соняшник вирізняється універсальністю. Текстуровані рослинні білки додають приємну консистенцію, а використання рослинних інгредієнтів сприяє сталому розвитку («Sustainable protein sources», 2022).

Обробка соняшникового білка пов'язана з певними труднощами, зокрема проблемами з кольором, які виникають через занадто подрібнені частинки темної шкірки та поліфенольні кислоти, що легко окислюються і перетворюються на коричневі полімери (Kyriakopoulou et al., 2021). Для вирішення подібних проблем необхідно забезпечити щонайменше 98% облучування перед обробкою, а також розділити поліфенольні кислоти або запобігти їх окисленню, наприклад, шляхом коригування pH під час екстракції.

Іншим аспектом є необхідність оптимізації методів екстракції для збереження функціональних властивостей, таких як емульгуюча та гелююча здатність. Дослідження вказують, що м'яко фракціоновані інгредієнти, які містять білки, полісахариди та олійні тіла, демонструють задовільну емульгуючу продуктивність без необхідності високої чистоти білка, що може знизити витрати виробництва (Kyriakopoulou et al., 2021).

Гарбуз (*Cucurbita* spp.) є універсальною рослиною, яка завдяки своїм поживним і функціональним властивостям набуває популярності в харчовій промисловості. У м'ясопереробній галузі гарбуз і його побічні продукти, такі як м'якоть, насіння та порошок, використовуються для покращення якості м'ясних виробів, зокрема їхньої текстури, поживної цінності й терміну зберігання. Окрім прямого додавання до м'ясних продуктів, відходи гарбуза застосовуються як корм для тварин, що опосередковано впливає на якість м'яса. Гарбуз у різних формах — м'якоть, насіння, порошок, застосовується у м'ясних продуктах для досягнення функціональних і поживних цілей.

Гарбузовий білок (близько 60%) є новим інгредієнтом з перспективними функціональними властивостями (табл. 8).

Дослідження, проведене (Zargar et al., 2014), оцінювало вплив додавання м'якоті гарбуза до курячих ковбас на їхні фізико-хімічні, сенсорні та зберігальні характеристики. М'якоть додавали у пропорціях 6%, 12% та 18%, замінюючи частину м'яса. Результати показали, що рівень 12% є оптимальним, оскільки він значно підвищує вміст вологості (з 63,11% до 66,82%) та грубої клітковини (з 0,72% до 1,11%), зберігаючи високу сенсорну прийнятність (оцінка 7,40 за 8-бальною

шкалою). Водночас рН, стабільність емульсії та вихід при варінні дещо знижувалися. Ковбаси з 12% гарбуза залишалися придатними до споживання протягом 14 днів при зберіганні за температури 4 ± 1 °С, що свідчить про потенціал гарбуза як інгредієнта для створення волокнистих і поживних м'ясних продуктів.

Таблиця 8. Склад і вміст есенціальних амінокислот у гарбузовому насінні

Компонент	Вміст (%)	Есенціальні амінокислоти (г/100 г)
Білок	60	Гістидин: 1,48
Ліпіди	6	Ізолейцин: 3,03
Вуглеводи	11	Лейцин: 4,78
Зола	5	Лізин: 2,35
		Метіонін: 1,29
		Фенілаланін: 3,34
		Триптофан: 2,93
		Треонін: 1,87
		Валін: 3,31

Джерело: Omega Nutrition, 2025.

У 2023 р. дослідники вивчали вплив порошку з насіння гарбуза (PSP) на стабільність зберігання волокнистих курячих м'ясних нагетсів (Rani et al., 2024). PSP додавали у концентраціях 3%, 6% та 9%. Ньюги з PSP демонстрували нижчі значення TBARS (індикатор окислення жирів) порівняно з контрольними зразками, що вказує на антиоксидантні властивості гарбузового насіння. Продукти залишалися мікробіологічно безпечними до 12-го дня зберігання при 4 ± 1 °С. Вказане дослідження підкреслює здатність гарбуза подовжувати термін придатності м'ясних продуктів завдяки своїм біоактивним сполукам, таким як токофероли та фенольні сполуки.

У (Longato et al., 2017) аналізували додавання борошна з насіння гарбуза до курячих бургерів. Встановлено, що борошно покращує стабільність продуктів під час зберігання, зменшуючи окислення та зберігаючи якість, що дає змогу використовувати гарбуз як альтернативу традиційним жировим компонентам, що є важливим для створення здорових м'ясних продуктів із тривалим терміном придатності.

У 2020 р. дослідники вивчали використання борошна з насіння гарбуза у низькожирних яловичих фрикадельках. Борошно додавали для заміни жиру, що призвело до підвищення вмісту клітковини та зниження загального вмісту жиру. Такі фрикадельки мали покращену поживну цінність, що відповідає сучасним тенденціям здорового харчування. Дослідження демонструє потенціал гарбуза як функціонального інгредієнта для розробки продуктів із зниженим вмістом калорій (Öztürk, & Turhan, 2020).

Вплив сушеної м'якоти та насіння гарбуза на якість яловичих котлет оцінювали у (Serdaroğlu et al., 2018). Додавання цих компонентів не змінило текстурних властивостей, але зменшило вміст вологості, що свідчить про можливість використання гарбуза для модифікації складу м'ясних продуктів без значного впливу на їхню структуру, що є важливим для збереження традиційних органолептичних характеристик.

У 2022 р. дослідники вивчали додавання порошку гарбуза до яловичини для покращення стабільності емульсій. Порошок значно підвищував стабільність емульсій, що є критичним для виробництва оброблених м'ясних продуктів, таких як ковбаси та паштети. Дослідження підкреслює функціональні властивості гарбуза у м'ясопереробці (Unal et al., 2022).

Наукові дослідження підтверджують, що гарбуз є перспективним інгредієнтом у м'ясопереробній промисловості. Його додавання до м'ясних продуктів сприяє підвищенню вмісту клітковини, зниженню жиру та подовженню терміну зберігання завдяки антиоксидантним властивостям. М'якоть, насіння та порошок гарбуза використовуються для створення здорових і функціональних продуктів, таких як ковбаси, котлети та фрикадельки. Однак високі концентрації гарбуза можуть впливати на смак і текстуру, що вимагає подальших досліджень для оптимізації рецептур (Gavril et al., 2024).

Яловичий колаген, текстурований льон, текстурована конопля та текстуроване насіння соняшнику мають значний потенціал у м'ясопереробній промисловості. Колаген покращує текстуру та поживну цінність традиційних м'ясних продуктів, тоді як рослинні інгредієнти більше застосовуються у веганських аналогах, хоча можуть використовуватися як наповнювачі.

Кожен білок має унікальні взаємодоповнюючі функціональні характеристики. Соевий білок забезпечує вологозв'язуючу здатність і емульгуючу активність, що ідеально для ковбас і паштетів, гороховий білок формує волокнисту структуру, що підходить для м'ясних аналогів, сеїтан надає еластичність і зв'язуючу здатність, що важливо для реструктурованих продуктів, конопляний білок стабілізує текстуру і додає поживну цінність, гарбузовий білок має антиоксидантні властивості, що подовжують термін зберігання.

Кожен білок має унікальний амінокислотний склад, який може бути неповноцінним у певних аспектах. Соевий білок багатий на лізин, але дефіцитний у метіоніні, тоді як гороховий білок має високий вміст лізину, але низький — метіоніну. Пшеничний білок містить значну кількість глутаміну та проліну, але бракує лізину. Конопляний білок же є повноцінним, але концентрація деяких амінокислот нижча порівняно з тваринними білками. Гарбузовий білок багатий на аргінін, але потребує комбінування для повноцінності. Колаген, хоча й неповноцінний через відсутність триптофану, збагачує продукти гліцином і проліном. Поєднання зазначених білків дає змогу створити продукт із збалансованим амінокислотним профілем, що відповідає вимогам FAO для людського харчування (Gorissen et al., 2018).

Розробка комплексної білкової добавки, яка поєднує соєвий, гороховий, пшеничний, конопляний, гарбузовий білки та колаген, є стратегічним рішенням для вирішення технологічних і нутриціологічних викликів м'ясної промисловості. Такий підхід дозволяє поєднати переваги кожного інгредієнта, компенсуючи їхні недоліки та створюючи продукт з оптимальними характеристиками. Комплексна добавка збагачує продукти не лише амінокислотами, але й додатковими поживними речовинами, спрощує виробничі процеси, оскільки поєднує різні функціональні властивості в одному інгредієнті. Наприклад, соєвий і гороховий білки забезпечують емульгування, пшеничний білок — еластичність, а колаген — гелеутворення. Це знижує потребу в додаткових добавках і оптимізує витрати (Kyriakopoulou et

al., 2021). Крім того, використання комплексної добавки дає змогу стандартизувати якість продукції, що є важливим для масштабного виробництва.

Висновки

Проведене дослідження висвітлює значний потенціал рослинних білкових інгредієнтів у трансформації м'ясної промисловості, що зумовлено глобальними викликами, такими як зростання чисельності населення, екологічні проблеми та зміна споживацьких уподобань. Рослинні білки, отримані із сої, гороху, пшениці, конопель, соняшнику та гарбуза, виступають ефективною альтернативою традиційному м'ясу, забезпечуючи зниження екологічного навантаження завдяки меншій потребі у воді, землі та енергії порівняно з тваринництвом.

Функціональні властивості цих інгредієнтів дають змогу створювати продукти, що імітують смак, текстуру та поживну цінність м'яса. Соевий ізолят вирізняється економічною вигодою та здатністю утримувати вологу, формувати гелі, що робить його основою для веганських бургерів і ковбас. Гороховий білок, завдяки нейтральному смаку та багатому амінокислотному складу, ідеально підходить для котлет і стейків. Пшенична клейковина забезпечує волокнисту структуру, хоча алергенні властивості обмежують його застосування. Конопляний і соняшниковий білки, універсальні за своєю природою, знаходять місце у веганських аналогах і як добавки, збагачуючи продукти поживними речовинами. Гарбузові продукти підвищують поживну цінність і подовжують термін зберігання завдяки антиоксидантним властивостям.

Ринковий попит на рослинні м'ясні продукти стрімко зростає, чому сприяють зміни у споживацьких звичках, зокрема серед тих, хто обирає флекситаріанські чи веганські дієти. Однак високі витрати на обробку, нестабільність цін на сировину та культурні упередження залишаються серйозними викликами.

У подальшому планується дослідити властивості і хімічний склад яловичого колагену, текстурату льону, соняшнику і гарбуза з метою формування комплексної добавки, яка здатна змінити смакові й органолептичні властивості м'ясних напівфабрикатів, пропонуючи сталі та етичні рішення. Успішна інтеграція таких інгредієнтів залежить від удосконалення технологій, зниження собівартості та активної роботи з формування позитивного сприйняття серед споживачів. Комплексна білкова добавка, яка поєднує ці джерела, є перспективним рішенням для вирішення технологічних, екологічних і дієтичних викликів. Подальші дослідження у цьому напрямку мають зосередитися на оптимізації технологій, зниженні собівартості та комбінації рослинних білків.

Література

Akhtar, S., Farooqui, A., Younis, K., Mani, A., & Singh, H. (2023). Plant proteins for sustainable food production: "Serving present to secure the future". *International Journal of Food Science & Technology*, 59(1), 460—461. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16791>.

Alexandretti, C., Verlindo, R., Hassemer, G. S., Manzoli, A., Roman, S. S., Fernandes, I. A., Bakes, G. T., Cansian, R. L., Alvarado Soares, M. B., Schwert, R., & Valduga, E. (2019). Structural and techno-functional properties of bovine collagen and its application in hamburgers. *Food Technology and Biotechnology*, 57(3), 369—377. <https://doi.org/10.17113/ftb.57.03.19.5896>.

- Ali, A., & Bharali, P. (2025). The rise of plant-based meat alternatives: Challenges and perspectives. *Food Bioscience*, 68, 106640. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106640>.
- Avila Rodríguez, M. I., Rodríguez Barroso, L. G., & Sánchez, M. L. (2018). Collagen: A review on its sources and potential cosmetic applications. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 17(1), 20–26. <https://doi.org/10.1111/jocd.12450>.
- Cerino, P., Buonerba, C., Cannazza, G., D'Auria, J., Ottoni, E., Fulgione, A., Di Stasio, A., Pierri, B., & Gallo, A. (2021). A review of hemp as food and nutritional supplement. *Cannabis and Cannabinoid Research*, 6(1), 19–27. <https://doi.org/10.1089/can.2020.0001>.
- De Spirt, S., Stahl, W., Tronnier, H., Sies, H., Bejot, M., Maurette, J. M., & Heinrich, U. (2009). Intervention with flaxseed and borage oil supplements modulates skin condition in women. *The British Journal of Nutrition*, 101(3), 440–445. <https://doi.org/10.1017/S0007114508020321>.
- Dekkers, B. L., Boom, R. M., & van der Goot, A. J. (2018). Structuring processes for meat analogues. *Trends in Food Science and Technology*, 81, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.011>.
- El-Sohaimy, S. A., Androsova, N. V., Toshev, A. D., & El Enshasy, H. A. (2022). Nutritional Quality, Chemical, and Functional Characteristics of Hemp (*Cannabis sativa ssp. sativa*) Protein Isolate. *Plants*, 11(21), 2825. <https://doi.org/10.3390/plants11212825>.
- Evans, M., Lewis, E. D., Zakaria, N., Pelipyagina, T., & Guthrie, N. (2021). A randomized, triple-blind, placebo-controlled, parallel study to evaluate the efficacy of a freshwater marine collagen on skin wrinkles and elasticity. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 20, 825–834. <https://doi.org/10.1111/jocd.13676>.
- Fatsecret. (2025). Soy Protein Isolate Nutrition Facts. <https://www.fatsecret.com/calories-nutrition/usda/soy-protein-isolate>.
- Feedtables. (2025). Wheat gluten | Tables of composition and nutritional values of feed materials INRA CIRAD AFZ. <https://www.feedtables.com/content/wheat-gluten>.
- Fitaudit. (2025). Amino Acids in Soy protein isolate. <https://fitaudit.com/food/135815/amino>.
- Flaxseed: 8 health benefits and how to eat. (2021). Healthline. <https://www.healthline.com/nutrition/benefits-of-flaxseeds>.
- Gassmann, B. (1983). Preparation and application of vegetable proteins, especially proteins from sunflower seed, for human consumption. An approach. *Die Nahrung*, 27(4), 351–369. <https://doi.org/10.1002/food.19830270408>.
- Gavril, R. N., Stoica, F., Lipşa, F. D., Constantin, O. E., Stănciuc, N., Aprodu, I., & Râpeanu, G. (2024). Pumpkin and pumpkin by-products: A comprehensive overview of phytochemicals, extraction, health benefits, and food applications. *Foods*, 13(17), 2694. <https://doi.org/10.3390/foods13172694>.
- Good Food Institute. (2023). *State of Alternative Protein series*. GFI Research Publications. <https://gfi.org/state-of-alternative-proteins/>.
- Gorissen, S. H., Crombag, J. J., Senden, J. M., Waterval, W. A., Bierau, J., Verdijk, L. B., & van Loon, L. J. (2018). Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates. *Amino Acids*, 50(12), 1685–1695. <https://doi.org/10.1007/s00726-018-2640-5>.
- Goyal, A., Sharma, V., Upadhyay, N., Gill, S., & Sihag, M. (2014). Flax and flaxseed oil: an ancient medicine & modern functional food. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 1633–1653. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1247-9>.
- House, J. D., Neufeld, J., & Leson, G. (2010). Evaluating the quality of protein from hemp seed (*Cannabis sativa L.*) products through the use of the protein digestibility-corrected amino acid score method. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(22), 11801–11807. <https://doi.org/10.1021/jf102636b>.
- Kyriakopoulou, K., Keppler, J. K., & van der Goot, A. J. (2021). Functionality of ingredients and additives in plant-based meat analogues. *Foods*, 10(3), 600. <https://doi.org/10.3390/foods10030600>.
- Lanzoni, D., Rebucci, R., Formici, G., Cheli, F., Ragone, G., Baldi, A., Violini, L., Sundaram, T. S., & Giromini, C. (2024). Cultured meat in the European Union: Legislative context and food safety issues. *Current Research in Food Science*, 8, 100722. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100722>.
- Longato, E., Lucas-González, R., Peiretti, P. G., Meineri, G., Cornara, L., Mimmo, T., Cesco, S., & Viejo, J. L. (2017). The effect of natural ingredients (amaranth and pumpkin seeds) on the quality

properties of chicken burgers. *Food and Bioprocess Technology*, 10, 2060—2068. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1978-0>.

Lucas, A. (2020, December 1). Singapore issues first regulatory approval for lab-grown meat to Eat Just. *CNBC*. <https://www.cnbc.com/2020/12/01/singapore-issues-first-regulatory-approval-for-lab-grown-meat-to-eat-just.html>.

Maddock, T. D., Bauer, M. L., Koch, K. B., Anderson, V. L., Maddock, R. J., Barceló-Coblijn, G., Murphy, E. J., & Lardy, G. P. (2006). Effect of processing flax in beef feedlot diets on performance, carcass characteristics, and trained sensory panel ratings. *Journal of Animal Science*, 84(6), 1544—1551. <https://doi.org/10.2527/2006.8461544x>.

Munialo, C. D., Baeghbal, V., & Acharya, P. (2025). Plant-based alternatives to meat products. *Foods*, 14(8), 1396. <https://doi.org/10.3390/foods14081396>.

Nowak, W., & Jeziorek, M. (2023). The role of flaxseed in improving human health. *Healthcare*, 11(3), 395. <https://doi.org/10.3390/healthcare11030395>.

Omega Nutrition. (2025). *Organic Pumpkin Seed Protein Powder — Amino Acid Profile*. У Omega Nutrition. Отримано [дата звернення: 08.07.25], із <https://www.drkarafitzgerald.com/product/omega-nutrition-pumpkin-seed-protein-powder/>.

Oomah, B. D., & Mazza, G. (1993). Flaxseed proteins — a review. *Food Chemistry*, 48(2), 119—123. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(93\)90043-F](https://doi.org/10.1016/0308-8146(93)90043-F).

Öztürk, T., & Turhan, S. (2020). Physicochemical properties of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) seed kernel flour and its utilization in beef meatballs as a fat replacer and functional ingredient. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(10), e14695. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14695>.

Plant based meat market size, share, trends, analysis, and forecast 2025-2034. (2025). Global Industry Growth, Competitive Landscape, Opportunities, and Challenges. Research and Markets. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5801227/plant-based-meat-market-size-share-trends>.

Pöri, P., Lille, M., Edelmann, M., Aisala, H., Santangelo, D., Coda, R., & Sozer, N. (2023). Technological and sensory properties of plant-based meat analogues containing fermented sunflower protein concentrate. *Future Foods*, 8, 100244. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100244>.

Post, M. J., Levenberg, S., Kaplan, D. L., Genovese, N., Fu, J., Bryant, C. J., Negowetti, N., Verzijden, K., & Moutsatsou, P. (2020). Scientific, sustainability and regulatory challenges of cultured meat. *Nature Food*, 1(7), 403—415. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0112-z>.

Qin, N., Bao, X., & Li, H. (2021). Structure and functional properties of sunflower seed protein as affected by enzymatic hydrolysis combined with macroporous resin adsorption decolorization. *International Journal of Food Properties*, 24(1), 1574—1587. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1978485>.

Rani, R., Yadav, S., Thakur, N., Kumar, S., Han, H., Alturki, H. A., Ahmad, M. F., & Raposo, A. (2024). Effect of incorporation of pumpkin seed powder and chia seed powder on storage stability of fiber enriched chicken meat nuggets. *LWT*, 191, 115574. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115574>.

Rubio, N. R., Xiang, N., & Kaplan, D. L. (2020) Plant-based and cell-based approaches to meat production. *Nat Commun*, 11, 6276. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20061-y>.

Schreuders, F. K. G., Dekkers, B. L., Bodnár, I., Erni, P., Boom, R. M., & van der Goot, A. J. (2019). Comparing structuring potential of pea and soy protein with gluten for meat analogue preparation. *Journal of Food Engineering*, 261, 32—39. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.04.022>.

Seideman, S. C., Smith, G. C., Carpenter, Z. L. (1977). ADDITION OF TEXTURED SOY PROTEIN AND MECHANICALLY DEBONED BEEF TO GROUND BEEF FORMULATIONS. *J. Food Sci.*, 42, 197—201. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1977.tb01251.x>.

Serdaroğlu, M., Kavuşan, H. S., İpek, G., & Öztürk, B. (2018). Evaluation of the quality of beef patties formulated with dried pumpkin pulp and seed. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 38(1), 1—13. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2018.38.1.001>.

Shanthakumar, P., Klepacka, J., Bains, A., Chawla, P., Dhull, S. B., & Najda, A. (2022). The Current Situation of Pea Protein and Its Application in the Food Industry. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 27(16), 5354. <https://doi.org/10.3390/molecules27165354>.

Smart Protein Project. (2021). *What consumers want: A survey on European consumer attitudes towards plant-based foods, with a focus on flexitarians*. European Commission Horizon 2020 Research

Report. https://smartproteinproject.eu/wp-content/uploads/Final-webinar-slides_Smart-Protein-European-Consumer-Survey.pdf.

Sunflower seeds: Nutrition, benefits, and how to eat. (2023). Healthline. <https://www.healthline.com/nutrition/sunflower-seeds>.

Sustainable protein sources: A review. (2022). *Journal of Food Science*. <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1750-3841.15963>.

Trindade, P. C. O., Santos, B. A. D., Hollweg, G., Correa, L. P., Pinton, M. B., Padilha, M., Paye-ras, R. H. Z., Rosa, S. C., Cichoski, A. J., & Campagnol, P. C. B. (2023). Pea Protein Isolate as a Meat Substitute in Canned Pork Pâté: Nutritional, Technological, Oxidative, and Sensory Properties. *Foods*, 12(18), 3486. <https://doi.org/10.3390/foods12183486>.

Unal, K., Babaoğlu, A. S., Erdem, N., & Dilek, N. M. (2022). The effect of pumpkin powder on the physicochemical, emulsification, and textural properties of beef. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46, e16728. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16728>.

United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2022). *World population prospects 2022: Summary of results*. UN Population Division. <https://www.un.org/development/desa/pd/content/World-Population-Prospects-2022>.

Wieser, H. (2023). Chemistry of wheat gluten proteins: Qualitative composition. *Cereal Chemistry*, 100(1), 1—15. <https://doi.org/10.1002/cche.10572>.

Van Huis, A. (2022). Progress and challenges of insects as food and feed. In P. Purslow (Ed.), *New aspects of meat quality* (2nd ed., pp. 533—557). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85879-3.00011-8>.

Yano, H., & Fu, W. (2023). Hemp: A sustainable plant with high industrial value in food processing. *Foods*, 12(3), 651. <https://doi.org/10.3390/foods12030651>.

Yogesh, K., Langoo, B. A., Sharma, S. K., & Yadav, D. N. (2015). Technological, physico-chemical and sensory properties of raw and cooked meat batter incorporated with various levels of cold milled flaxseed powder. *Journal of Food Science and Technology*, 52(3), 1610—1617. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1185-6>.

Zahari, I., Rinaldi, S., Ahlstrom, C., Östbring, K., Rayner, M., & Purhagen, J. (2023). High moisture meat analogues from hemp — The effect of co-extrusion with wheat gluten and chickpea proteins on the textural properties and sensorial attributes. *LWT*, 189, 115494. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115494>.

Zargar, F. A., Kumar, S., Bhat, Z. F., Kumar, P., & Dar, A. H. (2014). Effect of pumpkin on the quality characteristics and storage quality of aerobically packaged chicken sausages. *SpringerPlus*, 3, 39. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-39>.

Zhang, J., Griffin, J., Li, Y., Wang, D., & Wang, W. (2022). Antioxidant properties of hemp proteins: From functional food to phytotherapy and beyond. *Molecules*, 27(22), 7924. <https://doi.org/10.3390/molecules27227924>.

Zoumpoulakis, P., Sinanoglou, V. J., Siapi, E., Heropoulos, G., & Proestos, C. (2017). Evaluating modern techniques for the extraction and characterisation of sunflower (*Helianthus annuus L.*) seeds phenolics. *Antioxidants*, 6(3), 46. <https://doi.org/10.3390/antiox6030046>.

УДК 664.8.037.5(02)

MULBERRIES: THE HEALTHY EFFECTS OF BIOCOMPONENTS AND MINIMIZING THEIR LOSSES DURING STORAGE

G. Simakhina, <http://orcid.org/0000-0002-7836-3114>N. Naumenko, <http://orcid.org/0000-0002-7340-8985>*National University of Food Technologies***Key words:**

Mulberries
Anthocyanins
Biological value
Functional properties
Biochemical composition
Technology

Article history:

Received 04.11.2025

Received in revised form
17.11.2025

Accepted 01.12.2025

Corresponding author:

G. Simakhina

E-mail:

lyutik.0101@gmail.com

Citation: Сімахіна Г. О.,
Науменко Н. В. (2025).
Ягоди шовковиці: оздо-
ровчі ефекти біокомпо-
нентів та мінімізація їх
втрат при зберіганні.
Наукові праці НУХТ,
31(6), 268—284.
DOI: 10.24263/2225-
2924-2025-31-6-20

ABSTRACT

The global trend of healthy nutrition, whose triumphal development started from the late 1990s, sets the new challenges before food industry in the majority of countries, including Ukraine. The healthy nutrition sphere is oriented at the total increase of natural-base food production (without harmful artificial additives), of foodstuffs fortified with complex natural additives, and the broad consumption of superfoods. To accomplish these requirements, it is needed to constantly turn to the plant world, reveal and study the less explored plants, as well as investigate the raw materials that were beyond the interests of scientists and producers during the last decades; this is what becomes the relevant, essential and multi-faceted trend, especially in terms of healthy nutrition sustainable development.

Mulberries are the specimen of such underrated cultures in Ukraine, albeit quite popular and widely studied abroad; it can be proved by the large list of publications that make possible to evaluate this culture on the new level and hence to include it into the food technology sphere.

The purpose of this work is to examine the domestic mulberry sorts, which is to estimate the berries by the amount of the main biologically active components (ascorbic acid, bioflavonoids including anthocyanins); to display their behavior dynamics in order to select the most effective method to store them with minimal losses of the substances researched; to outline the range of mulberries usage in food industry.

Regarding the amounts of antioxidants according to the data obtained, the studied berries are not inferior to such recognized leaders as raspberries, blackberries and bilberries. Mulberry preservation by freezing, with the usage of cryoprotectants, provided the minimal biocomponent losses during 9—12-month storage; the losses of ascorbic acid were from 20.2 to 24.8 percents (for different sorts), bioflavonoids from 11.5 to 12.3 percents, anthocyanins from 6.7 to 15.6 percents. Therefore, substantiated are the conclusions on the perspectives to use mulberries for multi-purpose healthy food products, as well as for natural colorants.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-20

ЯГОДИ ШОВКОВИЦІ: ОЗДОРОВЧІ ЕФЕКТИ БІОКОМПОНЕНТІВ ТА МІНІМІЗАЦІЯ ЇХ ВТРАТ ПРИ ЗБЕРІГАННІ

Г. О. Сімахіна, <http://orcid.org/0000-0002-7836-3114>

Н. В. Науменко, <http://orcid.org/0000-0002-7340-8985>

Національний університет харчових технологій

Світовий тренд здорового харчування, тріумфальний розвиток якого почався з кінця 1990-х років, ставить нові виклики перед харчовою промисловістю більшої частини країн світу, в тому числі України. Сфера здорового харчування орієнтована на тотальне збільшення виробництва продуктів на натуральній основі (без застосування шкідливих штучних добавок); продуктів, збагачених комплексними натуральними добавками; широке вживання суперфудів. Для реалізації цих вимог необхідно постійно звертатись до рослинного світу, виявляти і вивчати малодосліджені рослини; на сучасному рівні знань досліджувати сировину, яка в останні десятиліття залишалася поза увагою науковців і виробників. Саме це є сьогодні актуальним, важливим і багатоплановим напрямом, зокрема з точки зору сталого розвитку індустрії здорового харчування. Характерним прикладом такої недооціненої культури є шовковиця. Хоча за кордоном вона досить популярна і є предметом досліджень багатьох науковців, про що свідчить значний перелік сучасних публікацій, які надають можливість на новому рівні оцінити цю культуру і залучити до сфери харчових технологій.

Метою дослідження є вивчення вітчизняних сортів шовковиці: заплановано оцінити ягоди за вмістом основних біокомпонентів (аскорбінової кислоти, біофлавоноїдів та їхньої окремої групи — антоціанів); динаміку поведінки для вибору найбільш ефективного способу зберігання з мінімальними втратами досліджуваних сполук; окреслити спектр використання ягід шовковиці в харчовій промисловості.

За отриманими результатами вмісту сполук антиоксидантів досліджені сорти ягід практично не поступають таким визнаним лідерам, як малина, ожина, чорниця. Консервування шовковиці заморожуванням із застосуванням сполук-кріопротекторів забезпечило мінімальні втрати біокомпонентів при зберіганні протягом 9—12 місяців: за аскорбіновою кислотою втрати становлять від 20,2 до 24,8% (для різних сортів), за біофлавоноїдами — від 11,5 до 12,3%, за антоціанами — від 6,7 до 15,6%. Тому обґрунтованими є висновки щодо перспективності використання ягід шовковиці для виробництва оздоровчих продуктів різноспрямованої дії, а також як природних барвників.

Ключові слова: шовковиця, антоціани, біологічна цінність, функціональні властивості, біохімічний склад, технологія.

Постановка проблеми. На ранніх стадіях розвитку людської цивілізації головним джерелом харчування та лікування були рослини. Збираючи різноманітні коріння, трави, плоди, наші предки втамовували голод і позбавлялись від страждань, яких завдавали їм різні хвороби. Поступово, з розширенням спектру рослин,

які використовувала людина, було помічено, що деякі із них заспокоюють біль чи допомагають при розладі функцій окремих органів. Життєва необхідність змусила людство вивчати цілющі властивості рослин. І першим учителем стала природа, а першою аптекою — ліси та поля.

Саме життя нагадало нам, що ми — діти Природи, що відхід від неї негативно позначається на нас самих, насамперед на нашому здоров'ї. Людство вкотре пере-свідчилося, що в системі «**людина — природа — здоров'я**» провідна роль у підтриманні здоров'я належала, належить і належатиме рослинному світові у всьому розмаїтті його харчових і лікарських видів. Бо у єдиному ланцюгу життя рослинні матеріали — ланка не лише необхідна, а найбільш споріднена із живим організмом. У ході тривалої еволюції людина якнайкраще пристосувалася до рослинного світу, тому рослинна їжа та рослинні ліки легко й природно включаються до процесу її життєдіяльності.

Серед усього розмаїття сільськогосподарської рослинної сировини великою популярністю користуються ягоди — дикорослі і культивовані. І це зрозуміло. Саме в ягодах біологічно активні речовини (БАР) перебувають у такому оптимальному співвідношенні, що вони одразу і повністю включаються в метаболізм людського організму, справляючи на нього позитивні фізіологічні впливи. У ягодах із темно-фіолетовим забарвленням (у тому числі у винограді) синтезується найбільше антоціанів — одних із найпотужніших антиоксидантів, які також є природними барвниками.

Обсяги заготовленої і переробленої за останні роки ягідної сировини свідчать про те, що основна увага приділяється декільком її видам: малині, лохині, чорниці, чорній смородині. А ягоди шовковиці, які ще у 50—80-х роках минулого століття були бажаними ласощами, чомусь втратили свою популярність і випали з поля зору харчової індустрії. Хоча навіть побіжний аналіз біохімічного складу ягід шовковиці, оздоровчих ефектів її біокомпонентів, можливість використовувати як поліфункціональні збагачувачі харчових середовищ, а також природні барвники, показує необхідність повернутися до цієї культури; на рівні сучасних знань оцінити її позитивні впливи на організм людини й обґрунтувати перспективи застосування як у харчовій промисловості, так і в домашніх господарствах.

Як свідчить аналіз наведених нижче літературних джерел, поки що мало праць українських науковців, присвячених вивченню унікальних властивостей ягід шовковиці, розробленню оптимальних варіантів її зберігання та перероблення на високоякісні безпечні продукти. Навіть солідний журнал «Медична та клінічна хімія» як основні джерела антоціанів визначає ягоди бузини, чорноплідної горобини, чорниці, смородини та винограду (Кузьмак, 2021). Автори (Єжов, & Гриник, 2020) розглядають біохімічні аспекти селекції лише популярних ягідних культур: малини, ожини, чорної смородини, порічок. Однією з причин байдужого ставлення і науковців, і виробників до такої цінної ягоди, як шовковиця, може бути той факт, що розпорядженням Кабінету Міністрів України від 19 вересня 2007 року №761-р Інститут шовківництва УААН було ліквідовано.

Наведені дані підкреслюють актуальність, важливість і багатоаспектність обраного в статті напрямку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Шовковиця або тутовник — рослина, чиє листя служить їжею для знаменитого тутового шовкопряда, відома в Середній Азії також під назвою цар-дерева за свої унікальні лікувальні та оздоровчі

властивості. Ягоди шовковиці, незважаючи на досить високий вміст моно- та дисукрів (до 10%), відносять до низькокалорійних — 43 ккал/100 г; незначна кількість жирів (до 0,4%) та білків (1,5%).

Та неперевершені властивості ягід шовковиці визначаються наявністю цінних мікро- та макроелементів. Мінеральна компонента ягід представлена аніонами калію (190—200 мг/100 г), кальцію (40—50 мг/100 г), фосфору (35—40 мг/100 г), магнію (75—80 мг/100 г), заліза (10—12 мг/100 г). Кожен із цих мінералів справляє позитивний вплив на певні органи та системи організму людини. З метою популяризації використання цих ягід у вітчизняній промисловості, у домашніх господарствах і мотивації споживачів до введення шовковиці до раціонів харчування, варто дати детальнішу характеристику мінеральних складових ягід.

Калій, який надходить в організм у складі харчових продуктів, нормалізує рівень рідини в клітинах, стабілізує артеріальний тиск, поліпшує постачання мозку киснем, знижує ефективність вияву алергічних реакцій (Hallberg et al., 2016). Кальцій — основний будівельний матеріал для кісток (Cormick et al., 2021), м'язів, зубів; він регулює серцевий ритм та артеріальний тиск, допомагає знизити індекс маси тіла, поліпшує загальне самопочуття.

Фосфор у складі ягід шовковиці — життєво необхідний елемент, бере участь у формуванні здорової кісткової тканини, запобігаючи розвитку таких небезпечних хвороб, як рахіт (Sugiura et al., 2004), остеохондроз, поліпшує діяльність головного мозку і навіть захищає від хвороби Альцгеймера (Parasoglou et al., 2022). Магній розслаблює м'язи (Guerrera et al., 2009), долаючи судоми і болі в суглобах, стабілізує артеріальний тиск. Сучасні дослідження свідчать, що дефіцит цього елемента може спровокувати розвиток аутизму та нервових захворювань (Gröber et al., 2015). Ягоди містять також багато клітковини (до 3%), яка оздоровлює кишечник та організм в цілому (Otles, & Ozgoz, 2014) та корисні органічні кислоти — яблучну, лимонну, винну, саліцилову. У зрілих ягодах міститься унікальний антиоксидант, природний фітоалексин — ресвератрол. Ця сполука надзвичайно важлива у боротьбі та профілактиці хронічних захворювань, пов'язаних із запаленням (Otles, & Ozgoz, 2014; Malaguarnera et al., 2019).

Вітамін С не синтезується в ягодах шовковиці у значних кількостях (50—60 мг на 100 г), однак це складає половину добової потреби організму людини за вітчизняними нормами, згідно з наказом «Про затвердження Норм фізіологічних потреб населення України в основних харчових речовинах і енергії» (наказ МОЗ України № 1073 від 03.09.2017). Вітамін С володіє потужною омолоджувальною дією — стимулює вироблення тканинами власного колагену, сповільнює процес їх старіння, поліпшує когнітивні функції (Travica et al., 2017), прискорює процеси регенерації тканин, підвищує імунітет, має потужні протипухлинні властивості (Fritz et al., 2014), що обґрунтовує доцільність включення ягід шовковиці та продуктів на її основі до раціонів харчування онкохворих.

Великого значення нині набуває інтеграція підходів молекулярної біології, генетики, нанотехнологій і біохімії, що є перспективним напрямом у боротьбі з передчасним старінням та віковими захворюваннями. Так, на новому рівні розглядаються питання, пов'язані з характеристикою теломерів — захисних структур на кінцях хромосом, які регулюють старіння клітин, запобігання втраті генетичної

інформації. Їх поступове скорочення з кожним поділом клітин є основою клітинного старіння та розвитку серцево-судинних хвороб, нейродегенеративних захворювань і раку (Порубльова, 2006).

Хронічний стрес прискорює скорочення теломер через активацію запальних процесів і підвищення рівня оксидативного стресу (Мідловець, & Красенков, 2024). Цю тезу варто завершити на оптимістичній ноті, оскільки сучасними науковими дослідженнями виявлено ряд зовнішніх чинників, які позитивно впливають на довжину теломер, сповільнюючи, відповідно, старіння клітин. І одним із таких чинників є вітамін С, зважаючи на його потужні протизапальні та антиоксидантні властивості, які виявлено і в ягодах шовковиці.

Ягоди шовковиці входять до переліку тих натуральних продуктів (суперфудів), які позитивно впливають на рівень глюкози в крові і використовуються при лікуванні цукрового діабету (Setiyorini et al., 2022). Важливим ефектом вживання ягід шовковиці є також їхня здатність знижувати рівень «шкідливого» холестерину і зменшувати ступінь накопичення ліпідів у тканинах організму навіть при вживанні жирної їжі (Wu et al., 2013). В умовах воєнного стану 2022—2025 рр. ягоди шовковиці є необхідними у раціоні харчування населення України (особливо військовослужбовців), зважаючи на їхню здатність знімати напругу, оксидативний стрес та депресивні вияви (Sakagami et al., 2006), виявляти терапевтичну ефективність у лікуванні неврологічних і психічних захворювань (Manzoor et al., 2022), підвищувати розумову і фізичну працездатність (Jiang et al., 2013). Оздоровчі ефекти ягід шовковиці, зумовлені наявністю алкалоїдів, флавонолів, антоціанів, виявляються у потужних гепатопротекторних властивостях (Zhang et al., 2018).

Природа створила натуральні противірусні препарати у вигляді смачних і соковитих ягід шовковиці: щодо вірусів грипу (Lee et al., 2014) і навіть для посилення дії фармпрепаратів у лікуванні ВІЛ-інфекцій (Sakagami et al., 2007).

Варто згадати про ягоди шовковиці і при розгляді питань профілактики та лікування захворювань неврологічного спектру, передусім хвороб Паркінсона та Альцгеймера. Доказова медицина довела, що когнітивні порушення — це не наслідок старості, а результат довгих років постійної шкоди, що ми завдаємо мозкові, і дефіциту необхідних для нього поживних сполук. Сучасні ліки лише зменшують прояви і симптоми цих хвороб на обмежений період часу.

За словами Ліси Москоні, авторки книги «Їжа для мозку. Наука розумного харчування», їжу для мозку можна розділити на хорошу й погану. Науковиця вважає, що є сенс говорити про нейрохарчування, або харчування для мозку (Москоні, 2019). Зважаючи на біокомпонентний склад ягід шовковиці, результати численних медичних експериментів, які підтверджують високу ефективність шовковиці і продуктів на її основі (Tam et al., 2021), можна прогнозувати, що вони стануть складником нейрохарчування і чудовим, дешевим та доступним засобом продовжити молодість мозку, а отже і молодість організму загалом.

На жаль, тенденція до розвитку і розповсюдження онкологічних хвороб, особливо раку молочної залози, постійно зростає. І тому жіночий організм постійно потребує продуктів, багатих на поліфенольні сполуки (зокрема кумарини та ресвератрол). Їх наявність у ягодах шовковиці зумовлює потужну протипухлинну активність й обґрунтовує необхідність споживання для профілактики і терапії різноманітних онкологічних хвороб (Wan et al., 2023; Cheng et al., 2020). Цілорічне споживання ягід шовковиці, особливо білих сортів, рекомендується для зниження

артеріального тиску, як досить дієвої і безпечної для здоров'я пацієнтів альтернативи фармацевтичним препаратам (Wang et al., 2019). А ось шовковиця чорних сортів нормалізує роботу кишківника: недозрілі плоди швидко долають напади печії, зрілі — нейтралізують інтоксикацію при отруєннях і зупиняють діарею, а перезрілі — справляють послаблюючий і сечогінний ефекти (Akhlq et al., 2016).

При такому солідному переліку позитивних впливів ягід шовковиці на більшість систем та органів організму людини, протипоказань до їх уживання небагато: алергічні реакції, зниження артеріального тиску (що небажано гіпотонікам) та обмеження споживання хворим на діабет (Papia et al., 2020).

Мета дослідження: на основі аналізу літературних джерел та власних наукових досліджень оцінити якісно і кількісно основний біокомпонентний склад ягід шовковиці з точки зору впливу на окремі системи та органи організму людини; запропонувати спосіб тривалого зберігання ягід з мінімальними втратами їхньої харчової та біологічної цінності; окреслити спектр їх використання в харчовій та переробній промисловостях для виробництва продукції антиоксидантної, імуномодулюючої, загальнозміцнюючої дії.

Матеріали і методи. Для досліджень обрано такі сорти шовковиці: «Чорний принц» — найсмачніша ягода. Цей сорт славиться мінімальними експлуатаційними витратами, досить рано починає плодоносити, за будь-яких умов забезпечує велику кількість ягід, кожна вагою до 7 г. На цей сорт варто звернути увагу підприєємцям, які самі вирощують ягоди для подальшого заморожування; сорт «Галіція» привернув нашу увагу тому, що є надбанням українських селекціонерів, зокрема Галини Бабаєвої (завідувачка відділу шовківництва та технічної ентомології, кандидатка сільськогосподарських наук). Це теж темно-фіолетова ягода, яка апіорі містить значні концентрації антоціанів, як і сорт «Чорний принц»; третій предмет досліджень — сорт «Рожева принцеса», декоративно привабливі ягоди вагою 3—5 г, бездоганні з естетичної точки зору.

Держстандарти на ягоди шовковиці в Україні регулюються ДСТУ 8309 2015 «Шовковиця свіжа. Технічні умови». Цей стандарт визначає вимоги до якості, сортування, пакування й транспортування свіжих ягід.

Досі не розроблено об'єктивних критеріїв оцінювання органолептичних показників свіжих ягід у зіставленні із замороженими. Діє лише один стандарт — ДЕСТ 8756:1 «Продукти харчові консервовані. Методи визначення органолептичних показників», який не враховує постійного зростання вимог до якості сировини і готових продуктів, а замороженим напівфабрикатам взагалі не приділено уваги. Тому в пропонованій статті розроблено такі пропозиції (табл. 1 і 2).

Таблиця 1. Характеристика основних органолептичних показників свіжих та заморожених плодів і ягід

Показник	Ягоди шовковиці	Характеристика
Зовнішній вигляд	Свіжі	Чисті, свіжі, з плодоніжками, однорідні за ступенем зрілості (без недозрілих і перезрілих), відповідної форми
	Заморожені	Чисті, заморожені, з наявністю сизуватого нальоту, тургор пружний, не зім'яті, форма — збережена

Продовження таблиці 1

Смак	Свіжі	Властивий цьому виду, без стороннього смаку, кислий, солодкий, пряний або їх комбінації
	Заморожені	Властивий певному виду, без стороннього смаку, смак — кислий, солодкий, пряний або їх комбінації; внаслідок холодового стресу смак може дещо змінюватись
Колір	Свіжі	Властивий певному виду, відповідає з'ємній зрілості, інтенсивність кольору є маркером зрілості
	Заморожені	Властивий певному виду, відповідає з'ємній зрілості, інтенсивність кольору є маркером зрілості; відсутнє відхилення від природного кольору; можливе посилення інтенсивності кольору за рахунок синтезу антоціанів як реакції плоду на холодовий стрес
Стан поверхні	Свіжі	Суха, чиста, без захворювань та ушкоджень шкідниками, без ознак в'янення; залежно від помологічного сорту може бути зволожена; з'ємної зрілості та забарвлення; покривна тканина ніжна
	Заморожені	Чиста, дещо зволожена, з природним тургором, без ушкоджень покривної тканини, з'ємної зрілості та забарвлення, без утрат клітинного соку
Аромат	Свіжі	Властивий певному виду (слабкий, сильний, тонкий, ніжний)
	Заморожені	Властивий певному виду (слабкий, сильний, тонкий, ніжний); може посилюватись у результаті холодового стресу

Запропоновані органолептичні показники свіжих плодів і ягід рекомендовано оцінювати за розробленою 5-бальною шкалою (табл. 2).

Таблиця 2. Бальна оцінка органолептичних показників заморожених ягід шовковиці

Показник	Співвідношення характеристики і кількості балів				
	5	4	3	2	1
Зовнішній вигляд	чисті, заморожені, з сизуватим нальотом, тургор пружний, цілісність покриву не порушена, форма збережена	чисті, рівномірно заморожені, тургор пружний, прим'ятих не більше 2—3%	чисті, рівномірно заморожені, деяка частина матеріалу (до 5%) деформована	сизо-бурий наліт, значна деформація та порушення цілісності	більшість об'єктів деформовані, наявні мікробні ушкодження
Смак	відсутність стороннього присмаку, смак ідентичний свіжим об'єктам	наявний ледь помітний сторонній присмак як результат холодового стресу	сторонній присмак більш інтенсивний	виражений сторонній присмак з появою гіркого післясмаку	різкий неприємний сторонній смак

Колір	інтенсивний, насичений, відповідає з'ємній зрілості, можливе посилення інтенсивності за рахунок синтезу антоціанів при холодовому стресі	відповідає даному сорту, насичений, можливе легке знебарвлення	знебарвлення більш виражене, можливе незначне побуріння верхнього шару	істотне знебарвлення, втрата природного кольору, об'єкти набрали бурого забарвлення	побуріння значної частини ягід, колір неприємний
Стан поверхні	без дефектів та ушкоджень кристалами льоду, без тріщин, без утрат клітинного соку, без зміни форми ягід	без дефектів та ушкоджень, без утрат клітинного соку	дещо змінена форма, трапляються прим'яті екземпляри (до 5%)	Ступінь деформації вищий, прим'яті екземплярів до 10%; форма значно змінена	деформованих ягід понад 10%, решта мають ушкодження поверхні
Аромат	властивий свіжим ягодам; може посилюватись у результаті синтезу біологічно активних сполук під впливом холодового стресу; без сторонніх запахів	натуральний, без сторонніх запахів; може дещо ослаблюватись	помітний сторонній запах з одночасним ослабленням натурального аромату	слабкий натуральний аромат з переважанням стороннього запаху	досить виражений сторонній запах як результат негативних ферментативних процесів

Примітка: заморожені ягоди, які оцінено в 3 бали, придатні до нетривалого зберігання (до 1 місяця), а ті, які отримали 1 і 2 бали, не придатні до зберігання і повинні направлятись на перероблення (виробництво джемів, варення, пюре тощо).

Спосіб зберігання ягід шовковиці з мінімальними втратами біокомпонентів. Ягоди шовковиці містять 80—87% води, тому термін їх зберігання у свіжому вигляді навіть у регульованому газовому середовищі не перевищує 5 діб. Для використання цінної ягоди впродовж року в раціонах харчування необхідні надійні способи її консервування. Світовий і вітчизняний досвід однозначно стверджують (Українець, Сімахіна, Науменко, & Камінська, 2019), що альтернативи низькотемпературним способам зберігання і перероблення сільськогосподарської сировини не існує, принаймні на найближчі десятиріччя. Тому ягоди шовковиці консервували заморожуванням при $-33...-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ і в такому вигляді зберігали за температури $-18\text{ }^{\circ}\text{C}...-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом тривалого часу (9—12 місяців) в герметичній упаковці.

Процес заморожування здійснювали за розробленою технологією з використанням сполук-кріопротекторів (Сімахіна, 2024). Попереднє оброблення ягід здійснювали водним 10-відсотковим розчином глюкози як ефективного проникаючого кріопротектора (Жегунов, 2021), спільно з 1-відсотковим розчином лимонної кислоти, протягом 40—60 хв за температури 20 °C після миття та очищення ягід від сторонніх домішок.

Визначення вмісту основних біокомпонентів у свіжих і заморожених ягодах шовковиці здійснювали за загальноприйнятими методами (Abubakar, 2020).

Аскорбінову кислоту визначали титриметричним методом, заснованим на екстрагуванні аскорбінової кислоти з дослідного зразка за допомогою розчину кислоти (хлороводневої, метафосфорної або суміші оцтової та метафосфорної кислот) із подальшим візуальним або потенціометричним титруванням із розчином 2,6-дихлорфенолфеноляту натрію (Majidi et al., 2016).

Вміст біофлавоноїдів визначали за загальновідомою методикою з використанням реактиву Folin-Ciocalteu (Viña et al., 2006) спектрофотометричним методом.

Визначення загальної кислотності ґрунтується на титруванні екстракту з досліджуваної сировини розчином 0,1 н лугу в присутності індикатора фенолфталеїну, а результати перераховують на яблучну кислоту.

Визначення вмісту цукрів проводили фотоколориметричним методом, заснованим на взаємодії карбонільних груп цукрів у лужному середовищі із залізоцианідовим калієм, і вимірюванні оптичної щільності отриманого розчину на фотоелектроколориметрі.

Визначення вмісту антоціанів в екстрактах ґрунтується на застосуванні рН-диференційної спектроскопії. Сумарну масову концентрацію антоціанів визначали на основі зміни ступеня поглинання світла з довжиною хвилі 510 нм при зміні кислотності розчину від рН 1 до рН 4,4. Масову частку суми антоціанів розраховували в перерахунку на ціанідин-3-глюкозид за формулою (Horbowicz et al., 2008).

Виклад основних результатів дослідження. Найважливішими видами ягід шовковиці є ті, котрі багаті на аскорбінову кислоту, біофлавоноїди, антоціани, мінеральні елементи. Вони мають різне забарвлення — від біло-фіолетового (*Morus alba* L.) до темно-фіолетового (*Morus nigra* L.). Популярними є також ягоди *Morus rubra* L. Досить високий вміст цукрів (особливо вид *Morus alba*) і незначна кислотність забезпечують ягодам оптимальне значення глюкоацидометричного індексу, що й визначає їхні виняткові смакові властивості.

З точки зору антиоксидантних властивостей, пріоритет належить виду *Morus nigra*, завдяки високій концентрації антоціанів, які зумовлюють темно-фіолетове забарвлення. Загалом відомо понад 50 видів дикорослих і культивованих ягід; в Україні поширені шовковиця чорна, рожева і біла.

Шовковиця поки що не набрала такої популярності, як ожина, малина, чорниця, хоча за врожайністю, транспортабельністю та корисними властивостями шовковиця не поступається цим культурам, а в деяких випадках навіть переважає їх, про що свідчать результати виконаних нами експериментальних досліджень.

Відомо, що смак і запах продукту, які передусім оцінює споживач, визначається співвідношенням у плодах і ягодах цукрів та органічних кислот, що характеризується глюкоацидометричним (глюкозо-кислотним) індексом. Тобто в усіх дослі-

джуваних матеріалах необхідно передусім визначити вміст загальних цукрів і кислот, зважаючи на той факт, що оптимальним є їхнє співвідношення як 6—7 : 1. За показниками глюкоацидометричного індексу в зоні оптимальних значень виявились ягоди шовковиці (сорт Чорний принц і Галіція) та ожини. У ягодах малини та чорниці цей показник перевищено.

Таблиця 3. Хімічний склад свіжих ягід шовковиці (збір травень—липень 2025 р.)

Зразки	Вміст цукрів, %	Вміст кислот, %	Вміст, мг/100 г			ГAI
			Аскорбіно- ва кислота	Біофлаво- ноїди	Антоціани	
Ягоди шовковиці						
Чорний принц	7,6	1,2	68,4	915,4	405,0	6,33
Галіція	8,1	1,25	53,8	782,0	346,0	6,48
Рожева принцеса	8,9	1,1	40,5	658,8	98,4	7,56
Інші ягоди						
Чорниця	7,5	0,88	47,6	845,8	408,2	8,52
Малина	8,4	1,05	58,6	744,5	384,6	8,0
Ожина	8,6	1,22	66,5	908,0	458,0	7,05
НІР _{0,5}	0,8	1,1	1,5	1,3	0,9	

Досліджувані культури мають досить високий вміст аскорбінової кислоти і біофлавоноїдів. Причому, за деякими винятками, спостерігається кореляція між вмістом цих двох біокомпонентів для кожного виду рослин. На думку науковців, динамічна рівновага такої системи може перебувати у стійкому стані лише при певних концентраційних співвідношеннях флавоноїдів і аскорбінової кислоти. Зміна концентрації одного з компонентів системи викликає зсув рівноваги в той чи той бік і призводить до ослаблення стабілізаційного чинника обох вітамінів стосовно один одного (Ковальов, Павлій, & Ісакова, 2004).

Використання ягід шовковиці як природних барвників ґрунтується на їхній здатності синтезувати сполуки-антоціани, які належать до групи біофлавоноїдів. Це рослинні глікозиди, що містять аглікон (антоціанідин) — гідроксипохідні 2-фенілхромену. Вуглеводна частина молекули (залишок глюкози, рамнози, галактози тощо) пов'язана з агліконом у положенні 3 (Kahkonen, & Heinonen, 2003). Зміною рН середовища можна досягти різного забарвлення: при рН 1,5...2 — стійке червоне забарвлення; при рН 3,4...5 — червоно-пурпурове; при рН 6,7...8 — синє або синьо-зелене; при рН = 9 — зелене; при рН = 10 — жовте.

Відповідно до даних табл. 3, усі досліджені ягоди, окрім шовковиці сорту Рожева принцеса, відзначаються досить високим вмістом антоціанів — від 346 мг/100 г (шовковиця сорту Галіція) до 458 мг/100 г (ожина). Таким чином, здійснилися очікувані сподівання на те, що ягоди шовковиці певних сортів (зокрема Чорний принц і Галіція) за вмістом антоціанів практично не поступаються визнаним лідерам — чорницям та ожині і випереджають малину.

Для визначення найбільш ефективного способу зберігання ягід шовковиці протягом 9—12 місяців досліджено 2 варіанти їх заморожування: I варіант — за традиційною технологією; II варіант — за технологією з використанням комбінова-

ного проникаючого кріопротектора. Зберігання заморожених ягід проводили в однакових умовах: при -18°C у герметичних пакетах. Отримані результати наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Втрати біокомпонентів ягід шовковиці при зберіганні (% до вмісту у сировині)

Зразки сортів шовковиці	Втрати аскорбінової кислоти		Втрати біофлавоноїдів		Втрати антоціанів	
	I	II	I	II	I	II
Чорний принц	66,4	20,2	42,6	12,3	28,7	6,7
Галіція	67,8	23,4	37,4	14,6	30,8	8,5
Рожева принцеса	70,2	24,8	40,8	11,5	34,4	15,6
НІР _{0,5}	1,0	0,8	0,6	1,1	0,7	0,8

Спосіб заморожування ягід із застосуванням кріопротекторів показав явні переваги перед традиційним, який досі побутує на вітчизняних підприємствах. Слід зіставити цифри втрат, наприклад, аскорбінової кислоти за варіантами I та II: сорт Чорний принц — 66,4% і 20,2%; сорт Галіція — 67,8% і 23,4%; сорт Рожева принцеса — 70,2% і 24,8%. Ці результати, власне, підтвердили ті дані, що їх ми отримали у попередніх дослідженнях майже на 20 різних видах і сортах ягід (Сімахіна, Кочубей-Литвиненко, Науменко, & Камінська, 2022).

Біофлавоноїди меншою мірою піддаються холодовим стресам, хоча закономірність у порівнянні варіантів I та II зберігається. І завдяки попередньому обробленню ягід кріопротекторами втрати біофлавоноїдів навіть через 12 місяців зберігання становлять від 11,5 до 14,6%.

Разом з тим, і досі механізм захисної дії кріопротекторів вивчено недостатньо. Інформація про те, що і як має змінюватись у клітинах біооб'єктів, постійно поповнюється новими даними, в основному в галузях кріобіології та кріомедицини (Leibo, Farrant, Mazur, Hanna Jr, & Smith, 1999). Ці роботи показали, що захисні сполуки використовують у складі кріозахисних середовищ — водних розчинів кріопротекторів (Пушкар, Шраго, & Білоус, 1999), а вибір кріопротектора здійснюється індивідуально для кожної клітинної фракції, оскільки універсальних принципів підбору або синтезу кріопротектора із заданими властивостями досі не існує. Оскільки структура клітин природних біологічних об'єктів у медицині та сільськогосподарській сировині схожа і кристалізація води в них має спільні закономірності, зрозумілою є обґрунтованість і доцільність використання набутого вченими-кріобіологами досвіду в харчових технологіях. І оскільки таких спроб поки що дуже мало, то дослідження в цьому напрямі сприятиме розвитку та застосуванню нових ефективних методів заморожування.

Тут варто згадати ще одну особливість способу заморожування, яка сприяла зменшенню втрат біокомпонентів, — використання проникаючого кріопротектора, зокрема водного розчину глюкози. Проникаючі кріопротектори (одно- та багатоатомні спирти, оксиди, деякі низькомолекулярні цукри, наприклад сахароза і глюкоза) мають вищі кріозахисні властивості за рахунок здатності проникати всередину клітин біооб'єктів, які піддаються заморожуванню (Білоус, & Грищенко, 1994).

Оскільки ягоди шовковиці мають ніжну покривну тканину, кріопротектор, очевидно, досягає центру ягоди, впливаючи на процес кристалізації води в усьому

її об'ємі при зниженні температури до -35°C і сприяючи формуванню дрібнокристалічного льоду зі слабкими полями напруги, не здатними руйнувати клітини та тканини.

Окремої уваги потребує аналіз поведінки антоціанів при заморожуванні та зберіганні ягід шовковиці. Їхні втрати порівняно з іншими біокомпонентами мінімальні як за традиційною технологією заморожування, так і за вдосконаленою. На сучасному рівні знань можна передбачити, що антоціани виявилися досить стійкими до ушкоджуючої дії низьких температур і викликаних ними процесів кристалоутворення, що певною мірою може визначатись особливостями просторової і електронної будови молекул антоціанів (Стеценко, Сімахіна, Гойко, & Халапсіна, 2016). Індивідуальні антоціани (ціанідин, дельфінідин, пеларгонідин) розрізняються за кількістю гідроксильних груп, природою та кількістю приєднаних до молекули цукрів, за природою та кількістю аліфатичних або ароматичних кислот, приєднаних до цукру. Можна припустити, що котрась із цих сполук у молекулі антоціанів теж виявляє кріопротекторні властивості, спричиняючи додатковий позитивний ефект. Наступна версія полягає в тому, що, за візуальними спостереженнями, після заморожування ягоди шовковиці набувають ще інтенсивнішого забарвлення, особливо це помітно на ягодах сорту Рожева принцеса. Імовірно, холодовий стрес викликає реакції синтезу антоціанів, тому завдяки сукупному ефектові — дії кріопротекторів і додатковому синтезові антоціанів, досягаються мінімальні втрати цих біокомпонентів при заморожуванні та зберіганні.

Номенклатура регламентованих нормативними документами показників оцінки якості плодів і ягід включає переважно їхні органолептичні властивості. Тому для отримання ще однієї порівняльної характеристики ягід, заморожених за традиційною технологією, і ягід, заморожених під прикриттям кріопротекторів, провели бальне оцінювання їхніх органолептичних показників. Таблиці 5 і 6 сформовано на основі даних таблиць 1 і 2.

Дослідження провели за розробленою нами методикою, в якій розширено трактування характеристики органолептичних показників об'єктів і розроблено 5-бальну шкалу їх оцінювання. Оскільки зовнішній вигляд вважається комплексним показником, який включає форму, величину, ступінь зрілості, свіжість тощо, то ми надали йому максимальної величини коефіцієнта вагомості — 0,35. У разі невідповідності плодів та ягід за зовнішнім виглядом установленим вимогам, використання інших критеріїв оцінки вважається недоцільним.

Таблиця 5. Бальна оцінка органолептичних показників заморожених ягід шовковиці за традиційною технологією

Показники	Коефіцієнт вагомості	Бали	Характеристика
Зовнішній вигляд	0,35	3	Ягоди чисті, рівномірно заморожені, деяка частина (до 5%) деформована з порушеною цілісністю покриву; придатні до нетривалого (1 місяць) зберігання
Смак	0,2	2	Наявність вираженого стороннього присмаку з появою гіркого післясмаку
Колір	0,1	3	Досить виражене знебарвлення з незначним побурінням верхнього шару

Продовження таблиці 5

Стан поверхні	0,2	3	Дещо змінена форма ягід, трапляються прим'яті екземпляри (до 5%), незначні тріщини з ознаками виділеного клітинного соку
Аромат	0,15	4	Натуральний аромат, без сторонніх запахів, дещо ослаблений порівняно із свіжою сировиною

Таблиця 6. Бальна оцінка органолептичних показників заморожених ягід смородини з використанням кріопротекторів

Показники	Коефіцієнт вагомості	Бали	Характеристика
Зовнішній вигляд	0,35	5	Ягоди чисті, рівномірно заморожені, із сизуватим нальотом, тургор пружний, цілісність покриву не порушена, форма збережена; придатні до тривалого зберігання
Смак	0,2	5	Ідентичний натуральним свіжим ягодам, сторонній присмак відсутній
Колір	0,1	5	Інтенсивний, насичений, дещо посилений порівняно зі свіжими ягодами, очевидно, за рахунок синтезу антоціанів при холододовому стресі
Стан поверхні	0,2	5	Без пошкоджень, дефектів, тріщин, без зміни форми, без втрат клітинного соку
Аромат	0,15	5	Власивий свіжим ягодам, навіть дещо інтенсивніший за рахунок синтезу ароматоутворюючих сполук при холододовому стресі

За результатами досліджень виявлено, що ягоди, заморожені за традиційною технологією, за жодним органолептичним показником не отримали максимальної кількості балів, вони придатні, за нашими рекомендаціями, лише до нетривалого (протягом місяця) зберігання, тому не варто розраховувати на них як на джерело вітамінів та інших цінних нутрієнтів у зимово-весняний період за відсутності свіжої плодово-ягідної сировини.

На противагу цьому фактові ягоди шовковиці, заморожені з використанням кріопротекторів, за всіма показниками органолептики отримали максимальні 5 балів, підтвердили свій статус надійного джерела вітамінів, мінеральних елементів і вуглеводів у міжсезонний період до нового врожаю. Досягнуті ефекти є результатом дії певних сполук кріозахисного середовища (водного розчину кріопротекторів), до складу якого ввійшли глюкоза та лимонна кислота. Позитивний результат оброблення ягід перед заморожуванням кріопротекторами реально пояснити, користуючись теоретичними викладками (Пушкар, Шраго, & Білоус, 1999) щодо їхньої дії на клітинні суспензії. За аналогією можна стверджувати, що присутність кріопротекторів змінює фізико-хімічні властивості поза- і внутрішньоклітинних розчинів біологічних об'єктів так, що наступні впливи низьких температур при заморожуванні є менш згубними для клітинних структур попередньо оброблених ягід. Необроблені ягоди такого захисту не мають, що підтверджується зниженням в них вмісту вітамінів і погіршенням органолептичних показників.

Шовковиця поки що залишається поза увагою великої харчової індустрії, а знаходить застосування переважно в домашніх господарствах для приготування джемів і варення; сиропів, соусів і топінгів до десертів, морозива, млинців; соків, смузі, інших напоїв. Разом з тим, спектр використання ягід шовковиці повинен бути набагато ширшим, зважаючи на її цілющі, оздоровчі, профілактичні властивості; на її здатність нормалізувати функціонування організму навіть у таких критичних умовах, які склались в Україні в результаті російської агресії.

Харчова та переробна промисловість, крафтові виробництва можуть забезпечити в необхідних обсягах випуск, наприклад, такої продукції для щоденного вживання: соки із шовковиці або в комбінації з іншими ягодами; сушені ягоди (отримані при низьких температурах, вони зберігатимуть практично весь спектр цінних біокомпонентів сировини і можуть служити для збагачення кисломолочних продуктів, морозива, вживатись як поліфункціональний інгредієнт для хлібобулочних виробів, мюслі, сумішей для здорового сніданку); порошки сушених ягід (можна додавати до ароматичних спецій та ароматизаторів для кулінарних страв, а також як натуральні барвники, здатні скласти гідну альтернативу штучним Е-добавкам). Належне місце мають посісти ягоди шовковиці й у фармацевтичній промисловості: екстракти, концентрати, мікрокапсульовані порошки у вигляді дієтичних добавок. Доречно згадати, що за Законом України 771/97 ВР «Про основні принципи та вимоги до безпеки та якості харчових продуктів» (редакція від 16.01.2020) дієтичні добавки вперше визнано як «харчовий продукт, що споживається у невеликих кількостях і додатково до звичайного раціону, виготовленні у вигляді таблеток, капсул, порошоків тощо.

Зараз на ринку заморожених ягід в Україні працює три типи підприємств (Оприлюднено, 2022).

По-перше, це великі компанії, які розвивають технології заморожування, перероблення та експорт. Обсяги їхньої продукції (здебільшого чорниця, малина, лохина) становлять понад 1000 т/місяць.

Середню нішу займають компанії, які самі вирощують ягоди, а також розвивають технології заморожування та перероблення з місячними обсягами виготовленої продукції 100—130 т. Не всі з них працюють на експорт, орієнтуючись переважно на внутрішній ринок.

По-третє, є малі компанії, які вирощують власну продукцію та заморожують її. Їхні потужності не перевищують 20—100 т/місяць.

Виробництво заморожених ягід має свої ризики, наприклад орієнтир на продукцію, яка не отримала попиту споживачів. Юрій Шаманський, менеджер компанії «АГРО ФРОСТ РІВНЕ», наводить конкретний приклад, коли в 2022 р. майже всі підприємства активно заморожували чорницю, а попиту на неї практично не було, що призвело до великих збитків.

Хочеться вірити, що підприємці звернуть увагу на ягоди шовковиці, конче необхідні для раціонів харчування населення України. Це розширить асортимент цінної замороженої продукції, адже не лише малина, лохина та чорниця уособлюють природний багатий світ ягідних культур.

Висновки

За останні десятиліття інтерес до природних біологічно активних речовин значно зріс і в фармацевтичній, і в харчових галузях. Це стосується передусім поліфенольних сполук і, зокрема, антоціанів. Вони мають виражену антиоксидантну спрямованість завдяки унікальній структурі молекул.

Аналіз літературних джерел, отримані експериментальні дані демонструють важливість ягід шовковиці як природних антиоксидантів, барвників, маркерів стресу, вискоєфективних профілактичних засобів багатьох захворювань людини. За цими якостями ягоди шовковиці є потужним конкурентом таких популярних культур, як лохина, ожина, малина, чорниці, оскільки практично не поступаються їм за вмістом біофлавоноїдів та антоціанів.

Введення до харчових раціонів ягід шовковиці у свіжому або переробленому вигляді надає можливість повноцінно відновити в організмі нестачу необхідних вітамінів і мінеральних елементів, інших есенціальних сполук; вирішити багато проблем зі здоров'ям: від зниження зайвої ваги і зменшення відчуття тривожності до поліпшення когнітивних властивостей, запобігання ризику розвитку онкологічних хвороб, зниження запалення внутрішніх органів і сечостатевої системи, оздоровлення печінки, нормалізації артеріального тиску.

Найбільш ефективним способом тривалого зберігання ягід шовковиці з мінімальними показниками зниження харчової і біологічної цінності є консервування заморожуванням за розробленою нами технологією з використанням сполук — кріопротекторів, призначення яких полягає в захисті об'єктів заморожування від ушкоджуючої дії утворених кристалів льоду.

Напрямом подальших досліджень є популяризація цінних, поки що маловживаних ягідних культур, і залучення їх до сфери харчових технологій на основі обґрунтованих наукових даних; вдосконалення і використання низькотемпературних способів зберігання та перероблення сировини. Продукти перероблення ягід шовковиці стануть новим джерелом антиоксидантів, природних барвників (що, зрештою, мають витіснити шкідливі штучні добавки), поліфункціональних збагачувачів традиційних харчових середовищ. Подальше вивчення малодосліджених сортів ягід і плодів надасть можливість повною мірою використати багатий ролинний світ, подарований людині Природою.

Статтю підготовлено в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи «Наукове обґрунтування та розроблення ресурсоефективних технологій харчової продукції цільового призначення як імператив продовольчої безпеки» №0123U02060.

Література

- Білоус, А. М., Грищенко, В. І. (1994). *Кріобіологія*. Київ: Наукова думка.
- Єжов, В. М., Гриник, І. В. (2020). Біохімічні аспекти селекції ягідних культур родів *Rubus L.* та *Ribes L.* *Садівництво*, 75, 18—31. <https://doi.org/10.35205/0558-1126-2020-75-18.31>.
- Жегунов, Г. Ф., Денисова, О. М. (2021). *Кріопротектори та кріоконсерванти*. Харків: РВВ ДБТУ.
- Ковальов, В. М., Павлій, О. І., Ісакова, Т. І. (2004). *Фармакогнозія з основами біохімії рослин*. Харків: Вид-во НФАУ «МТК-Книга».
- Кузьмак, І. К. (2021). Антоціани і антоціанідини як компоненти функціонального харчування: біохімія та вплив на здоров'я людини. *Медична та клінічна хімія*, 21(4), 111—122. <https://doi.org/10.11603/mcch.2410-681X.2021.i4.12746>.

Мідловець, К. К., Красненков, Л. С. (2024). Оксидативний стрес у контексті патології та патогенезу хвороби Паркінсона. *Проблеми старіння і довголіття*, 29(1), 25—44.

Москоні, Л. (2019). *Їжа для мозку. Наука розумного харчування* / пер. з англ. Київ: Наш формат.

Оприлюднено перелік підприємств із заморозки ягід, овочів і фруктів. <https://agri-gator.com.ua/2022/06/30/opryliudneno-perelik-pidpriemstv-iz-zamorozky-iahid-ovochiv-ta-fruktiv-kurkul/> (дата звернення 10.08.2025).

Основні аспекти якісного заморожування ягід. <http://www.jagodnik.info/osnovni-aspekty-yakisnogo-zamorozhuvannya-yagid-aktsent-na-organiku/> (дата звернення 04.08.2025).

Порубльова, Л. В. (2006). Молекулярні механізми регуляції активної теломераз. *Біологія і клітина*, 22(5), 96—117.

Пушкар, М. С., Шраго, М. І., Білоус, А. М. (1999). *Кріопротектори*. Київ: Наукова думка.

Стеценко, Н. О., Сімахіна, Г. О., Гойко, І. Ю., Халапсіна, С. В. (2016). Дослідження антиоксидантних властивостей антоціанів як необхідних компонентів харчових продуктів в екстремальних умовах життєдіяльності. *Наукові праці НУХТ*, 22(4), 167—174.

Українець, А. І., Сімахіна, Г. О., Науменко, Н. В., Камінська, С. В. (2019). *Заморожені плодово-ягідні напівфабрикати: якість, ефективність, безпека*: монографія. Київ: Видавництво «Сталь».

Akhlaq, A., Mehmood, M. H., Rehman, A., Ashraf, Z., Syed, S., Bawany, S. A., ..., & Siddiqui, B. S. (2016). The prokinetic, laxative, and antidiarrheal effects of *Morus nigra*: Possible muscarinic, Ca²⁺ channel blocking, and antimuscarinic mechanisms. *Phytotherapy Research*, 30(8), 1362—1376. <https://doi.org/10.1002/ptr.5641>

Cheng, K. C., Wang, C. J., Chang, Y. C., Hung, T. W., Lai, C. J., Kuo, C. W., & Huang, H. P. (2020). Mulberry fruits extracts induce apoptosis and autophagy of liver cancer cell and prevent hepatocarcinogenesis in vivo. *Journal of food and drug analysis*, 28(1), 84—93. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2019.06.002>.

Cormick, G., Betran, A. P., Romero, I. B., Cormick, M. S., Belizán, J. M., Bardach, A., & Ciapponi, A. (2021). Effect of calcium fortified foods on health outcomes: a systematic review and meta-analysis. *Nutrients*, 13(2), 316. <https://doi.org/10.3390/nu13020316>.

Fritz, H., Seely, D., McGowan, J., Skidmore, B., Fernandes, R., Kennedy, D. A. & Fergusson, D. (2014). Black cohosh and breast cancer: a systematic review. *Integrative cancer therapies*, 13(1), 12—29. <https://doi.org/10.1177/1534735414534463>.

Gröber, U., Schmidt, J., & Kisters, K. (2015). Magnesium in prevention and therapy. *Nutrients*, 7(9), 8199—8226. <https://doi.org/10.3390/nu7095388>.

Hallberg, I., Ranerup, A., & Kjellgren, K. (2016). Supporting the self-management of hypertension: Patients' experiences of using a mobile phone-based system. *Journal of human hypertension*, 30(2), 141—146. <https://doi.org/10.1038/jhh.2015.3>.

Horbowicz, M., Kosson, R., Grzesiuk, A., & Debski, H. (2008). Anthocyanins of fruits and vegetables—their occurrence, analysis and role in human nutrition. *Vegetable Crops Research Bulletin*, 68(1), 5—22.

Jiang, D. Q., Guo, Y., Xu, D. H., Huang, Y. S., Yuan, K., & Lv, Z. Q. (2013). Antioxidant and anti-fatigue effects of anthocyanins of mulberry juice purification (MJP) and mulberry marc purification (MMP) from different varieties mulberry fruit in China. *Food and chemical toxicology*, 59, 1—7. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2013.05.023>.

Kahkonen, M. P., Heinonen, M. (2003). Antioxidant activity of anthocyanins and their aglycons. *J. Agric. Food Chem.*, 51, 628—633.

Kim, H., & Chung, M. S. (2018). Antiviral activities of mulberry (*Morus alba*) juice and seed against influenza viruses. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2606583>.

Lee, J. H., Bae, S. Y., Oh, M., Kim, K. H., & Chung, M. S. (2014). Antiviral effects of mulberry (*Morus alba*) juice and its fractions on foodborne viral surrogates. *Foodborne pathogens and disease*, 11(3), 224—229. <https://doi.org/10.1089/fpd.2013.1633>.

Leibo, S. P., Farrant, J., Mazur, P., Hanna, M. G. Jr, Smith, L. H. (1999). Effects of freezing on marrow stem cell suspensions: interactions of cooling and warming rates in the presence of PVP, sucrose, or glycerol. *Cryobiology*, 4, 315—332.

Majidi, M., Y-ALQubury, H. (2016). Determination of Vitamin C (ascorbic acid) Contents in various fruit and vegetable by UV-spectrophotometry and titration methods. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 9(4), 2972—2974. <http://dx.doi.org/10.52155/ijpsat.v15.2.1144>.

Malaguamnera, L. (2019). Influence of resveratrol on the immune response. *Nutrients*, 11(5), 946. <https://doi.org/10.3390/nu11050946>.

Manzoor, M. F., Hussain, A., Tazeddinova, D., Abylgazinova, A., & Xu, B. (2022). Assessing the nutritional-value-based therapeutic potentials and non-destructive approaches for mulberry fruit assessment: An overview. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6531483>.

Mulberries, raw <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/169913/nutrients>.

Ötles, S., Ozgoz, S. (2014). Health effects of dietary fiber. *Acta scientiarum polonorum. Technologia alimentaria*, 13(2), 191—202.

Papia, F., Incorvaia, C., Genovese, L., Gangemi, S., & Minciullo, P. L. (2020). Allergic reactions to genus *Morus* plants: a review. *Clinical and Molecular Allergy*, 18, 1—5. <https://doi.org/10.1186/s12948-020-00116-7>.

Parasoglou, P., Osorio, R. S., Khagai, O., Kovbasyuk, Z., Miller, M., Ho, A., ..., & Brown, R. (2022). Phosphorus metabolism in the brain of cognitively normal midlife individuals at risk for Alzheimer's disease. *Neuroimage: Reports*, 2(4), 100121. <https://doi.org/10.1016/j.ynirp.2022.100121>.

Sakagami, H., Asano, K., Satoh, K., Takahashi, K., Kobayashi, M., Koga, N., & Nakamura, W. (2007). Anti-stress, anti-HIV and vitamin C-synergized radical scavenging activity of mulberry juice fractions. *In vivo*, 21(3), 499—505. PMID: 17591360.

Setiyorini, E., Qomaruddin, M. B., Wibisono, S., Juwariah, T., Setyowati, A., Wulandari, N. A., & Sari, L. T. (2022). Complementary and alternative medicine for glycemic control of diabetes mellitus: A systematic review. *Journal of Public Health Research*, 11(3), 22799036221106582. <https://doi.org/10.1177/22799036221106582>.

Sugiura, S. H., Hardy, R. W., & Roberts, R. J. (2004). The pathology of phosphorus deficiency in fish: a review. *Journal of fish diseases*, 27(5), 255—265. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.2004.00527.x>.

Tam, D. N., Nam, N. H., Elhady, M. T., Tran, L., Hassan, O. G., Sadik, M., & Huy, N. T. (2021). Effects of mulberry on the central nervous system: a literature review. *Current Neuropharmacology*, 19(2), 193—219. <https://doi.org/10.2174/1570159X18666200507081531>.

Travica, N., Ried, K., Sali, A., Scholey, A., Hudson, I., & Pipingas, A. (2017). Vitamin C status and cognitive function: a systematic review. *Nutrients*, 9(9), 960. <https://doi.org/10.3390/nu9090960>.

Viña, S. Z., Chaves, A. R. (2006). Antioxidant response in minimally processed celery during refrigerated storage. *Food Chem.*, 94(1), 68—74. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.10.051>.

Wang, C., Cheng, W., Bai, S., Ye, L., Du, J., & Zhong, M. (2019). White mulberry Fruit Polysaccharides Enhance Endothelial Nitric Oxide Production to Relax Arteries. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2019.109022>.

Wani, M. Y., Ganie, N. A., Wani, D. M., Wani, A. W., Dar, S. Q., Khan, A. H., & Dehghani, M. H. (2023). The phenolic components extracted from mulberry fruits as bioactive compounds against cancer: A review. *Phytotherapy Research*. <https://doi.org/10.1002/ptr.7713>.

Wu, T., Tang, Q., Gao, Z., Yu, Z., Song, H., Zheng, X., & Chen, W. (2013). Blueberry and mulberry juice prevent obesity development in C57BL/6 mice. *PLoS One*, 8(10), 77585. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077585>.

Sakagami, H., Asano, K., Satoh, K., Takahashi, K., Terakubo, S., Shoji, Y., & Nakamura, W. (2006). Anti-stress activity of mulberry juice in mice. *In vivo*, 20(4), 499—504. PMID: 16900780.

Zhang, H., Ma, Z. F., Luo, X., & Li, X. (2018). Effects of mulberry fruit (*Morus alba* L.) consumption on health outcomes: A mini-review. *Antioxidants*, 7(5), 69. <https://doi.org/10.3390/antiox7050069>.

УДК 665.334.9:663.15

SYNERGIC EFFECT OF ANTIOXIDANT BUTYLHYDROXYTOLUENE AND BUTYLHYDROXYANISOL ON THE SOYBEAN OIL OXIDATION STABILITY

T. Nosenko, <http://orcid.org/0000-0002-1758-4669>

National University of Food Technologies

O. Klymenko, <http://orcid.org/0009-0004-9149-0304>

Poltava State Agrarian University

Key words:

Oxidation
Antioxidants
Butylhydroxyanisole
Butylhydroxytoluene
Soybean oil

Article history:

Received 04.11.2025
Received in revised form
18.11.2025
Accepted 03.12.2025

Corresponding author:

O. Klymenko

E-mail:

oleksandr.klymenko@pdau.edu.ua

Citation: Носенко Т. Т., Клименко О. С. (2025). Синергічна дія антиоксидантів бутилгідрокситолуолу та бутилгідроксианізолу на окиснювальну стабільність соєвої олії. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 285—294.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-21

ABSTRACT

Prevention or inhibition of oil and fats oxidation is important in the technologies of food, cosmetics, feed, biodiesel, etc. Antioxidants are inhibitors of fat peroxidation. Vegetable oils contain a wide range of endogenous antioxidants (tocopherols, pigments, phenols, etc.), but synthetic antioxidants, in particular phenolic antioxidants, are also widely used. It is known that phenolic antioxidants can enhance the effectiveness of each other, but the synergism of their action depends on a number of factors, both external as well as composition of the oil. It was studied the antioxidant efficiency of phenolic antioxidant butylhydroxyanisole and butylhydroxytoluene mixtures to establish a rational composition of the mixture.

The data obtained show that when butylhydroxytoluene is added to soybean oil at a concentration of 0.01%, the duration of the induction period of accelerated oxidation is extended by 4 hours compared to the control. At the same time, butylhydroxyanisole had a low efficiency in prolonging the induction period of accelerated oxidation, but it significantly inhibited the rate of post-induction oxidation of the oil.

A synergistic effect in increasing the duration of the induction period of accelerated oxidation at 100°C was found when using a mixture of antioxidants butylhydroxytoluene and butylhydroxyanisole in a ratio of 1:1.

A high synergistic effect on peroxidation inhibition was found during long-term storage of oil at (20±5) °C with the addition of a mixture of antioxidants BHT and BHA in a ratio of 1BHT:3BHA and a concentration of 0.01%. This composition of the mixture can be recommended as rational for preventing of oil peroxidation during storage.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-21

СИНЕРГІЧНА ДІЯ АНТИОКСИДАНТІВ БУТИЛГІДРОКСИТОЛУОЛУ ТА БУТИЛГІДРОКСΙΑНІЗОЛУ НА ОКИСНЮВАЛЬНУ СТАБІЛЬНІСТЬ СОЄВОЇ ОЛІЇ

Т. Т. Носенко, <http://orcid.org/0000-0002-1758-4669>

Національний університет харчових технологій

О. С. Клименко, <http://orcid.org/0009-0004-9149-0304>

Полтавський державний аграрний університет

Запобігання або гальмування окиснення олії та жирів є важливим завданням у технологіях харчових, косметичних продуктів, кормів, біодизелю тощо. Інгібіторами пероксидного окиснення жирів є антиоксиданти. Рослинні олії містять широкий спектр ендегенних антиоксидантів (токофероли, пігменти, феноли тощо), проте широке використання мають і синтетичні антиоксиданти, зокрема фенольні. Відомо, що фенольні антиоксиданти можуть підсилювати ефективність один одного, проте синергізм їх дії залежить від низки як зовнішніх факторів, так і складу олії. Статтю присвячено дослідженню антиоксидантної ефективності сумішей фенольних антиоксидантів бутилгідроксианізолу та бутилгідрокситолуолу для встановлення раціонального складу суміші.

Одержані дані свідчать, що при внесенні в соєву олію бутилгідрокситолуолу у концентрації 0,01% тривалість індукційного періоду прискореного окиснення подовжується на 4 год порівняно із контролем. Водночас бутилгідроксианізол мав низьку ефективність щодо подовження індукційного періоду прискореного окиснення, проте він суттєво гальмував швидкість постіндукційного окиснення олії. Синергічний ефект щодо збільшення тривалості індукційного періоду прискореного окиснення за температури 100 °C був виявлений за використання суміші антиоксидантів бутилгідрокситолуолу та бутилгідроксианізолу у співвідношенні 1:1.

Високий синергічний вплив двох досліджуваних антиоксидантів на гальмування пероксидного окиснення було виявлено під час довготривалого зберігання олії за температури (20±5) °C із додаванням суміші антиоксидантів ВНТ та ВНА за співвідношення 1ВНТ:3ВНА та концентрації 0,01%. Такий склад суміші можна рекомендувати як раціональний для запобігання пероксидного окиснення олії під час зберігання.

Ключові слова: окиснення, антиоксиданти, бутилгідроксианізол, бутилгідроксианізол, соєва олія.

Постановка проблеми. Харчові рослинні олії є невід'ємною частиною раціону завдяки своїм сенсорним і фізіологічним властивостям, вони є основним джерелом енергії, а також забезпечують організм людини важливими біологічно активними нутрієнтами, передусім поліненасиченими незамінними жирними кислотами та жиророзчинними вітамінами (токоферолами, кальциферолами, β-каротином).

Окиснювальна стабільність олій є важливим показником, який визначає її термін придатності до вживання, органолептичних властивостей протягом зберігання і, врешті-решт, безпечності олій. Ця властивість особливо важлива для олій, що використовуються для смаження та інших високо температурних обробок.

Швидкість окиснення олій і жирів можна гальмувати за допомогою антиоксидантів. Останнім часом для гальмування пероксидного окиснення жирів усе більш широко використовують антиоксиданти природного походження. Проте синтетичні антиоксиданти все ще знаходять значне застосування як для харчових, так і технічних олій та жирів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кожна рослинна олія має власну стабільність до окиснення, яка залежить від складу жирних кислот та вмісту й складу антиоксидантів (Nogala-Kalucka, Korczak, Elmadfa, & Wagner, 2005; Przybylski, & Eskin, 2006). Вміст незамінних поліненасичених жирних кислот в оліях зумовлює їх низьку окиснювальну стабільність (Aissa та ін., 2023; Gharby та ін., 2021; Gharby та ін., 2012). Олії з вищою часткою ненасичених жирних кислот мають вищу швидкість окиснення, ніж ті, що мають нижчий ступінь ненасиченості.

Окиснення рослинних олій — комплекс ланцюгових вільнорадикальних реакцій, що призводить до утворення пероксидів, карбонільних сполук і стабільних продуктів окиснення. Ці сполуки негативно впливають на органолептичні якості харчових продуктів, спричиняють харчове псування та скорочують термін придатності (Gharby та ін., 2025). У вільнорадикальні реакції окиснення передусім вступають поліненасичені жирні кислоти, тому внаслідок їх окиснення зменшується біологічна цінність рослинних олій. Біологічна цінність рослинних олій зменшується також у результаті окиснення жиророзчинних вітамінів, пігментів і природних антиоксидантів (Matthaus, 2010; Tao, 2015). Встановлено, що внаслідок окиснення можуть утворюватись такі небезпечні сполуки, як малоновий діальдегід та 4-гідроксиноненаль (Valgimigli, 2023; Zheng, Sun, Luo, Li, & Huang, 2024).

У зв'язку з цим мінімізація окиснення та підвищення окиснювальної стабільності рослинних олій і продуктів на основі ліпідів стають вкрай важливими (Shahidi, & Zhong, 2010). Запобігання окисненню рослинних олій має вирішальне значення для збереження їхньої харчової і біологічної цінності та забезпечення безпеки споживачів.

Рослинні олії містять широкий спектр ендегенних антиоксидантів (наприклад, токоферолі, пігменти, феноли тощо). Однак використання екзогенних антиоксидантів широко практикується для підвищення окиснювальної стабільності олій і жирів. Незважаючи на тренд щодо використання природних антиокислювачів для запобігання окиснювальному псуванню рослинних олій (Sahin, Sayim, & Bilgin, 2017; Gharby та ін., 2022), синтетичні антиоксиданти все ще досить широко використовуються як для харчових рослинних олій, так і технічних, наприклад, сировини для виробництва біодизельного палива, косметичних олій, кормових добавок тощо. З цієї метою використовують, зокрема, синтетичні антиоксиданти, такі як бутилгідроксианізол (БНА), бутилгідрокситолуол (БНТ), трет-бутилгідрохінон (ТБНҚ) і пропілгалат (РГ). Ці синтетичні антиоксиданти відносяться до фенольних сполук, механізм їх дії полягає в тому, що вони відновлюють (гасять) пероксидні радикали з утворенням більш стабільних фенокисильних радикалів. Механізм дії природних жиророзчинних антиоксидантів (токоферолів, токотрієнолів, поліфенолів) аналогічний.

Фенольні сполуки є одними з найстаріших антиоксидантів, які найбільш часто використовують у харчових продуктах. Відмінності в антиоксидантній активності фенольних антиоксидантів зумовлена їх хімічною структурою, яка безпосередньо впливає на хімічні властивості. Феноли, в яких ароматичне кільце містить алкільні групи (блоковані феноли), є надзвичайно ефективними антиоксидантами. ВНА та ВНТ є досить термостабільними та використовуються в харчових технологіях, де передбачена термічна обробка (Reishe, Lillard, & Eitemmiller, 2008). Водночас PG розкладається при 148 °C і не придатний для високотемпературної обробки. ВНА та ВНТ є сильно ліпофільними та широко використовуються в емульсіях «олія у воді».

ВНА та ВНТ також використовуються разом у сумішах, діючи синергічно. Синергетична дія бутилгідрокситолуолу (ВНТ) та бутилгідроксианізола (ВНА) на окиснювальну стабільність олії є доведеним фактом. Основний механізм синергізму, ймовірно, полягає у взаємній регенерації радикалів, де ВНТ виступає як донор гідрогену для окисненого ВНА, підтримуючи активний антиоксидантний потенціал системи. Однак ступінь синергізму є залежною від умов (концентрації, співвідношення, температури та матриці олії) і вимагає оптимізації для конкретного застосування. Зокрема, було встановлено, що за певних концентрацій суміш ВНТ і ВНА може не виявляти позитивного синергетичного ефекту в етилових ефірах соєвої олії, в той час як окремо ВНТ був ефективним (Domingos, Saad Emir, Vechiatto Wellington, Wilhelm Helena, & Luiz Ramos, 2007). Проте інші дослідження, включаючи ті, що вивчали перенесення гідрогену, підтверджують, що перенесення гідрогену від ВНТ регенерує ВНА, що призводить до вищої антиоксидантної активності, ніж в окремих компонентах (Housam Haj Hamdo, Warid Khayata, & Zaid Al-Assaf, 2014; Budilarto, & Kamal-Eldin, 2015).

Фенольні антиоксиданти ефективні при низьких концентраціях, як правило, менше 0,01—0,02%. Обмеження концентрацій, в яких синтетичні антиоксиданти вносяться в харчові жири, залежать від законодавства конкретних країн (Reishe, Lillard, & Eitemmiller, 2008). За високих концентрацій фенольні сполуки стають прооксидантами внаслідок високої реактивності та участі у реакціях ініціації.

Незважаючи на тривале використання синтетичних антиоксидантів для гальмування пероксидного окиснення олій і жирів, питання щодо їх оптимальних концентрацій та співвідношень у сумішах, а також оптимальний склад сумішей для синергічної дії фенольних антиоксидантів залишаються нез'ясованими.

Мета дослідження: дослідити взаємний вплив антиоксидантів бутилгідроксианізола (ВНА) та бутилгідрокситолуолу на ефективність інгібування пероксидного окиснення соєвої олії, встановити їх раціональне співвідношення у антиокиснювальній суміші.

Матеріали і методи. В дослідженні використана нерафінована соєва олія, виготовлена на виробничих потужностях ТАНДЕМ 2002 (Україна).

Тест на прискорене окиснення. Для оцінки окиснювальної стабільності соєвої олії було використано Шааль-тест — нагрівання в контрольованому середовищі (Botosoa, & Karoui, 2022; Flores та ін., 2021). Метод було модифіковано — використано нагрівання олії в сушильній шафі за температури 95—100 °C.

Для дослідження 100 см³ кожного зразка олії нагрівали у відкритих колбах за температури 95—100 °C протягом 11—15 годин. Значення пероксидного числа та

антиоксидантну активність визначали кожні 2 год, відбираючи 2 г та 100 мг олії з кожного зразка олії, відповідно.

Індукційний період прискореного окиснення визначали графічно на основі залежності значення пероксидного числа від тривалості нагрівання. Кожен зразок аналізували в трьох повторностях, а результати представляли як середнє значення $\pm$ стандартне відхилення. Різницї вважали значущими при достовірності $\alpha=0,95$.

Кислотне та пероксидне число олії визначали стандартними методами.

За результатами трьох експериментальних повторень кожного експерименту розраховувалися середнє значення та стандартне відхилення.

Для того, щоб з'ясувати антиоксидантну активність олії (АА), застосовували метод визначення активності гасіння радикалів 2,2-дифеніл-1-пікрілгідразилу (DPPH°) (Broznic, CanadiJuresic, & Milin, 2016). Для реакції використовували розчин 2,2-дифеніл-1-пікрілгідразилу в концентрації 3 мг/100 мл в етилацетаті з оптичною густиною на довжині хвилі 520 нм в діапазоні 0,7—0,9. Для приготування реакційної суміші до 100 мг олії додали 15 см³ розчину DPPH°, ретельно перемішували та визначали початкову оптичну гуστину реакційної суміші при 520 нм (A₀). Реакційну суміш витримували в темряві протягом 30 хв, коли реакція досягала стаціонарного стану, вимірювали оптичну гуστину на довжині хвилі 520 нм (A₃₀). Антиоксидантну активність (у %) розраховували як загальне зв'язування DPPH° протягом 30 хв:

$$AA = \frac{A_0 - A_{30}}{A_0} \cdot 100.$$

Вимірювання проводили у трьох повторностях, обчислювали середні значення та стандартні відхилення.

Викладення основних результатів дослідження. Початкові фізико-хімічні показники пресової соєвої олії свідчать про низький вміст первинних продуктів окиснення, а також низький вміст вільних жирних кислот (табл. 1). Антиоксидантна здатність соєвої олії була достатньо високою і становила 43,3% зв'язаних радикалів 2,2-дифеніл-1-пікрілгідразилу.

Таблиця 1. Фізико- хімічні показники пресової соєвої олії

Зразок	Кислотне число, мг КОН/г олії	Пероксидне число, meq O/kg oil	Антиоксидантна активність, % гасіння радикалів DPPH° протягом 30 хв
Соєва олія	0,47 $\pm$ 0,13	1,68 $\pm$ 0,04	43,3 $\pm$ 25

Прискорене окиснення соєвої олії протягом 11 год призвело до збільшення пероксидного числа з 2,3 до 9,8 мМоль $\frac{1}{2}$ O/кг (рис. 1). Залежність ступеня окиснення олії від тривалості нагрівання добре описується експоненціальним рівнянням з апроксимаційною надійністю R²=0,975. Індукційний період окиснення, протягом якого вміст пероксидів в олії не змінювався, становив приблизно 2 години. Після цього періоду швидкість утворення пероксидів почала зростати внаслідок природного виснаження антиоксидантів і прискорення автоокиснення. Нетривалий індукційний період окиснення соєвої олії зумовлений високим вмістом поліненасичених жирних кислот. Водночас швидкість накопичення пероксидів після закінчення індукційного періоду була достатньо низькою.

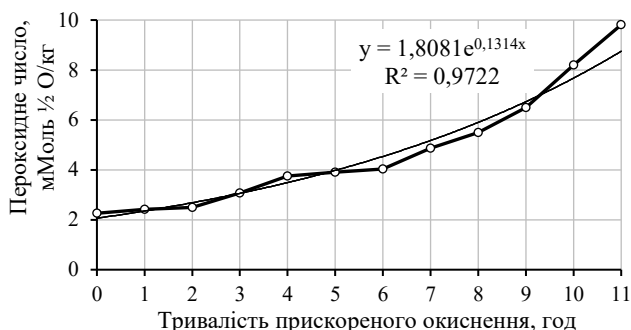


Рис. 1. Кінетика прискореного окиснення соєвої олії за температури 100 °С

Додавання антиоксидантів бутилгідрокситолуолу (ВНТ) у концентрації 0,01 % суттєво подовжує тривалість індукційного періоду прискореного окиснення, він становив 6 год (рис. 2). Водночас, після індукційного періоду швидкість окиснення в присутності 0,01% ВНТ була високою, наприкінці дослідження пероксидне число досягло значення 9,6 мМоль ½ О/кг.

Бутилгідроксианізол (ВНА) в такій же концентрації подовжував індукційний період прискореного окиснення соєвої олії лише на 1 год порівняно з контролем. Проте накопичення пероксидів після закінчення індукційного періоду було дуже повільним і через 15 год прискореного окиснення значення пероксидного числа становило 4,35 мМоль ½ О/кг.

Використання суміші ВНТ та ВНА загальною концентрацією 0,01% у співвідношенні 1:1 подовжувало тривалість індукційного періоду до 8 год з подальшим зростанням значення пероксидного числа.

За використання суміші ВНТ та ВНА загальною концентрацією 0,01% у співвідношенні 1:3 та 3:1 тривалість індукційного періоду прискореного окиснення становила 5 годин. Кінетика наступного прискореного окиснення олії із сумішами даних антиоксидантів була також дуже подібною (рис. 2), водночас значення пероксидного числа для суміші антиоксидантів ВНТ та ВНА у співвідношенні 3:1 було на 0,4—0,9 мМоль ½ О/кг вищим порівняно зі співвідношенням ВНТ та ВНА 1:3.

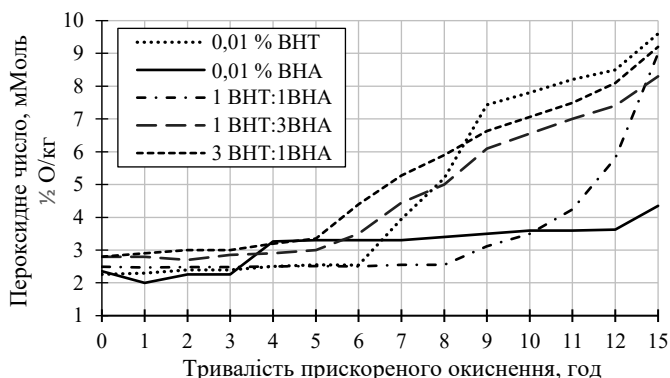
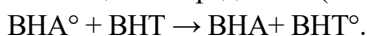


Рис. 2. Кінетика прискореного окиснення соєвої олії за температури 100 °С в присутності антиоксидантів бутилгідрокситолуолу (ВНТ) та бутилгідроксианізолу (ВНА)

Порівняльні дані тривалості індукційного періоду прискореного окиснення олії та кінцевих значень пероксидного числа наведені на рис. 3 і 4. Оскільки механізм дії фенольних антиоксидантів бутилгідрокситолуолу та бутилгідроксианізола аналогічний, вони зв'язують пероксидні радикали (Patil, 2013), можна зробити припущення, що ефективність суміші антиоксидантів має бути аналогічною до ефективності окремого антиоксиданту за однакової концентрації. Проте одержані дані свідчать, що тривалість індукційного періоду прискореного окиснення соєвої олії за температури 100 °С в присутності суміші антиоксидантів у співвідношенні 1:1 та загальній концентрації 0,01% вища порівняно з кожним окремим антиоксидантом у тій же концентрації. Одержані дані свідчать про синергізм дії бутилгідрокситолуолу та бутилгідроксианізола щодо зв'язування пероксидних радикалів. Однією з гіпотез щодо механізму синергізму між ВНА та ВНТ у ліпідних системах є взаємна регенерація або стабілізація їхніх радикалів (Valgimigli, 2023) за реакцією:



Радикал ВНТ° , який утворюється в результаті, може бути більш стабільним або менш реактивним, ніж радикал ВНА° . Таким чином, суміш підтримує ефективнішу концентрацію активного антиоксиданту (ВНА) протягом більш тривалого часу.

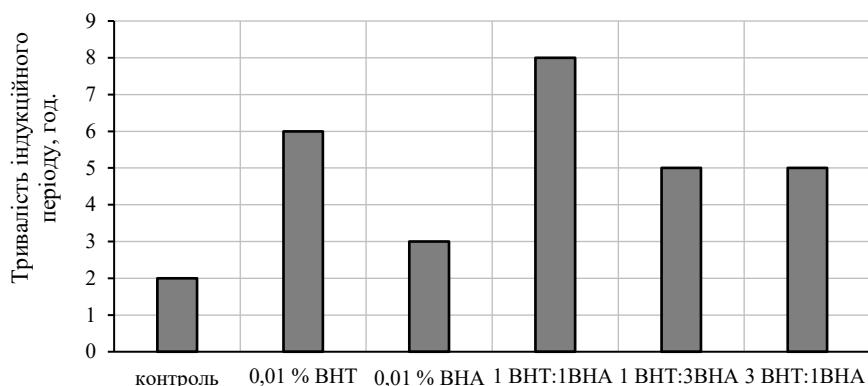


Рис. 3. Тривалість індукційного періоду прискореного окиснення соєвої олії за температури 100 °С в присутності антиоксидантів бутилгідрокситолуолу (ВНТ) та бутилгідроксианізола (ВНА)

Водночас швидкість окиснення олії та кінцеве значення пероксидного числа були найменшими за концентрації 0,01% ВНА (рис. 5). За використання суміші ВНТ та ВНА суттєвої різниці кінцевого значення пероксидного числа не було виявлено за всіх досліджених співвідношень.

У дослідженнях антиоксидантної ефективності антиоксидантів у процесі довготривалого зберігання олії за температури 20 ± 5 °С було встановлено, що найвищу ефективність щодо гальмування процесу окиснення мали суміші ВНТ та ВНА загальною концентрацією 0,01% у співвідношенні 1:3 та 3:1 (рис. 5). Мінімальне значення пероксидного числа мав зразок олії, який містив суміш антиоксидантів із співвідношенням ВНТ та ВНА 1:3, воно становило $5,12 \text{ мМоль } \frac{1}{2} \text{ О/кг}$. Зразки олії із ВНТ, ВНА та їх суміші у співвідношенні 1:1 мали близькі кінцеві значення пероксидного числа, вони були суттєво нижчими, ніж у контрольному зразку олії.

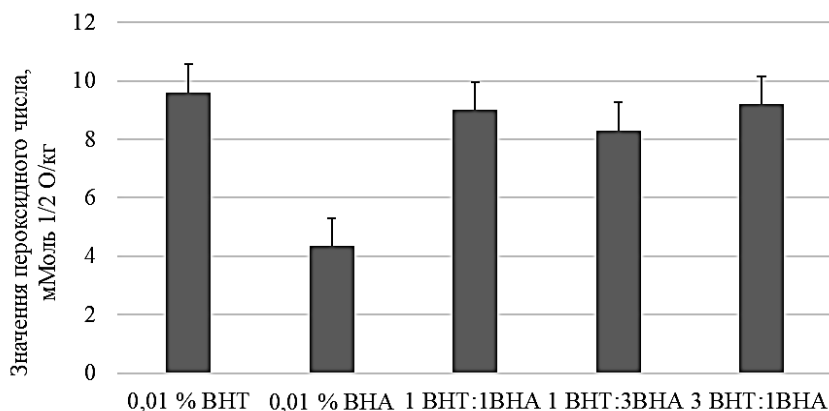


Рис. 4. Значення пероксидного числа соєвої олії наприкінці прискореного окиснення протягом 15 год за температури 100 °С в присутності антиоксидантів бутилгідрокситолуолу (BHT) та бутилгідроксианізолу (BHA) загальною концентрацією 0,01%

Отже, суміш антиоксидантів BHT та BHA має найвищу синергічну ефективність щодо окиснювальної стабільності соєвої олії в процесі зберігання за співвідношення 1 BHT:3BHA.

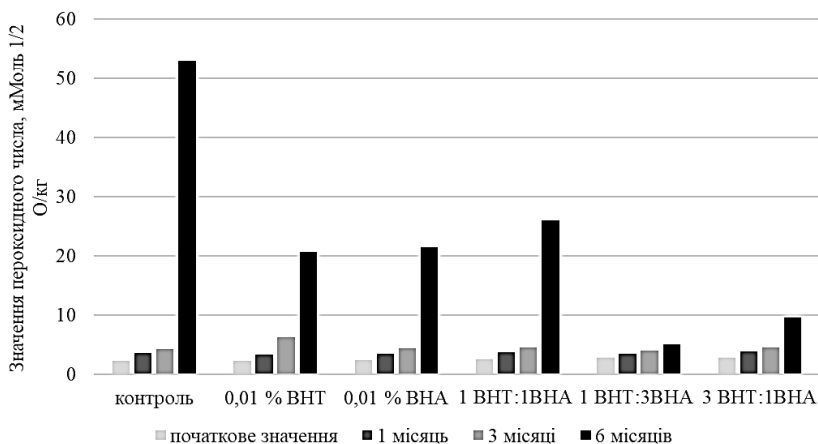


Рис. 5. Значення пероксидного числа соєвої олії наприкінці довготривалого зберігання за температури 20±5 °С в присутності антиоксидантів бутилгідрокситолуолу (BHT) та бутилгідроксианізолу (BHA) загальною концентрацією 0,01%

Висновки

1. Одержані результати свідчать, що синтетичні фенольні антиоксиданти мають високу ефективність щодо гальмування пероксидного окиснення соєвої олії у концентрації 0,01%, подовжуючи тривалість індукційного періоду та зменшуючи швидкість подальшого окиснення олії як у процесі прискореного окиснення, так і під час зберігання олії.

2. Під час прискореного окиснення олії найвищу ефективність щодо збільшення тривалості індукційного періоду мала суміш антиоксидантів бутилгідрокситолуолу та бутилгідроксианізолу у співвідношенні 1:1. Водночас швидкість прискореного окиснення найбільш ефективно гальмувалась бутилгідроксианізолом концентрацією 0,01%.

3. Під час довготривалого зберігання олії за температури 20 ± 5 °C найвищу синергічну ефективність щодо окиснювальної стабільності соєвої олії мала суміш антиоксидантів BHT та BHA за співвідношення 1 BHT:3BHA та концентрації 0,01%. Таку суміш можна рекомендувати як найбільш раціональну для запобігання окиснювального псування соєвої олії під час зберігання.

Література

- Aissa, R., Asbbane, A., Oubannin, S., Bijla, L., Bousaid, Z., Hallouch, O., & Gharby, S. (2023). Oxidative stability of virgin and refined Argan [*Argania spinosa* L. (Skeels)] oil under accelerated aging conditions and shelf-life prediction at room temperature: A comparative study. *Analytica*, 4(4), 500—512. <https://doi.org/10.3390/analytica4040034>.
- Botosoa, E. P., & Karoui, R. (2022). 3D front face fluorescence spectroscopy as a tool for monitoring the oxidation level of edible vegetable oil during storage at 60 °C. *LWT — Food Science and Technology*, 154, 112659. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112659>.
- Broznic, D., Canadi Juresic, G., & Milin, C. (2016). Involvement of α -, γ - and δ -tocopherol isomers from pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) seed oil or oil mixtures in the biphasic DPPH disappearance kinetics, *Food Technology and Biotechnology*, 54(2), 200—210. <https://doi.org/10.17113/ftb.54.02.16.4063>.
- Budilarto, E. S., & Kamal-Eldin, A. (2015). The supramolecular chemistry of lipid oxidation and antioxidation in bulk oils. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 117(8), 1095—1137. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201400200>.
- Domingos, A. K., Saad Emir, B., Vechiatto Wellington, W. D., Wilhelm Helena, M., & Luiz Ramos, P. (2007). The Influence of BHA, BHT and TBHQ on the Oxidation Stability of Soybean Oil Ethyl Esters (Biodiesel). *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 18(2), 416—423. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532007000200026>.
- Haj Hamdo, H., Khayata, W., & Al-Assaf, Z. (2014). Synergistic Effect of combined some natural and synthetic antioxidants to increase oxidative stability using DPPH test. *International Journal of ChemTech Research*, 6(4), 2539—254. [https://sphinxnsai.com/2014/vol6pt4/5/\(2539-2545\)Jul-Aug14.pdf](https://sphinxnsai.com/2014/vol6pt4/5/(2539-2545)Jul-Aug14.pdf).
- Fadda, A., Sanna, D., Sakar, E. H., Gharby, S., Mulas, M., Medda, S., & Durazzo, A. (2022). Innovative and sustainable technologies to enhance the oxidative stability of vegetable oils. *Sustainability*, 14(2), 849. <https://doi.org/10.3390/su14020849>.
- Flores, M., Avendano, V., Bravo, J., Vald'es, C., Forero-Doria, O., Quitral, V., ..., Ortiz Viedma, J. (2021). Edible oil parameters during deterioration processes. *International Journal of Food Science*, 17(9), Article ID 7105170. <https://doi.org/10.1155/2021/7105170>.
- Gharby, S., Asbbane, A., Ahmed, M. N., Gagour, J., Hallouch, O., Oubannin, S., Ibourki, M. (2025). Vegetable oil oxidation: Mechanisms, impacts on quality, and approaches to enhance shelf life. *Food Chemistry*, 28(5), 102541. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102541>.
- Gharby, S., Harhar, H., El Monfalouti, H., Kartah, B., Maata, N., Guillaume, D., & Charrouf, Z. (2012). Chemical and oxidative properties of olive and argan oils sold on the Moroccan market. A comparative study. *Mediterranean Journal of Nutrition and Metabolism*, 5(1), 31—38. <https://doi.org/10.1007/s12349-011-0076-5>.
- Gharby, S., Guillaume, D., Nounah, I., Harhar, H., Hajib, A., Matthaus, B., & Charrouf, Z. (2021). Shelf-life of Moroccan prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) and argan (*Argania spinosa*) oils: A comparative study. *Grasas y Aceites*, 72(1), Article 1. <https://doi.org/10.3989/gya.1147192>.
- Gharby, S., Oubannin, S., Ait Bouzid, H., Bijla, L., Ibourki, M., Gagour, J., & Bouyahya, A. (2022). An overview on the use of extracts from medicinal and aromatic plants to improve nutritional value

and oxidative stability of vegetable oils. *Foods*, 11(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/foods11203258>.

Matthaus, B. (2010). Oxidation of edible oils. In: *Oxidation in foods and beverages and antioxidant applications*. Elsevier, 183—238. <https://doi.org/10.1533/9780857090331.2.183>.

Nogala-Kalucka, M., Korczak, J., Elmadfa, I., & Wagner, K.-H. (2005). Effect of d-tocopherol on the oxidative stability of a mixed hydrogenated fat under frying conditions. *European Food Research and Technology*, 221, 291—297. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-1161-0>.

Przybylski, R., & Eskin, N. (2006). Minor components and the stability of vegetable oils. *INFORM*, 17:187—189. <https://inform.aocs.org/>.

Patil, D. (2013). Role of antioxidants in stability of edible oil. *Trends in Post Harvest Technology*. 1(1), 68—73. jakraya.com/journal/tpht.

Reishe, D. A., Lillard, D. W., & Eitemmiller, R. R. (2008). Antioxidants in food lipids. In: Akoh, C. C., Min, D. B. (eds.) *Food Lipids: Chemistry, Nutrition, and Biotechnology*, 3rd Ed. 409—435, U.S.A, CRC Press Inc. https://books.google.com.ua/books/about/Food_Lipids.html?id=sPglndmgXU8C&redir_esc=y.

Sahin, S., Sayim, E., & Bilgin, M. (2017). Effect of olive leaf extract rich in oleuropein on the quality of virgin olive oil. *Journal of Food Science and Technology*, 54(6), 1721—1728. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2607-7>.

Shahidi, F., & Zhong, Y. (2010). Lipid oxidation and improving the oxidative stability. *Chemical Society Reviews*, 39, 4067—4079. <https://doi.org/10.1039/b922183m>.

Tao, L. (2015). Oxidation of polyunsaturated fatty acids and its impact on food quality and human health. *Advances in Food Technology and Nutritional Sciences*, 1(6), 135—142. <https://doi.org/10.17140/AFTNSOJ-1-123>.

Valgimigli, L. (2023). Lipid peroxidation and antioxidant protection. *Biomolecules*, 13(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/biom13091291>.

Zheng, Y., Sun, J., Luo, Z., Li, Y., & Huang, Y. (2024). Emerging mechanisms of lipid peroxidation in regulated cell death and its physiological implications. *Cell Death & Disease*, 15(11), 1—19. <https://doi.org/10.1038/s41419-024-07244-x>.

УДК 663.5:634.11

FORMATION OF THE AROMATIC COMPLEX OF FRUIT DISTILLATES (BASED ON THE EXAMPLE OF VINNYTSIA REGION)

O. Lukanin, <https://orcid.org/0009-0003-7786-5942>

National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine

N. Melnyk, <https://orcid.org/0009-0001-1667-6780>

Institute of Agroecology and Nature Management of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine

Key words:

Apple distillate
Aroma compounds
Fermentation

Article history:

Received 10.11.2025
Received in revised form
21.11.2025
Accepted 16.12.2025

Corresponding author:

O. Lukanin

E-mail:

17natasha17@gmail.com

Citation: Луканін О. С., Мельник Н. Б. (2025). Формування ароматичного комплексу плодових дистилатів (на прикладі Вінницької обл.). *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 295—306. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-22

ABSTRACT

A comprehensive three-year study was conducted on the influence of varietal characteristics of Snow Calville, Aidedared, Jonathan, Boyken, and Montuan apples and the selection of yeast strains from the collection of the National Institute of Viticulture and Winemaking "Magarach" of National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine (*Saccharomyces cerevisiae* "Cider 101", "Apple 7") and autochthonous wild yeasts on the concentration of higher alcohols and associated aromatic compounds in apple distillates. The analysis included the determination of the physicochemical indicators of the fruit, agrochemical parameters of the soil, and quantitative determination of volatile compounds by gas chromatography. The results showed that the concentrations of isoamyl alcohol ranged from ≈ 135 to 537 mg/100 cm^3 ; 2-phenylethanol — within ≈ 4 — 42 mg/100 cm^3 ; 1-hexanol — ≈ 6 — 30 mg/100 cm^3 ; ethyl acetate — ≈ 114 — 210 mg/100 cm^3 . Statistical analysis revealed correlations between agrochemical indicators of soil (primarily nitrogen content) and concentrations of higher alcohols, as well as a strong influence of the yeast strain on the ratio of higher alcohols to esters. Elevated concentrations of isoamyl alcohol and 1-hexanol negatively affect the sensory quality of distillates. The conclusions provide recommendations for selecting raw materials in order to obtain the desired sensory characteristics. The hypothesis is that the soil in which the apples were grown and the choice of yeast strain significantly affect the concentration of higher alcohols (in particular isoamyl alcohol) in the distillate. The results showed that the Boiken apple variety in combination with "Cider 101" produced the highest level of isoamyl alcohol (537 mg/100 cm^3), while the lowest levels of isoamyl alcohol were observed for the "Montuanske" variety when wild yeast was used (135 mg/100 cm^3). The data obtained allow to recommend optimal combinations of varieties and yeast strains for the production of apple distillates with a given profile of higher alcohols. The practical value of the study lies in the possibility of controlling the organoleptic properties of distillates through the selection of raw materials and the microbiological component of fermentation.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-22

ФОРМУВАННЯ АРОМАТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ ПЛОДОВИХ ДИСТИЛЯТІВ (НА ПРИКЛАДІ ВІННИЦЬКОЇ ОБЛ.)

О. С. Луканін, <https://orcid.org/0009-0003-7786-5942>

Національна академія аграрних наук України

Н. Б. Мельник, <https://orcid.org/0009-0001-1667-6780>

Інститут агроекології і природокористування НААН України

Проведено комплексне трирічне дослідження впливу сортових особливостей яблук сортів Кальвіль сніговий, Айдаред, Джонатан, Бойкен, Монтуанське та вибору штамів дріжджів з колекції Національного інституту виноградарства і виноробства «Магарач» Національної академії аграрних наук України (*Saccharomyces cerevisiae* «Сидрова 101», «Яблучна 7») і автохтонних диких дріжджів на концентрації вищих спиртів і супутніх ароматичних сполук у яблучних дистилятах. Аналіз включав визначення фізико-хімічних показників плодів, агрохімічних параметрів ґрунтів і кількісне визначення летких сполук методом газової хроматографії. Результати показали, що концентрації ізоамілового спирту коливаються в межах $\approx 135\text{--}537\text{ мг/100 см}^3$; 2-фенілетанол — у межах $\approx 4\text{--}42\text{ мг/100 см}^3$; 1-гексанол — $\approx 6\text{--}30\text{ мг/100 см}^3$; етилацетат — $\approx 114\text{--}210\text{ мг/100 см}^3$. Статистичний аналіз виявив кореляції між агрохімічними показниками ґрунту (насамперед вміст азоту) і концентраціями вищих спиртів, а також сильний вплив штаму дріжджів на співвідношення «вищі спирти : естери». Підвищені концентрації ізоамілового та 1-гексанолу негативно впливають на органолептичну якість дистилятів. У висновках наведено рекомендації щодо вибору сировини з метою отримання бажаних органолептичних характеристик. Гіпотеза полягає в тому, що ґрунти, на яких вирощували яблука, та вибір штамів дріжджів суттєво впливають на концентрацію вищих спиртів (зокрема ізоамілового) у дистиляті. Результати показали, що сорт яблук Бойкен у комбінації із Сидровою 101 формує найвищий рівень ізоамілового спирту (537 мг/100 см^3), найнижчі показники ізоамілового спирту спостерігались для сорту Монтуанське при використанні диких дріжджів (135 мг/100 см^3). Отримані дані дозволяють рекомендувати ґрунти, на яких вирощують яблука, з оптимальним вмістом азоту та комбінації сортів і штамів дріжджів для виробництва яблучних дистилятів із заданим профілем вищих спиртів. Практична цінність проведених досліджень полягає в можливості контролю органолептичних властивостей дистилятів через вибір ґрунтів, сировини та мікробіологічної складової ферментації.

Ключові слова: яблучний дистилят, ароматичні речовини, ферментація.

Постановка проблеми. Українська плодопереробна промисловість, зокрема виробництво плодових дистилятів з яблук, має високий потенціал завдяки багатим місцевим сировинним ресурсам. Однак, її розвиток стримується відсутністю науково обґрунтованого вибору регіонів з необхідними ґрунтами та кліматичними

умовами, придатними для вирощування яблук, що використовуються в промисловому переробленні, підбору необхідних технічних сортів яблук, а також штамів дріжджів.

Вплив характеристик ґрунту та місцевих штамів дріжджів на утворення ключових летких сполук (вищих спиртів, ефірів, альдегідів) досі залишається недостатньо вивченим. Відсутність інтегрованих агрономічних, хімічних і мікробіологічних даних перешкоджає створенню стандартизованих, орієнтованих на теруар українських плодових дистилятів зі стабільною якістю та виразними сенсорними профілями.

Вітчизняна плодопереробна галузь — є важливою складовою агропромислового комплексу та національної культури України, однак сьогодні вона стикається з низкою серйозних викликів. Трансформація агропромислового комплексу актуалізує потребу в нових векторах розвитку харчової промисловості, зорієнтованих на використання локальної сировини, екологічну сталість і диференціацію продукції. Одним із перспективних напрямів є виробництво плодових дистилятів, зокрема яблучних, що поєднують традиційність сировинної бази з високим потенціалом створення напоїв з виразним ароматичним профілем. За даними FAOSTAT (2024) Україна посідає 9-е місце у світі за обсягами вирощування яблук, що формує потужну основу для національного виробництва міцних плодових напоїв. Особливо сприятливі умови для цього має Вінницька область, де зосереджено значні площі промислових садів і розвинена інфраструктура зберігання й перероблення плодів.

Додатковим обмеженням є наслідки повномасштабного вторгнення: зменшення площ садів, пошкодження потужностей переробних підприємств та загальний спад виробництва, що призвели до суттєвого скорочення площ садів і виноградників, руйнування підприємств та зменшення обсягів виробництва продуктів перероблення плодів, ягід і винограду (Беженар, 2025). За цих умов особливої ваги набуває вдосконалення вибору ґрунтів і регіонів, придатних для зростання садів для промислового перероблення яблук, а також вдосконалення технологічних процесів ферментації і дистиляції з урахуванням якісних показників локальної сировини й автохтонної мікрофлори.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних наукових дослідженнях значна увага приділяється летким сполукам, що визначають ароматичний комплекс плодових дистилятів. До ключових компонентів відносять вищі спирти, естери та альдегіди, співвідношення яких зумовлює характерні фруктові, квіткові чи трав'янисті ноти напою. Надлишок окремих фракцій, зокрема ізоамілового спирту чи 1-гексанолу, призводить до погіршення органолептичних властивостей продукту (Śliwińska, Wiśniewska, & Namieśnik, 2015; Spaho et al., 2021).

Дослідження дріжджових штамів підтверджують їхню вирішальну роль у формуванні профілю летких сполук. Комерційні штами *Saccharomyces cerevisiae* забезпечують стабільність процесу, тоді як автохтонні дикі дріжджі сприяють збагаченню дистилятів індивідуальними ароматичними характеристиками. У сучасній практиці набуває поширення комбіноване застосування промислових і локальних штамів для досягнення балансу між технологічною передбачуваністю та сенсорним різноманіттям (Januszek, Satora, & Tarko, 2020; Pham et al., 2022).

Окремий напрям досліджень стосується впливу агрохімічних властивостей ґрунту на якість сировини та кінцевого продукту. Встановлено, що рівень азотного живлення є критичним чинником утворення вищих спиртів, тоді як баланс елементів живлення загалом формує передумови для стабільної ферментації та розвитку бажаного ароматичного профілю (Guichard, Lemesle, & Picoche, 2003).

Узагальнення результатів публікацій показує, що на формування органолептичних властивостей яблучних дистилятів суттєво впливають три взаємопов'язані фактори: сортові особливості плодів, склад мікрофлори, залученої у ферментації, та агрохімічні параметри ґрунту. Саме інтеграція цих чинників визначає можливість створення продукції зі стабільною якістю та теруарним характером.

У працях українських вчених особливу увагу приділено вибору сировини й оптимізації біотехнологічних процесів для отримання високоякісних плодово-ягідних дистилятів. Так, у дослідженнях наголошується на важливості правильного підбору сортів яблук для виробництва сидрових матеріалів, що характеризуються оптимальним співвідношенням цукрів, кислот та ароматичних речовин (Байлук, 2010).

Досліджено штами дріжджів, здатні ефективно зброджувати сусло в умовах низьких температур, що дозволяє зберігати природний ароматичний профіль майбутнього продукту. Під час перегонки сидрових матеріалів досягнуто високого виходу етилового спирту, а отримані плодово-ягідні дистиляти відповідали встановленим фізико-хімічним стандартам та вирізнялися високими органолептичними характеристиками (Токар та ін., 2019).

Розроблено апаратурно-технологічну схему виробництва плодово-ягідних дистилятів, що мають практичне значення для впровадження у промисловість (Мамай, Кузьміна, & Березовський, 2025).

Подальший розвиток напрямку досліджень пов'язаний зі створенням сенсорних профілів українських напоїв, що дозволяє формувати стандартизовані критерії оцінки якості та споживчих характеристик. Висвітлено методологію та результати створення сенсорного профілю українських алкогольних напоїв. Дослідження спрямоване не лише на забезпечення високих органолептичних показників, але й на підвищення конкурентоспроможності продукції на внутрішньому та зовнішньому ринках (Манолі, Афанасьєва, & Каплан, 2025).

Вітчизняні дослідники (сортологія, агротехніка, технологія перероблення) надають практичні рекомендації щодо відбору сортів, термінів збору й агроконтролю (Shevchuk et al., 2021), але вони були недостатньо пов'язані з аналітикою летких сполук і мікробіологією процесу ферментації. Дослідження направлене на інтегрування агрономічних показників (ґрунт, азот, рН, вміст фенолів) з газохроматографічними аналізами дистилятів і з характеристиками дріжджових штамів, заповнюючи цю прогалину. Це створює основу для формування місцевих «теруарних» продуктів із контрольованою якістю.

Міжнародні дослідження підтверджують вирішальну роль летких сполук: вищих спиртів, естерів та альдегідів, у формуванні ароматичного комплексу плодово-ягідних дистилятів (Spaho et al., 2021; Sliwińska, Wiśniewska, & Namieśnik, 2015; Januszczek, Satora, & Tarko, 2020). Зокрема, у (Guichard, Lemesle, & Picoche, 2003) підкреслено, що співвідношення ізоамілового, ізобутилового спиртів, 1-пропанолу,

2-фенілетанолу та 1-гексанолу визначає фруктові, квіткові чи трав'янисті ноти напою. У (Pham et al., 2022) довели залежність концентрацій цих компонентів від дріжджового штаму та параметрів ферментації. Проте більшість досліджень базуються на класичних сортових зразках і комерційних штамах дріжджів, майже не враховуючи впливу локального мікробіому. Аналіз літератури підтвердив, що тема є актуальною і потребує подальших досліджень.

Мета дослідження: встановити вплив структури та хімічного складу ґрунтів і штаму дріжджів на формування концентрацій ключових летких компонентів, насамперед вищих спиртів, у яблучних дистилятах із сировини садів Вінницької області.

Матеріали і методи. Дослідження проводилося протягом трьох років на базі садівничого господарства Вінницької області. Для експериментів використовували яблука сортів Кальвіль сніговий, Айдаред, Джонатан, Бойкен та Монтуанське. Ферментація здійснювалася із застосуванням штамів дріжджів *Saccharomyces cerevisiae* («Сидрова 101», «Яблучна 7») та автохтонних диких мікроорганізмів.

Аналітичні процедури включали:

агрохімічний аналіз ґрунтів: визначення рН, вмісту гумусу, азоту, фосфору та калію;

фізико-хімічні показники суслу: концентрація розчинних сухих речовин, цукрів, титрованих кислот, фенольних речовин, показник рН;

газохроматографічний аналіз летких сполук у дистилятах (вищі спирти, естери, альдегіди).

Визначення складу летких домішок етилового спирту у плодових дистилятах проводили газохроматографічним методом із використанням газового аналізатора «Хроматек Кристал-2000М», обладнаного полум'яно-іонізаційним детектором. Для розділення компонентів застосовували капілярну полярну колонку Stabilwax довжиною 60 м, внутрішнім діаметром 0,32 мм та товщиною стаціонарної фази 0,5 мкм.

Як газ-носії використовували азот (N_2) зі швидкістю подачі 3 мл/хв. Температурну програму термостата задавали у діапазоні від 65 °С (із витримкою 12 хв 20 с) до 210 °С. Нагрівання здійснювали у два етапи: спочатку зі швидкістю 20 °С/хв до 100 °С, потім зі швидкістю 4 °С/хв до 210 °С. Температура випаровувача становила 160 °С, а детектора — 220 °С.

Після завершення аналізу колонку продували при температурі 215 °С протягом 5 хв при тиску газу-носія 150 кПа. Тривалість одного хроматографічного аналізу становила 1 год 10 хв.

Статистичну обробку результатів для виявлення кореляцій між агрохімічними характеристиками ґрунтів, сортовими особливостями та профілем ароматичних компонентів проводили за (Zeng et al., 2025).

Переробка плодів здійснювалася у промислових умовах з використанням сучасних технологічних ліній дроблення, пресування та дистиляції. Це забезпечило відтворюваність умов і достовірність результатів.

Викладення основних результатів дослідження. Вінницька область є одним із провідних центрів садівництва України, де на площах понад 60 тис. га вирощується широкий асортимент плодових культур. Клімат регіону характеризується помірно-континентальним типом з вираженими сезонними коливаннями, достатньою кількістю опадів (550—600 мм на рік) та значними добовими амплітудами

температур у період досягання плодів (Садовський, 2024). Ці чинники забезпечують інтенсивний синтез цукрів, збереження органічних кислот і формування ароматичних попередників, що обумовлює високу технологічну придатність яблук до переробки на дистиляти (Токар та ін., 2019).

Відбір яблук проводився на ПАТ «Дружба» (Вінницька обл.). Господарство спеціалізується на промисловому садівництві, має багаторічні насадження яблуні. Кліматичні умови Вінницької області (помірно-континентальний клімат, контраст добових температур у період досягання) сприяють формуванню оптимального співвідношення цукрів і кислот у плодах, а також збагаченню їх ароматичними попередниками, що зумовлює високу технологічну придатність сировини для виробництва дистилятів (Orcheski, Hedderley, & Volz, 2023).

Перероблення плодів здійснювалася на виробничій базі ТОВ «Серсіаль» (Київська обл.), що спеціалізується на переробці винограду та яблук, як сировини, у тому числі і для виробництва плодових дистилятів. Підприємство оснащено сучасними технологічними лініями для дроблення та пресування фруктів, пресом прямого віджиму фірми Voran (Австрія), універсальними дистиляційними апаратами типу алямбік (подвійної перегонки) та колонного типу, ферментації в сталевих резервуарах з автоматичним контролем температури, а також дистиляційними апаратами типу алямбік і колонного типу. Наявність власної науково-виробничої лабораторії дозволяє здійснювати контроль основних фізико-хімічних параметрів та аналітику летких компонентів дистилятів, що забезпечило високий рівень достовірності проведених досліджень (Balcerek, Pielech-Przybylska, & Bartosik, 2023; Spaho et al., 2021).

У дослідженні було використано п'ять сортів яблук — Кальвіль сніговий, Айдаред, Бойкен, Джонатан та Монтуанське. За результатами аналізу всі досліджені сорти відповідали вимогам до сировини для виробництва дистилятів: вміст розчинних сухих речовин коливався в межах 11,2—14,1, титрована кислотність — 5,1—8,0 г/л, рН — 3,2—3,6. Таке поєднання показників забезпечує достатній вміст субстрату для ферментації та формування стабільного кислотно-лужного середовища, що є критично важливим для розвитку дріжджів і запобігання контамінації (Balcerek, Pielech-Przybylska, & Bartosik, 2023).

Також було проведено дослідження агрохімічних показників ґрунтів під яблуневими насадженнями у Вінницькій області (табл. 1).

Таблиця 1. Агрохімічні показники ґрунтів під яблуневими

№ п/п	Місце відбору	Назва сорту	Назва квадрату відбору	Глибина відбору	pH	Гумус, %	N	P	K
1.	Вінницька обл.		15 кв.	0—0,28	4,73	2,71	70,0	67	56
2.	Тульчинський район			0,28—0,83	4,90		38,5	62	50
3.	С. Шура Копіївська			0,83—1,1	4,99		17,5	41	28
4.	ПАТ «Дружба»			1,1—1,5	4,85		14,0	24	22
5.		Айдаред		0—0,28	5,31	2,83	92,75	194	177

Продовження таблиці 1

6.				0,28—0,83	5,25		78,75	111	88
7.				0,83—1,1	5,15		27,5	67	55
8.				1,1—1,5	5,25		18,0	49	38

Джерело: створено авторами за результатами власних досліджень.

Вміст азоту є одним з основних чинників при вирощуванні яблук і виробництві плодових дистилятів. Оскільки вміст азоту впливає на вміст вищих спиртів, підвищує концентрацію таких вищих спиртів, як пропіловий спирт, 2-метилпропанол, ізоаміловий спирт, 2-метилбутанол (Schön et al., 2024). У зразках ґрунту вміст азоту дещо підвищений. Потрібно провести дослідження вищих спиртів, щоб побачити, який вміст вищих спиртів у цьому регіоні.

Фізико-хімічні показники яблук. Аналіз соків із п'яти сортів показав стабільність основних параметрів протягом трирічного періоду. Найвищий вміст розчинних сухих речовин зафіксовано у сортів Монтуанське та Кальвіль сніговий (до 14,9%), що свідчить про їх підвищену цукристість і високу придатність для виробництва дистилятів із вираженим фруктовим характером (Jordão, Vilela, & Cosme, 2015).

Сорт Бойкен характеризувався найбільшою титрованою кислотністю (8,0—10,3 г/дм³), що зумовлює кислуватий смак і впливає на сенсорний профіль майбутнього дистиляту. Водночас Кальвіль сніговий мав найнижчий рівень кислотності (3,8—5,9 г/дм³), що формує м'якіший смак (Shevchuk et al., 2021).

Вміст фенольних сполук коливався від 0,5 до 0,9 г/дм³. Найвищі значення відзначені у сорту Монтуанське, що підвищує його антиоксидантний потенціал та надає легкі терпкі відтінки. Показник рН у межах 3,1—3,7 відповідає типовим значенням для яблучної сировини та забезпечує стабільність ферментаційних процесів (табл. 2).

Таблиця 2. Визначення фізико-хімічних показників сусла, отриманого з яблук, зібраних у ПАТ «Дружба» Шура Копівська

Сорт яблук	Густина, г/см ³	Сухі розчинні речовини, %	Цукри, г/100 см ³	Титровані кислоти, г/дм ³	Фенольні речовини, г/дм ³	рН
1 рік дослідження						
Монтуанське	1,053	14,0	11,4	5,7	0,576	3,44
Бойкен	1,049	12,2	10,3	10,3	0,761	3,10
Кальвіль сніговий	1,050	13,0	10,6	5,9	0,502	3,36
Айдаред	1,047	12,6	9,5	5,6	0,496	3,24
Джонатан	1,054	13,8	11,6	6,1	0,682	3,30
2 рік дослідження						
Монтуанське	1,058	14,0	12,7	4,42	0,886	3,70
Бойкен	1,048	12,0	10,0	8,04	0,657	3,22
Кальвіль сніговий	1,058	14,9	12,7	3,82	0,756	3,50
Айдаред	1,053	13,0	11,4	4,69	0,732	3,50
Джонатан	1,054	13,9	11,8	6,5	0,793	3,40

Продовження таблиці 2

3 рік дослідження						
Монтуанське	1,056	14,0	12,6	5,2	0,854	3,50
Бойкен	1,049	12,2	10,2	8,56	0,712	3,16
Кальвіль сніговий	1,058	13,9	12,5	4,5	0,604	3,31
Айдаред	1,052	12,8	11,0	5,0	0,642	3,26
Джонатан	1,054	13,9	11,8	6,3	0,706	3,36

Джерело: створено авторами за результатами власних досліджень.

Ароматичні речовини у яблучних дистилятах. Аналіз концентрацій летких компонентів показав суттєві відмінності між сортами яблук і використаними штамами дріжджів:

ізоаміловий спирт у найбільших кількостях утворювався у дистилятах сортів Джонатан та Айдаред, де його вміст перевищував 500 мг/100 см³ (особливо при використанні диких дріжджів). Найнижчі показники зафіксовано в сорту Монтуанське (135—205 мг/100 см³);

1-гексанол, що відповідає за трав'яністі тони, мав мінімальні концентрації у Монтуанського, а максимальні — у Джонатана;

2-фенілетанол, який формує квітково-фруктовий аромат, найбільше накопичувався у дистилятах сорту Айдаред (понад 40 мг/100 см³ при використанні диких дріжджів);

вміст етилацетату коливався у межах 114—210 мг/100 см³. Найвищі значення зафіксовано у Айдареда з дикими дріжджами, що може посилювати фруктовий аромат, але в надлишку погіршує сенсорні характеристики (Мамай, 2025).

Загалом, результати підтверджують, що найбільш перспективними сортами для отримання збалансованого ароматичного профілю є Джонатан, Айдаред і Бойкен, тоді як Монтуанське демонструє м'якіший аромат із нижчим вмістом фузельних спиртів і підвищеною часткою фенольних сполук (табл. 3 та 4).

Таблиця 3. Концентрації вищих спиртів у яблучних дистилятах с. Шура Копіївська за 3 роки дослідження

Сорт яблук	Штам дріжджів	Ізоаміловий спирт	Ізобутиловий спирт	1-гексанол	1-бутанол	1-пропанол
Кальвіль сніговий	Сидрова 101	230,37—453,72	44,23—75,87	16,80±3,10	28,6±5	56,87—105,2
	Яблучна 7	139,42—234,54	18,78—31,85	10±0,02	8,7±0,02	28,9—98,02
	Дикі	172,59—285,84	19,22—32,73	11±0,5	19,6±0,02	31,4—101,22
Айдаред	Сидрова 101	273,1—455,87	44,76—70,53	20,49±0,5	27,74±0,5	59,34—111,3
	Яблучна 7	212,31—343,43	23,78—39,53	17,19±0,5	23,25 ± 0,5	23,8—82,65
	Дикі	262,36—528,85	49,51—94,34	23,19±0,57	51,97 ± 0,5	31,5—116,52
Джонатан	Сидрова 101	491,36—502,04	95,39—98,45	30,46	57,98	60,02—120,7
	Яблучна 7	291,8—522,10	47,14—83,89	23,09	29,22	35,02—109,6
	Дикі	387,97—537,21	91,04—98,14	16,43	26,41	29,56—68,6
Бойкен	Сидрова 101	375,53—503,75	93,64—94,93	11	6,38	55,56—99,22
	Яблучна 7	298,27—412,42	48,54—60,12	10,78	3,35	35,69—108,4

Продовження таблиці 3

	Дикі	260,93—269,87	77,22—98,98	6,12	4,98	25,5—109,6
Монтуанське	Сидрова 101	207,62—305,56	22,06—40,25	10,98±0,5	5,55	77,2—135,0
	Яблучна 7	238,51—395,60	27,85—45,52	14,35±0,5	10,51	34,25—98,02
	Дикі	135,04—204,55	32,99—55,97	5,95±3	3,74	24,0—98,25

Джерело: створено авторами за результатами власних досліджень.

Таблиця 4. Концентрації ароматичних і допоміжних сполук у яблучних дистилятах с. Шура Копіївська за 3 роки дослідження

Сорт яблук	Штам дріжджів	2-фенілетанол	Ацетальдегід	Етилацетат
Кальвіль сніговий	Сидрова 101	21,48—31,58	14,64—28,6	131,8—133,48
	Яблучна 7	29,59—30,45	20,98	131,72—133,54
	Дикі	18,73—32,98	31,31—43,28	129,35—133,9
Айдаред	Сидрова 101	14,97—24,37	55,53—75,22	138,2—154,05
	Яблучна 7	21,66—22,61	39,97—53,29	118,34—122,38
	Дикі	20,41—41,94	39,92—71,46	172,07—210,3
Джонатан	Сидрова 101	19,55—24,54	7,48	133,58—152,25
	Яблучна 7	15,07—17,54	35,79	114,06—133,5
	Дикі	4,21—8,32	91,45—125,8	131,48—163,5
Бойкен	Сидрова 101	32,51—33,16	111,07—112,65	116,42—117,37
	Яблучна 7	16,56—34,89	7,86—42,99	119,37—132,82
	Дикі	26,23—29,92	78,43—78,58	118,87—138,16
Монтуанське	Сидрова 101	26,19—26,79	74,80—99,93	119,31—122,40
	Яблучна 7	10,65—15,56	11,13—15,19	114,19—122,11
	Дикі	27,06—31,66	34,39—49,29	198,60—205,19

Джерело: створено авторами за результатами власних досліджень.

Практичне обґрунтування використання сировини. Поєднання високої якості плодів розвиненої інфраструктури садівничих господарств регіону створює передумови для стабільного забезпечення переробних підприємств яблучною сировиною (Rosend, Kalede, & Nisamedtinov, 2020). Використання локальних сортів дозволяє не лише зменшити витрати на транспортування, але й сприяє формуванню унікального сенсорного профілю дистилятів, що може слугувати основою для розвитку регіонального бренду (Orcheski, Hedderley, & Volz, 2023).

Вміст ароматичних речовин. Вищі спирти є основними ароматичними сполуками дистилятів. Оптимальний рівень надає фруктових ноток, тоді як надлишок зумовлює різкий запах і смак (Fejzullahu, Kun-Farkas, & Kun, 2024; Tešević et al., 2009). Серед досліджуваних переважав ізоаміловий спирт. У зразках із сировини Вінницької області найвищий вміст зафіксовано у сорту Джонатан (537,21 мг/100см³) та Айдаред (528,85 мг/100см³) при використанні автохтонних диких дріжджів, а також у сорту Бойкен (>500 мг/100см³). Найнижчі значення характерні для Монтуанського (135—204,55 мг/100см³) та Кальвілю снігового (139,42—234 мг/100см³).

Серед інших спиртів виділявся 1-пропанол: найбільший вміст визначено у сорту Монтуанське, штам «Сидрова 101» (77,2—135,0 мг/100см³), найменший — у сорту Айдаред, штам «Яблучна 7» (23,8—82,65 мг/100см³). Вміст інших спиртів був нижчим; найбільше 1-гексанолу зафіксовано у Джонатана (30,46 мг/100см³), а 2-фенілетанолу — у Айдареда з дикими дріжджами (41,94 мг/100 см³) (Fejzullahu et al., 2024).

Найпоширенішим ефіром був етилацетат, який формує фруктовো-квітковий аромат у низьких концентраціях. У зразках Вінницької області його вміст коливався від 114,06 мг/100 см³ (Джонатан, Яблучна 7) до 210,3 мг/100 см³ (Айдаред, дикі дріжджі).

Кореляційний аналіз компонентів ґрунту з ароматичними речовинами. Кореляційний аналіз сорту Айдаред підтвердив ключову роль азотного живлення у формуванні ароматичного профілю. При використанні штаму «Сидрова 101» встановлено сильний зв'язок між легкозасвоюваним азотом і сумарним вмістом вищих спиртів ($r \approx 0,67$), а також між гумусом і спиртами ($r \approx 0,57$).

Штам «Яблучна 7» показав дуже сильну кореляцію з азотом ($r \approx 0,81$) і гумусом ($r \approx 0,77$), тоді як автохтонні дикі дріжджі — із вмістом фосфору ($r \approx 0,73$) та калію ($r \approx 0,82$). Це підтверджує, що мінеральне живлення садів прямо впливає на якість дистилятів (Zeng et al., 2024).

Органолептична оцінка. Дегустаційна оцінка підтвердила відповідність між хімічним профілем та сенсорними властивостями дистилятів. Айдаред і Кальвіль сніговий отримали найвищі бали (86—91), відзначаючись збалансованими фруктово-квітковими нотами та м'яким після смаком (Spaho, Urošević, & Žulj, 2025).

Джонатан і Бойкен мали інтенсивний аромат (80—84 балів) з бананово-тропічними відтінками, що відповідає високому вмісту ізоамілового спирту, але в окремих випадках відчувалася «сивушна» гострота (Fejzullahu, Kiss, & Kun, 2021).

Монтуанське вирізнялося ніжним, квітковим профілем (78—82 бали) завдяки високому вмісту 2-фенілетанолу та низькому рівню ізоамілового спирту. Зразки з дикими дріжджами мали найбільш «теруарний» характер, але з підвищеною варіабельністю (Satora, Kostrz, & Tarko, 2017).

Узагальнено, найстабільніший баланс аромату і смаку забезпечували поєднання сортів Айдаред і Кальвіль сніговий зі штамом «Сидрова 101».

Висновки

Проведене трирічне дослідження показало, що якість яблучних дистилятів визначається поєднанням агрохімічних характеристик ґрунтів, сортових особливостей плодів і вибору дріжджових штамів. Підвищений вміст азоту в ґрунті прямо корелює з накопиченням вищих спиртів, що впливає на ароматичний профіль.

Штам «Сидрова 101» забезпечив гармонійний баланс вищих спиртів та естерів, тоді як «Яблучна 7» і автохтонні дикі дріжджі формували більш варіативні профілі з підвищеним вмістом ізоамілового спирту.

Сорти Айдаред, Джонатан і Бойкен відзначилися високим вмістом вищих спиртів і вираженням фруктовим ароматом, тоді як Монтуанське та Кальвіль сніговий формували м'якіший профіль.

Отримані результати створюють основу для розвитку регіонального бренду яблучних дистилятів Вінницької області та їх просування на міжнародний ринок.

Література

Bezhenar, I. (2025). Ринок вина України у 2024 р. *Commodity science. Technologies. Engineering*, 53(1), 54—91. [https://doi.org/10.31617/2.2025\(53\)04](https://doi.org/10.31617/2.2025(53)04).

Мамай, О. І., Кузьміна, Т. О., Яковенко, Т. О., Валько, М. І., & Березовський, Ю. В. (2025). Удосконалення технології міцних напоїв з плодових дистилятів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 15(1), 319—330. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-40>.

Манолі, Т., Афанасьєва, Т., Василик, О., Барішева, Я., & Каплан, Г. (2025). Створення сенсорного профілю українських сидрів. *Здоров'я людини і нації*, 3(1), 7—20. <https://doi.org/10.31548/humanhealth.1.2025.7>.

Садовський, І. С. (2024). Особливості удобрення насаджень яблуні за різних систем утримання ґрунту. *Перлини степового краю: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції*. Миколаїв: МНАУ. <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/21253/1/psk-2024-31-33.pdf>.

Токар, А. Ю., Матенчук, Л. Ю., Харченко, З. М., Миронюк, С. С., Петриченко, Є., & Войцехівський, В. І. (2019). Оптимізація процесу бродиння сусел з яблук сорту спартан для солодких вин. <https://doi.org/10.31395/2415-8240-2019-95-1-44-55>.

Balcerek, M., Pielech-Przybylska, K., Dziekońska-Kubczak, U., & Bartosik, A. (2023). Effect of Apple Cultivar and Selected Technological Treatments on the Quality of Apple Distillate. *Foods*, 12(24), 4494. <https://doi.org/10.3390/foods12244494>.

Fejzullahu, F., Kiss, Z., Kun-Farkas, G., & Kun, S. (2021). Influence of non-Saccharomyces strains on chemical characteristics and sensory quality of fruit spirit. *Foods*, 10(6), 1336. <https://doi.org/10.3390/foods10061336>.

Fejzullahu, F., Kun-Farkas, G., & Kun, S. (2024). Enhancing fruit spirit quality: Novel approaches to mash acidification techniques. *Acta Alimentaria*, 53(3), 360—372. <https://doi.org/10.1556/066.2024.00039>.

Guiné, R. P., Barroca, M. J., Coldea, T. E., Bartkiene, E., & Anjos, O. (2021). Apple fermented products: An overview of technology, properties and health effects. *Processes*, 9(2), 223. <https://doi.org/10.1021/jf020372m>.

Guiné, R. P., Barroca, M. J., Coldea, T. E., Bartkiene, E., & Anjos, O. (2021). Apple fermented products: An overview of technology, properties and health effects. *Processes*, 9(2), 223. <https://doi.org/10.3390/pr9020223>.

Januszek, M., Satora, P., Wajda, Ł., & Tarko, T. (2020). Saccharomyces bayanus enhances volatile profile of apple brandies. *Molecules*, 25(14), 3127. <https://doi.org/10.3390/molecules25143127>.

Jordão, A. M., Vilela, A., & Cosme, F. (2015). From sugar of grape to alcohol of wine: Sensorial impact of alcohol in wine. *Beverages*, 1(4), 292—310. <https://doi.org/10.3390/beverages1040292>.

Orcheski, B., Hedderley, D., Hunt, M., Rowan, D., & Volz, R. (2023). Profiling apple volatile organic compounds in a New Zealand collection of germplasm as a resource for breeding cultivars with desirable flavors. *Euphytica*, 219(11), 116. <https://doi.org/10.1007/s10681-023-03239-5>.

Pham, T. M., Varjú, R., Bujna, E., Hoschke, Á., Farkas, C., Nguyen, T. B., ..., & Kókai, Z. (2022). Chemical and volatile composition of Pálinka produced using different commercial yeast strains of *Saccharomyces cerevisiae*. *International Journal of Food Microbiology*, 381, 109891. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109891>.

Rosend, J., Kaleda, A., Kuldjärv, R., Arju, G., & Nisamedtinov, I. (2020). The effect of apple juice concentration on cider fermentation and properties of the final product. *Foods*, 9(10), 1401. <https://doi.org/10.3390/foods9101401>.

Satora, P., Kostrz, M., Sroka, P., & Tarko, T. (2017). Chemical profile of spirits obtained by spontaneous fermentation of different varieties of plum fruits. *European Food Research and Technology*, 243(3), 489—499. <https://doi.org/10.1007/s00217-016-2763-0>.

- Shevchuk, L., Grynyk, I., Levchuk, L., Babenko, S., Podpriatov, H., & Kondratenko, P. (2021). Fruit quality indicators of apple (*Malus domestica* Borkh.) cultivars bred in Ukraine. *Journal of Horticultural Research*, 29(2), 95—106. <https://doi.org/10.2478/johr-2021-0019>.
- Schön, A., Switulla, J., Luksch, L., Pesl, J., Kölling, R., & Einfalt, D. (2024). Impact of Nitrogen Supplementation and Reduced Particle Size on Alcoholic Fermentation and Aroma in Nitrogen-Poor Apple and Pear Mash. *Beverages*, 10(4), 93. <https://doi.org/10.3390/beverages10040093>.
- Śliwińska, M., Wiśniewska, P., Dymerski, T., Wardencki, W., & Namieśnik, J. (2015). The flavour of fruit spirits and fruit liqueurs: A review. *Flavour and Fragrance Journal*, 30(3), 197—207. <https://doi.org/10.1002/ffj.3237>.
- Spaho, N., Gaši, F., Leitner, E., Blesić, M., Akagić, A., Žuljević, S. O., ..., & Meland, M. (2021). Characterization of volatile compounds and flavor in spirits of old apple and pear cultivars from the Balkan region. *Foods*, 10(6), 1258. <https://doi.org/10.3390/foods10061258>.
- Spaho, N., Urošević, I., Urošević, T., & Žulj, M. M. (2025). Application of distillation in alcoholic beverage production. In *Mass Transfer Operations in the Food Industry* (pp. 237—282). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819536-9.00007-2>.
- Tešević, V., Nikićević, N., Milosavljević, S., Bajić, D., Vajs, V., Vučković, I., Vujisić, L., Đorđević, I., Stanković, M., Veličković, M. (2009). Characterization of volatile compounds of “Drenja”, an alcoholic beverage obtained from the fruits of Cornelian cherry. *J. Serb. Chem. Soc.*, 74, 117—128. <https://doi.org/10.2298/JSC0902117T>.
- Zeng, C., Mu, Y., Yuan, J., Zhang, H., Song, J., & Kang, S. (2024). Effects of *Torulaspora delbrueckii* and *Saccharomyces cerevisiae* co-fermentation on the physicochemical and flavor compounds of huaniu apple cider. *Molecules*, 29(8), 1750. <https://doi.org/10.3390/molecules29081750>.
- Zeng, C., Mu, Y., Yuan, J., Zhang, H., Song, J., & Kang, S. (2025). Apple cultivar-influenced differences in cider: A comprehensive analysis of physicochemical and aroma compounds. *Microchemical Journal*, 208, 112382. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.112382>.

УДК 664.66.016

EVALUATION OF BREAD STRUCTURE: A REVIEW OF PRINCIPAL METHODS AND THEIR APPLICATIONS

V. Makhynko, <https://orcid.org/0000-0003-2039-5137>

A. Hryshchenko, <https://orcid.org/0000-0002-0617-6918>

L. Makhynko, <https://orcid.org/0000-0003-4021-8947>

A. Kostiuk, <https://orcid.org/0009-0001-5421-4712>

National University of Food Technologies

Key words:

Bakery

Crumb structure

Evaluation methods

Image analysis

Non-invasive techniques

Texture analysis

Article history:

Received 07.11.2025

Received in revised form

20.11.2025

Accepted 09.12.2025

Corresponding author:

L. Makhynko

E-mail:

makhynkolv@gmail.com

Citation: Махінько В. М., Грищенко А. М., Махінько Л. В., Костюк А. І. (2025). Оцінювання структури хліба: огляд основних методик та їх застосування. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 307—325. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-23

ABSTRACT

The crumb structure is one of the fundamental indicators of bread quality, directly influencing its sensory and consumer attributes. At the same time, it reflects the completeness of the technological process, as it is formed through a complex of physicochemical transformations occurring in the dough during mixing, fermentation, baking, and subsequent cooling. Therefore, scientifically grounded assessment of crumb structure is a key objective of contemporary bakery research. A review of scientific publications has made it possible to identify the main directions in the development of methods for analyzing bread structure, to trace the shift from descriptive to quantitative-analytical approaches, and to outline perspectives for their further improvement. Classical methods, including microscopy, structural-mechanical testing, and optical examination of crumb cross-sections, provide basic information on macro- and microporosity but remain limited by the subjectivity of evaluation. Digital techniques based on computer image processing enable quantitative characterization of pore geometry using threshold segmentation algorithms, histograms, and fractal analysis. Non-invasive technologies — such as X-ray microtomography, magnetic resonance imaging, and ultrasonic testing — allow three-dimensional reconstruction of the internal structure without sample destruction, which significantly increases measurement accuracy and facilitates implementation in production lines. A current trend involves integrating morphological, mechanical, and rheological characteristics within unified analytical models capable of predicting and influencing the sensory-textural and consumer properties of bread. The systematization of existing approaches provides a theoretical basis for developing standardized procedures for bread structure assessment, improving technological control, and advancing analytical methodology in food science.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-23

ОЦІНЮВАННЯ СТРУКТУРИ ХЛІБА: ОГЛЯД ОСНОВНИХ МЕТОДИК ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

В. М. Махинько, <https://orcid.org/0000-0003-2039-5137>

А. М. Грищенко, <https://orcid.org/0000-0002-0617-6918>

Л. В. Махинько, <https://orcid.org/0000-0003-4021-8947>

А. І. Костюк, <https://orcid.org/0009-0001-5421-4712>

Національний університет харчових технологій

Структура м'якушки є одним із базових показників якості хлібних виробів, що безпосередньо впливає на споживчі властивості. Водночас структура відображає повноту завершеності технологічного процесу, адже формується в результаті комплексу фізико-хімічних процесів, які відбуваються в тісті під час його замішування і бродіння, а також випікання й охолодження виробів, тому науково обґрунтоване оцінювання структури м'якушки є одним із ключових завдань сучасних досліджень у галузі хлібопечення. Узагальнення фахових публікацій дало змогу встановити основні напрями розвитку методик аналізу структури хліба, простежити тенденції переходу від описових до кількісно-аналітичних підходів і окреслити перспективи їх подальшого вдосконалення. Класичні методи, до яких належать мікроскопіювання, структурно-механічні випробування й оптичні дослідження зрізів м'якушки, забезпечують базову інформацію про макро- та мікропористість, проте характеризуються значною суб'єктивністю оцінок. Цифрові методи передбачають комп'ютерне опрацювання зображень і дають змогу кількісно описати геометричні параметри пористого середовища за допомогою алгоритмів порогового розділення, гістограм і фрактального аналізу. Неінвазивні технології, зокрема рентгенівська мікротомографія, магнітно-резонансна візуалізація та ультразвукові методи забезпечують відтворення тривимірної структури без руйнування зразка, що істотно підвищує точність досліджень і полегшує їх впровадження в потокові лінії. Сучасна тенденція полягає в поєднанні морфологічних, механічних і реологічних характеристик у межах інтегрованих моделей, які дають змогу прогнозувати і регулювати сенсорно-текстурні й споживчі властивості хліба. Систематизація існуючих підходів створює теоретичне підґрунтя для розроблення уніфікованих стандартів оцінювання структури хлібних виробів, сприяє вдосконаленню технологічного контролю й розвитку аналітичного інструментарію в харчовій науці.

Ключові слова: хлібопечення, структура м'якушки, методи оцінювання, аналіз зображень, неінвазивні методи, аналіз текстури.

Постановка проблеми. Структура м'якушки хлібних виробів є однією з ключових характеристик, що визначає їх якість, обумовлює текстурні властивості й загальну органолептичну прийнятність. У межах технології хлібопечення поняття «структура» охоплює цілий комплекс просторових параметрів — розмір, форму, розподіл пор, товщину їхніх стінок, співвідношення твердої та повітряної фаз. Ці характеристики відображають ефективність перебігу фізико-хімічних процесів під час замішування й дозрівання тіста, вистоювання тістових заготовок, випікання й

охладження готового виробу, тому структуру м'якушки розглядають як ефективний індикатор оптимально підбраної рецептурної композиції та вдалої організації технологічного процесу (Scanlon, & Zghal, 2001), що, у свою чергу, зумовлює необхідність використання багаторівневих підходів до її оцінювання.

Вивчення морфології м'якушки в історичній ретроспективі пройшло еволюцію від суб'єктивного візуального оцінювання до об'єктивних інструментальних методів. Уже першими спостереженнями було встановлено, що пориста м'якушка хлібних виробів має характерну поліструктурну організацію, зумовлену процесом газоутворення і реологічними властивостями клейковинного каркасу (газоутриманням). Подальший розвиток цифрових технологій дав змогу перейти від описової до кількісної характеристики мікро- і макроструктури, а також простежити взаємозв'язки між структурно-механічними й сенсорними параметрами готового виробу (Gao, Wang, Dong, & Zhou, 2017).

Сучасні підходи до оцінювання структури хліба поєднують морфологічні, фізико-технічні й математичні методики. Морфологічні передбачають вивчення зрізів м'якушки або їх цифрових зображень з подальшим визначенням геометричних характеристик пор. Фізико-технічні (рентгенівська мікротомографія, ультразвукове зондування, магнітно-резонансна томографія) надають можливість отримати тривимірну реконструкцію внутрішньої структури м'якушки без необхідності підготовчого руйнування зразка, що істотно підвищує достовірність одержаних даних. Математичні й цифрові методики аналізу зображень, зокрема фрактальна, мультифрактальна та гістограмна оцінки, сприяють автоматизації проведення експериментів і стандартизації процесу інтерпретації одержаних результатів (Rathnayake, Navaratne, & Navaratne, 2018).

Слід також відзначити, що значна кількість сучасних досліджень спрямована на встановлення кореляції між структурними характеристиками м'якушки і сенсорним сприйняттям хліба. Зокрема, вивчається вплив рецептурних складових, параметрів технологічного процесу, вмісту харчових волокон і білкових сполук на ступінь розвиненості пористості, еластичність м'якушки та відчуття під час розжовування готового виробу (Van Rooyen, Simsek, Oyeyinka, & Manley, 2023; Alexandre, Benavent-Gil, Velickova, & Rosell, 2021). Водночас зростає інтерес до побудови математичних моделей, що поєднують структурні властивості хліба й реологічні характеристики тіста (Pojić та ін., 2016).

Тобто оцінювання структури хліба набуває все більш комплексного характеру, поєднуючи інструментальні, цифрові та математико-статистичні підходи. Узагальнення інформації про наявні методики є необхідним для систематизації уявлень щодо оцінювання окремих складових формування структури м'якушки хлібних виробів.

Мета дослідження: проаналізувати основні методики, що застосовуються для оцінювання структури пористості, охарактеризувати принципи підходи і навести приклади застосування в сучасних системах контролю якості.

Матеріали і методи. Огляд сформовано на основі систематичного опрацювання наукових публікацій, присвячених методам оцінювання структури хлібних виробів. Пошук джерел здійснювався у міжнародних базах даних Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink і Google Scholar за ключовими словами *«bread*

porosity», «crumb structure», «image analysis», «microtomography», «crumb texture», «ultrasound evaluation», «non-destructive methods».

До огляду включено 53 наукові статті, опубліковані в період із 1995 р. по 2024 р., що дало змогу простежити еволюцію підходів — від перших спроб кількісного опису структури м'якушки до сучасних високотехнологічних методів цифрового та неінвазивного аналізу. Такий часовий діапазон забезпечив можливість виявити ключові етапи становлення кожної методики, визначити тенденції її вдосконалення й сфери актуального застосування.

Основними критеріями відбору джерел були наукова достовірність і рецензованість публікацій, безпосередня відповідність тематиці оцінювання структури, а також наявність опису методичних підходів до визначення морфологічних чи структурно-механічних характеристик м'якушки. Виключено дублетні статті та матеріали, що не містили інформації про методи вимірювання.

Опрацьовані джерела було систематизовано за типом застосованих методик: класичні (мікроскопічні, оптичні, механічні), цифрові (комп'ютерний аналіз зображень, алгоритми порогового розділення, фрактальний аналіз) і неінвазивні (рентгенівська мікротомографія, магнітно-резонансна візуалізація, ультразвукові технології). Узагальнення результатів здійснено в ході порівняльно-аналітичного опрацювання публікацій з подальшим виявленням закономірностей розвитку методів і прогнозуванням напрямів їх інтеграції в сучасні системи технологічного контролю якості хлібних виробів. Додатково розглянуто перспективи формування мультидисциплінарних платформ досліджень, що будуть поєднувати фізичні, хімічні, біотехнологічні та сенсорні підходи до аналізу структури хлібних виробів та її зв'язку зі споживчими характеристиками кінцевої продукції.

Викладення основних результатів дослідження.

1. Класичні методи вивчення структури м'якушки. Проблематика кількісного оцінювання структури хлібної м'якушки почала формуватися з середини ХХ ст., коли дослідники намагалися об'єктивувати сприйняття окремих характеристик якості хліба, що доти оцінювалися переважно органолептично. Структуру м'якушки сприймали переважно як сукупність просторових параметрів — пористості, щільності, рівномірності розподілу пор, товщини їх стінок і загальної структури порового простору. Перші спроби об'єктивного опису цих характеристик ґрунтувалися на візуальному аналізі зрізів хліба, коли дослідник вручну підраховував кількість пор у певній обмеженій площині або оцінював середній діаметр комірок за допомогою вимірювальних сіток. Такі методики широко застосовувалися у промислових лабораторіях до кінця 1970-х років, проте мали обмежену точність і значну суб'єктивність (Scanlon, & Zghal, 2001).

Важливим кроком у напрямку об'єктивізації цієї сфери досліджень стало впровадження оптичної мікроскопії для вивчення морфології м'якушки. Мікроскопічні дослідження надали змогу описати не лише розміри пор, але й характер їх внутрішньої поверхні, орієнтацію волокон, наявність мікротріщин і ступінь сполучення між комірками. У праці (Schiraldi, Piazza, Brenna, & Vittadini, 1996) мікроскопічні спостереження використовували для оцінювання впливу клейковини різної якості, а також додавання гідроколоїдів і розчинних пентозанів на формування просторового каркасу м'якушки. Автори показали, що слабка за силою клейковина утворює структуру з великими порожнинами та тонкими стінками, тоді як

сильна клейковина формує дрібнопористу, рівномірнішу структуру з підвищеною пружністю й еластичністю. Саме ці дослідження стали підґрунтям для пізнішого уявлення про кореляцію між структурними параметрами м'якушки та структурно-механічними характеристиками хліба.

Приблизно у цей же час було зроблено перші спроби кількісно описати морфологію м'якушки за допомогою цифрових технологій: використовувати оцифровані зображення зрізів із подальшою комп'ютерною обробкою. Однією з перших відомих праць у цьому напрямі є дослідження (Jeliński, Sadowska, & Fornal, 1998), у якому запропоновано метод цифрової морфометрії для визначення таких показників структури пористості, як середня площа, периметр, коефіцієнт форми та частотний розподіл пор. Такий підхід давав змогу зменшити похибку, пов'язану з людським фактором, і забезпечував повторюваність результатів. У наступних працях цієї дослідницької групи (див. наприклад, Jeliński, Sadowska, & Fornal, 2002) цифрова морфометрія розглядається вже як сформований і обґрунтований кількісний метод для потреб хлібопекарської промисловості.

Істотний внесок у стандартизацію використання морфології та оцінювання окремих показників структури м'якушки хлібних виробів зроблено у дослідженні (Whitworth, Cauvain, & Cliffe, 2005), яке стало перехідним від емпіричних до системних підходів. Автори застосували аналітичні індекси структури, серед яких: середня площа пор, частотність дрібних і великих комірок, ступінь їх поєднання й відносна однорідність порового простору. Дослідження проводилося на зразках із різними умовами дозрівання тіста й випікання хліба, що дало змогу простежити, як зміна технологічних параметрів впливає на структурну організацію м'якушки. Автори також звернули увагу на необхідність врахування товщини зрізу, умов освітлення й масштабу зображення, адже саме ці чинники визначають достовірність результатів під час цифрового опрацювання одержаних зразків.

Дослідження (Keetels, van Vliet, & Walstra, 1996) поглибили розуміння взаємозв'язку між структурою м'якушки та її механічними характеристиками. Дослідники запропонували модель «пористого губчастого тіла», у межах якої хліб розглядався як двофазна система (пористий композит) з газовими осередками, розділеними крохмально-білковою матрицею. Автори виявили, що механічна поведінка м'якушки при стисканні обумовлюється не лише кількістю пор, але й товщиною їхніх стінок і ступенем еластичності твердої фази. Таким чином, вперше було показано, що структуру хліба слід розглядати і як активну структурно-механічну, а не лише морфологічну характеристику. Подальший розвиток ця концепція отримала у праці (Liu, & Scanlon, 2003). На основі експериментальних даних зразків хліба з різною щільністю м'якушки автори побудували механічну модель пружного тіла, що демонструвала залежність модуля пружності від пористості: зі збільшенням кількості пор і зменшенням товщини стінок зразки демонстрували нижчі значення модуля Юнга. Цю роботу можна вважати базою сучасного підходу до оцінювання текстури хліба через аналіз його мікроструктури.

Не менш значущими були дослідження, у яких морфологічні оцінювання поєднувалися з вимірюванням *теплофізичних властивостей*. У праці (Schiraldi, Piazza, Brenna, & Vittadini, 1996) показано, що коефіцієнт теплопровідності м'якушки зменшується зі зростанням пористості, пояснюючи це тим, що газова фаза має нижчу

теплопровідність, ніж тверда хлібна матриця. Подібні результати отримали науковці, оцінюючи *термічну дифузійність* хліба як функцію відносної пористості (Zanoni, Peri, & Gianotti, 1995). Їхня методика, що поєднувала вимірювання температурних градієнтів з морфологічними параметрами, стала важливим кроком у напрямі поєднання фізичних і структурних ознак хліба.

Важливим напрямом розвитку методів лабораторного аналізу в хлібопеченні було встановлення *впливу технологічних параметрів* на показники структури м'якушки. У праці (Zghal, Scanlon, & Sapirstein, 2001) на прикладі хліба, виготовленого з борошна різної сили, доведено, що підвищення міцності клейковинного каркасу зменшує розмір пор, але водночас збільшує їхню кількість, формуючи рівномірнішу структуру. Дослідники також виявили, що збільшення масової частки вологи в тісті чи подовження тривалості його дозрівання сприяє утворенню більш розгалуженої мережі пор, тоді як надлишкове газоутворення призводить до поступового злиття окремих комірок у крупніші пори. Результати цих досліджень можна вважати одним з перших кількісних підтверджень того, що структурна організація м'якушки хлібних виробів є похідною в тому числі й від реологічних властивостей тіста.

Не минули своєю увагою дослідники й вивчення *впливу рецептурних факторів*, зокрема вмісту білка, жиру, цукру або інших видів сировини чи добавок, на формування структури м'якушки. Наприклад, у (Mills, Salt, Jenkins, Skeggs, & Wilde, 2005) оцінено роль водної фази у стабілізації бульбашок газу під час дозрівання тіста. Автори припустили, що поверхнево-активні білкові комплекси зумовлюють стійкість цих бульбашок і, відповідно, забезпечують майбутній розподіл пор у м'якушці. Ці результати показали важливість урахування не лише біохімічних, але й фізико-хімічних процесів, що передують формуванню структури у процесі подальшого випікання тістової заготовки. Близькою за тематикою є праця (Jakubczyk, Marzec, & Lewicki, 2008), у якій досліджено вплив активності води на структурно-механічні властивості хрустких житніх хлібців. Вимірювання міцності за методикою триточкового згину показало, що зниження водної активності супроводжувалося втратою еластичності та підвищенням крихкості структури, що підтверджено мікроскопічним аналізом.

Певним переходом від класичних методів до *комплексних морфолого-механічних* можна вважати появу досліджень, що розглядали структурні показники м'якушки у взаємозв'язку з її текстурними та сенсорними характеристиками. Дослідження (Zghal, Scanlon, & Sapirstein, 2002) підтвердило, що зміна пористості безпосередньо впливає на сприйняття м'якості й пружності хліба. Автори вказали, що оптимальна структура забезпечує баланс між пружністю та пористістю, при якому зразок сприймається як «свіжий».

Узагальнюючи розвиток класичних підходів, можна відзначити, що вони створили *методологічну основу* сучасного структурного аналізу. Саме у згаданих у цьому підрозділі працях було закладено стандарти понятійного апарату — «пористість», «однорідність», «структурна цілісність», а також розроблено базові підходи до їх кількісного оцінювання. Ці методики, хоча й потребували на початку ручного оброблення даних, підготували перехід від візуально-описових до вимірюально-аналітичних процедур, до *цифрової морфометрії*, що стала наступним

етапом досліджень хлібної мікроструктури і домінує в сучасних лабораторних методах.

2. *Цифрові методи аналізу зображень*. Подальший розвиток кількісного оцінювання структури пористості хлібних виробів пов'язаний із переходом від ручної морфометрії до цифрового аналізу зображень, який забезпечив значне підвищення точності, відтворюваності та швидкості оброблення даних. Поштовхом до цього переходу стала поява цифрових камер й програмних пакетів оброблення зображень, доступних для використання в лабораторних умовах (Jeliński, Sadowska, & Fornal, 1998; Whitworth, Cauvain, & Cliffe, 2005).

Основна ідея цифрової морфометрії полягає в перетворенні зображення зрізу м'якушки на набір числових показників, які характеризують форму, розмір, орієнтацію та просторове розташування пор. Таке перетворення передбачає *сегментацію зображення*, тобто відокремлення порожнин від твердої матриці за допомогою певного алгоритму, що й визначає точність усіх подальших вимірювань та одержаних результатів.

У перших працях з використання цифрової морфометрії (Jeliński, Sadowska & Fornal, 1998, 2002) було запропоновано базові методики оцифрування та бінаризації зображення, за яких пори м'якушки зазначалися вручну або напівавтоматично. Оцінювалися такі показники, як середня площа пор, їх кількість на одиницю площі, коефіцієнт округлості форми та ступінь неоднорідності структури. Хоча процедура й залишалася частково ручною, ці дослідження заклали основу для стандартизації цифрового аналізу та сформулювали поняття пористісного профілю зразка.

Поступово інтерес інших дослідників також змістився до цифрових методів аналізу. Дослідницька група (Magdić, Horvat, Drezner, Jurković, & Šimić, 2006) застосувала аналіз цифрових зображень зрізів хліба для вивчення впливу сили клейковини борошна на формування пористої структури, довівши, що сильніша клейковина сприяє утворенню дрібнопористої, рівномірної м'якушки.

Подальше вдосконалення техніки підготовки зображень дало змогу використовувати скановані або цифрові фотографії зрізів хліба вищої роздільної здатності. Дослідники (Whitworth, Cauvain, & Cliffe, 2005) запропонували додатково використовувати статистичне опрацювання результатів сегментації зображень, оцінюючи частоти розподілу пор за розміром. Але справжній прорив у розвитку цифрових методів оцінювання структури хлібних виробів став можливий лише завдяки активному впровадженню *автоматизованих алгоритмів сегментації зображень*. У праці (Gonzales-Barron, & Butler, 2007) застосували фрактальний аналіз для опису нерегулярності контурів пор. Фрактальна розмірність, що відображає ступінь складності меж пор, виявилася чутливим показником технологічних змін. Високі значення фрактального індексу відповідали більш пористим, «відкритим» структурам, тоді як низькі — більш компактним і рівномірним. Це стало одним із перших прикладів використання математичних дескрипторів у цій сфері лабораторних досліджень. Пізніше у дослідженні (Baravalle, Delrieux, & Gómez, 2015) науковці розвинули цю концепцію, запропонували *мультифрактальний підхід*, що давав змогу враховувати не лише середню нерегулярність, а й її варіацію по всій

площині зразка. Автори продемонстрували, що мультифрактальні показники краще корелюють із сенсорними характеристиками (м'якість, пружність), ніж традиційні морфометричні параметри.

Важливий внесок у стандартизацію процедур цифрового оброблення аналізованих зрізів зроблено дослідниками, які порівнювали різні алгоритми для оцінювання структури м'якушки хлібних виробів (Farrera-Rebollo та ін., 2011). Дослідники показали, що підсумкові результати значною мірою залежать від вибору фільтра попереднього оброблення зображення, ступеня контрастування та порогового значення бінаризації. Автори запропонували комбінований підхід, який поєднував адаптивну фільтрацію та статистичне порогоування, що забезпечувало кращу відтворюваність одержаних даних.

Окрема група досліджень присвячена питанням удосконалення процедури порогової сегментації, тобто поліпшенню механізмів розрізнення, які пікселі на одержаному зображенні належать до пор, а які — до твердої частини м'якушки. *Гістограмний аналіз* для оцінювання пористості зображення, порівнюючи розподіл інтенсивності яскравості між світлими (газовими) і темними (твердими) ділянками запропонований у (Bosakova-Ardenska, Danev, Andreeva, & Gogova, 2018). У цій та наступній праці (Bosakova-Ardenska, Danev, & Gogova, 2019) алгоритм порогового розділення (thresholding) було вдосконалено за допомогою функції «Moment-Preserving Thresholding», що дає змогу зберегти форму розподілу яскравості без спотворення дрібних деталей структури, а у дослідженні (Danev, Bosakova-Ardenska, & Apostolov, 2019) цей підхід було розширено для порівняння ефективності різних алгоритмів порогової сегментації. Згодом цей дослідницький колектив запропонував модифіковані алгоритми, такі як *HisMedian* (Bosakova-Ardenska, Danev, & Gogova, 2019) і *HisDataTJ* (Bosakova-Ardenska, Danev, & Gogova, 2022), реалізовані у форматі плагінів для програми аналізу й оброблення зображень ImageJ, які забезпечують автоматичну нормалізацію гістограми та виділення глобального порогу розрізнення на основі медіанного значення. Це дало змогу суттєво зменшити суб'єктивність при виборі порогу та підвищити точність вимірювання пористості, особливо для зразків з неоднорідною освітленістю.

Саме ці алгоритми стали основою для автоматизованого вимірювання *глобальної та локальної пористості* в дослідженнях структури м'якушки пшеничного й житнього хлібів на основі фотографій зрізів стандартної товщини (Švec, & Hrušková, 2011). У дослідженні, виконаному в Національному університеті харчових технологій (Petrusha, Daschynska, & Shulika, 2017), запропоновано модифіковану методику аналізу цифрових зображень, у якій структура хліба описується через параметри площі пор, їх кількості та дисперсії розмірів. Додатково авторами розроблено поправкові коефіцієнти, які дають змогу переходити від вимірюного значення пористості до показника, визначеного за стандартною методикою і вказаного у нормативній документації. Також цей метод може бути використаний в оцінюванні структури м'якушки дрібноштучних виробів, значення пористості для яких не стандартизовано. Розроблений авторами алгоритм дає змогу автоматизувати вимірювання й уникнути суб'єктивних помилок, характерних для ручних методів.

Паралельно з розвитком порогових методів активно розвивалися *текстурні та статистичні підходи*, що використовують показники контрасту та кореляції.

У дослідженні (Karimi, 2012) вивчався вплив технологічних параметрів (температури, тривалості випікання, масової частки вологи в тісті), а також додавання різних кількостей емульгаторів на текстурні характеристики хліба, використовуючи *grey-level co-occurrence matrices (GLCM)* — статистичний інструмент аналізу зображень, який відображає просторову кореляцію яскравостей сусідніх пікселів і дає змогу кількісно оцінити текстурні характеристики м'якушки хліба. Дослідження показали, що коефіцієнти текстурної однорідності можуть бути непрямими маркерами технологічних змін. Подібні ідеї висловлювали й у (Romano, Cavella, & Masi, 2010) на основі вивчення впливу ліпідних добавок на структуру м'якушки. Дослідники встановили, що зміна кількості ліпідів впливає на текстурний контраст і середній розмір пор, що можна кількісно оцінити за допомогою параметрів дисперсії яскравості. Таким чином, цифровий аналіз став не лише методикою оцінювання морфології, але й інструментом контролю рецептурних чи технологічних змін у виробничому процесі.

Більшість сучасних досліджень демонструють прагнення до *комбінування різних алгоритмів* для підвищення точності оцінювання структури досліджуваних зразків. У (Shibata та ін., 2013) було порівняно результати аналізу цифрових зображень з даними структурно-механічних випробувань. Автори довели, що середній діаметр пор і коефіцієнт неоднорідності корелюють із показниками жорсткості та пружності м'якушки. Тобто цифрові параметри структури з великою ймовірністю можуть бути використані для прогнозування фізико-механічних властивостей готових виробів. Дослідження (Dewaest та ін., 2017) підтвердило ідею, показавши, що результати, отримані методом автоматизованого аналізу зображень, пояснюють до 80% варіацій суб'єктивної оцінки виробів. Це підтверджує високу аналітичну інформативність цифрових параметрів і можливість їх застосування в сенсорному прогнозуванні.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що цифрові методи аналізу зображень пройшли декілька етапів розвитку: від *ручної морфометрії* з елементами бінаризації на початку до активного використання *автоматичної сегментації* із застосуванням алгоритмів порогування та гістограмного аналізу, фрактального й мультифрактального підходів і завершилися закономірною *інтеграцією цифрових і структурно-механічних даних*, за якої характеристики одержаного зображення використовуються для прогнозування фізичних властивостей. Розвиток цього напрямку став ключовим в еволюції методик вивчення структури хлібних виробів, зумовивши перехід від суб'єктивних візуальних оцінок і простого підрахунку пор до багатовимірного опису м'якушки як складної ієрархічної системи. Створені алгоритми заклали підґрунтя для поступового переходу до кількісної, стандартизованої та репрезентативної характеристики мікроструктури, повної автоматизації аналізу морфології хліба, а їх використання дало змогу обробляти зображення з великої кількості зразків, отримуючи статистично достовірні дані. Подальший розвиток цих методик став основою для сучасних неруйнівних технологій візуалізації структури пористості, зокрема мікротомографії та магнітно-резонансної томографії, що виходять за межі двовимірних зображень і дають змогу відтворювати тривимірну морфологію м'якушки.

3. *Методи неінвазивного аналізу структури.* Розвиток цифрових технологій у поєднанні з приладовими методами вимірювання відкрив можливість дослідження внутрішньої структури хліба *без руйнування зразка*. Такі методики, що належать до групи неінвазивних, ґрунтуються на принципах використання особливостей поширення випромінювання, хвиль чи магнітного поля крізь матеріал і дають змогу будувати просторові реконструкції мікроструктури. Їх застосування радикально розширило уявлення про морфологію м'якушки, дозволивши перейти від двовимірного до тривимірного аналізу.

Перші експерименти з використанням рентгенівського випромінювання для вивчення хлібної структури з'явилися наприкінці 1990-х років, однак метод набув широкого застосування лише після вдосконалення технології *мікрокомп'ютерної томографії (μСТ)*. Цей метод дає змогу відтворити тривимірну модель м'якушки з просторовою роздільною здатністю до декількох мікрометрів, що особливо важливо для аналізу дрібнопористих зразків. Однією з перших праць, де мікротомографію використано для дослідження структури м'якушки хліба, стала (Falcone та ін., 2004). Використовуючи фазово-контрастну рентгенівську мікротомографію, автори показали, що можливо не лише візуалізувати, а й кількісно описати параметри пор — середній об'єм, ступінь злиття та співвідношення між відкритими й закритими порами. Це дослідження було одним із перших, де 3D-модель хліба розглядалася як *твердопінна структура*, а не сукупність двовимірних зрізів.

Пізніше дослідники підтвердили ефективність μСТ для порівняння структури різних типів хліба (Lape, Jensen, Jeor, & Lendon, 2008). Одержані результати свідчать, що навіть незначні зміни в рецептурі (наприклад, часткова заміна борошна) або відмінності в масовій частці вологи істотно впливають на форму та з'єднання комірок. Ці дослідження започаткували систематичне використання мікротомографії в харчових технологіях як певного *стандарту тривимірного морфологічного оцінювання пористих тіл*.

Подальший розвиток цього напрямку здійснений у дослідженні (Cafarelli, Spada, Laverse, Lampignano, & Del Nobile, 2014), присвяченому використанню μСТ для оцінювання пористої структури пшеничного хліба. Автори запропонували методику калібрування зображення за допомогою еталонних зразків щільності, що дало змогу визначати точну частку газової фази. Дослідники ще раз підтвердили емпірично відомий факт про визначальну роль етапу дозрівання тіста у формуванні макроструктури м'якушки, показавши, що підвищення кількості дріжджів у рецептурі та інтенсифікація процесу бродіння призводять до збільшення об'єму комірок, але зменшують їхню кількість, що свідчить про тенденцію до злиття пор у процесі дозрівання, вистоювання і на першій стадії випікання.

Важлива модифікація методу μСТ запропонована в дослідженні (Jensen та ін., 2014). Автори розробили автоматизовану систему *порогового аналізу мікротомографічних зображень* за допомогою спеціального алгоритму, який дає змогу відокремлювати пори від твердої фази з високою точністю навіть у неоднорідно контрастних ділянках. Дослідження проводилося на тісті з різною масовою часткою вологи. Результати показали, що з підвищенням вмісту водної фази зростає загальна пористість, але зменшується середній діаметр комірок. Це дослідження стало одним із перших прикладів подання мікротомографічного аналізу з алгоритмами цифрового оброблення даних.

Інша дослідницька група показала (Mathieu та ін., 2016), що швидкість гідратації м'якушки залежить від розподілу пор і зв'язності каналів у поровому просторі, а також вказали на важливість врахування капілярної дії в механізмах гідратації. Схожі закономірності одержані у праці (Lomolino, Morari, Dal Ferro, Vincenzi, & Pasini, 2017), присвяченій використанню рентгенівської мікротомографії для тривимірного аналізування структури хліба з полби й пшениці. Автори довели, що відмінності в геометрії комірок зумовлюють варіативність пружності та сенсорних характеристик, що відкриває можливості для використання мікротомографії у промисловому контролі якості.

Іншим важливим неінвазивним підходом для оцінювання внутрішньої структури м'якушки стало використання *ультразвуку*. Принцип методу полягає у вимірюванні швидкості поширення й амплітуди відбитого сигналу, які залежать від щільності матеріалу та наявності у його структурі пор. Дослідження (Elmehdi, Page, & Scanlon, 2003) показало, що швидкість ультразвукової хвилі в м'якушці зменшується зі збільшенням пористості, оскільки повітряна фаза має значно меншу акустичну імпедансність порівняно з твердою частиною. Використання ультразвукових імпульсів дало змогу не лише оцінити загальну пористість, а й виявити локальні неоднорідності, що відображають відмінності у розподілі пор по об'єму зразка. Автори підкреслили потенціал цього методу для *контролю якості хліба у виробничих умовах*, оскільки вимірювання можна здійснювати без розрізання зразка. Подальші дослідження (Petrauskas, 2010) продемонстрували можливість оцінювати не лише загальну пористість, а й геометричну конфігурацію внутрішньої структури на основі параметрів відбитого сигналу. Автор запропонував методику калібрування для встановлення показника пористості за амплітудно-частотними характеристиками ультразвуку. Це дає змогу проводити *неінвазивне експрес-оцінювання* структури хліба протягом усього терміну зберігання.

Третім важливим сучасним напрямом вивчення структури пористих тіл (у тому числі хлібних виробів) є метод *магнітно-резонансної томографії (МРТ)*, за допомогою якого можна оцінювати не лише геометричні, але й вологісні характеристики зразка, а також вивчати динаміку внутрішніх процесів формування структури під час дозрівання тіста і його випікання. Наприклад, у (Takano, Ishida, Koizumi, & Kano, 2002) продемонстровано можливість спостереження за процесом газоутворення в тісті в режимі реального часу. За допомогою швидкісної МР-візуалізації дослідники відтворили динаміку збільшення пор у процесі дозрівання тіста й показали, що розподіл газових комірок є нерівномірним уже на ранніх стадіях збільшення тіста в об'ємі. Додатково, після випікання хліба, за допомогою МРТ було візуалізовано *розподіл залишкової вологи в м'якушці*, що дало змогу описати зв'язок між цим розподілом і текстурними властивостями готового виробу.

Подальше вдосконалення методики МРТ, описане в (Роїс та ін., 2016), сприяло поєднанню отриманих даних щодо структури пористості з реологічними та механічними характеристиками досліджуваного продукту. Автори вивчали вплив внесення емульгованих крохмалів на процес газоутворення під час випікання й побудували *модель локальної деформації* та розподілу пористості у хлібі. Їхні результати переконливо свідчать, що МРТ може використовуватися як перспективний інструмент не лише морфологічного аналізу, але й вивчення динамічних процесів формування структури.

Неінвазивні методи тісно пов'язані з *комп'ютерним моделюванням*, яке використовується для пояснення одержаних експериментальних даних. Так, у (Nicolas та ін., 2016) авторами було запропоновано математичну модель, яка дає змогу описувати процес деформації й еволюцію локальної пористості під час випікання. Вона ґрунтується на даних μ СТ і демонструє взаємозв'язок між розширенням газових осередків і в'язко-пружними властивостями тіста/хліба. Завдяки цьому підходу вдалося кількісно оцінити вплив температурного градієнта на розвиток пористості.

Наведені дослідження стали ще одним підтвердженням того, що такі комбіновані підходи поступово переходять від простого одномоментного встановлення структури до можливості *моделювання процесів формування пористої структури* в реальному часі. Водночас слід враховувати, що кожен із розглянутих методів має як свої переваги, так і обмеження. Рентгенівська мікротомографія забезпечує найвищу просторову роздільну здатність і точність визначення геометричних параметрів, однак потребує високовартісного обладнання й тривалої підготовки зразків. Ультразвук є менш точним, проте придатним для експрес-контролю на виробництві. Магнітно-резонансна томографія надає додаткову інформацію про вологісний стан м'якушки, що важливо для прогнозування процесу збереження свіжості. Комп'ютерне моделювання, у свою чергу, інтегрує результати різних фізичних методів і дає змогу прогнозувати поведінку тіста під час дозрівання і випікання. Сукупність цих підходів формує *комплексну систему тривимірного аналізу*, де мікротомографія забезпечує геометричну точність, ультразвук — швидкість, а МРТ — інформацію про розподіл вологи і фазові переходи. Тому ці методи стали основою для створення сучасних систем вивчення структури, які можуть використовуватися як у дослідницьких, так і у виробничих цілях.

4. *Комплексні аналітичні підходи та інтерпретація структури.* Дослідження структури хлібних виробів не обмежується лише описом геометрії пор. Для повного розуміння властивостей м'якушки необхідно поєднувати морфологічні дані з реологічними, механічними, термодинамічними та сенсорними характеристиками. Саме так формується комплексний аналітичний підхід, що забезпечує кореляцію між мікроструктурою та функціональними показниками готового продукту.

Класичні дослідження (Zghal, Scanlon, & Sapirstein, 2001, 2002) заклали основу механістичного аналізу м'якушки як системи твердих стінок і газових комірок. Вони показали, що міцність і еластичність структури хліба зумовлені не лише вмістом рецептурних компонентів (насамперед клейковинних білків), але й морфологічними параметрами — розміром, формою та орієнтацією пор. Використання компресійних тестів у поєднанні з мікроскопією дало змогу встановити, що зі збільшенням середнього діаметра пор спостерігається зниження модуля пружності, а при зменшенні товщини стінок — підвищення крихкості структури.

Дослідження (Keetels, Visser, van Vliet, Jurgens, & Walstra, 1996) запропонувало аналітичну модель, у якій м'якушка розглядається як *пружна піна*, механічна поведінка якої визначається співвідношенням об'ємної частки газової фази до товщини твердої оболонки. Модель виявилася здатною точно передбачати експериментальні значення жорсткості та деформаційних характеристик різних видів хліба. Згодом цей підхід став теоретичною основою для більшості сучасних моделей, що описують залежність властивостей текстури від пористості.

Важливим з точки зору споживчих уподобань є сенсорне сприйняття текстури хліба як результату поєднань механічних і морфологічних характеристик. Дослідження (Gao, Wong, Lim, Henry, & Zhou, 2015) продемонструвало, що процес жування тісно пов'язаний із параметрами пористої структури: щільніші структури потребують більшої кількості жувальних рухів, тоді як повітряні й пружні зразки спричиняють швидше формування болосу. Подальше дослідження (Gao, Wang, Dong, & Zhou, 2017) систематизувало ці залежності, визначивши критичні порогові значення щільності, після яких сенсорно відчутна м'якість зразків перестає корелювати з об'ємом пор. Це стало важливим кроком до *кількісної оцінки сприйняття текстури*.

У дослідженні (Eelderink та ін., 2015) показано, що структура хліба впливає також на постпрандіальну реакцію організму: зразки з більшою пористістю та менш щільною структурою спричиняли швидше підвищення рівня глюкози в крові. Таким чином, морфологічна характеристика має не лише технологічне, а й *нутриційне значення* і може слугувати основою для розроблення оздоровчих хлібних виробів. Підтвердженням такого припущення стали результати досліджень (Alexandre, Benavent-Gil, & Rosell, 2019) з вивчення взаємозв'язку між структурою м'якушки виробу та показником його глікемічного індексу. Автори виявили, що ступінь дезінтеграції болосу під час імітації жування залежить від розмірів і з'єднаності пор: дрібнопористі зразки характеризуються більш рівномірним зволоженням і нижчими показниками швидкості вивільнення крохмалю. Це свідчить, що морфологічна організація м'якушки впливає не лише на споживчі, а й на *фізіологічні властивості* хліба.

Дослідження (Puerta та ін., 2021) розширило це розуміння в ході вивчення впливу зміни рецептурних композицій та умов випікання на текстурне сприйняття хліба. Внесення додаткових компонентів (харчових гідрокоолідів, емульгаторів), варіювання температури й тривалості випікання змінювало ступінь клейстеризації крохмалю та утворення пористої структури, що, у свою чергу, впливало на відчуття «пружності» під час розжовування зразка. Так було підтверджено, що *морфологічні показники прямо визначають сенсорні реакції споживача*, а цифровий аналіз порової структури може бути об'єктивним доповненням сенсорних тестів.

Зважаючи на відомий факт, що масова частка вологи тіста є одним із ключових чинників формування текстури м'якушки, було вивчено динаміку дозрівання тіста за допомогою 3D-технології структурованого світла (Verdú, Ivorra, Sánchez, Barat, & Grau, 2015). Застосування оптичного сканування дало змогу простежити розширення пор у реальному часі та встановити зв'язок між газоутворенням і вологоутримувальною здатністю тіста. Отримані результати підтвердили, що навіть незначні зміни вологісної фази тіста можуть спричинити суттєві відмінності в текстурі готового продукту.

Перші спроби поєднати морфологічні, механічні й теплові аспекти випікання в єдину модель втілено в (Campbell, & Martin, 2012). Автори описали процес розпушування тіста з точки зору реології та кінетики газоутворення, розглядаючи хліб як *механічно-термодинамічну систему*, де пористість, пружність і теплопровідність взаємопов'язані. Модель дала змогу передбачити вплив швидкості нагрівання та масової частки вологи на формування структури, що згодом було підтвер-

джено експериментами з мікротомографією. У дослідженні (Derossi, De Pilli, & Severini, 2013) запропоновано використовувати функцію лінійного шляху як дескриптор просторової зв'язності пор, що дало змогу точніше характеризувати ізотропію структури. Ідею комплексного опису структури пористості розвинуто в (della Valle та ін., 2014), де м'якушку хліба трактовано як твердотілу піну, у якій взаємодія фаз визначає стабільність коміркової системи.

Подальше поглиблення міждисциплінарного підходу спостерігається в дослідженнях (Wang, Austin, & Bell, 2011), де описано геометрію пор м'якушки хліба як зв'язний лабіринт (систему сполучуваних пустот), та в праці (Jourdren та ін., 2017), автори якої встановили кореляцію між відкритістю пор і динамікою вивільнення ароматичних сполук. У (Wyrwisz, Moczowska-Wyrwisz, & Kurek, 2024) за допомогою методології поверхні відгуку змодельовано вплив масової частки вологи та наявності харчових волокон на текстуру й ретроградацію крохмалю в хлібних виробах з високим умістом клітковини.

Подібний підхід реалізований у дослідженні щодо вивчення структурно-механічних характеристик хліба з емульгованими крохмалю (Pojić та ін., 2016). За допомогою MPT і механічних тестів автори встановили, що модифіковані крохмалі стабілізують пористу структуру, запобігаючи надмірному розширенню під час випікання. Це підтвердило, що мікроструктура й реологія тіста є взаємопов'язаними елементами єдиної системи, де навіть незначні зміни хімічного складу відбиваються на кінцевих механічних властивостях.

Сучасна тенденція полягає у створенні *інтегрованих платформ аналізу*, які поєднують мікроструктурні, акустичні, механічні та сенсорні дані. Завдяки цьому формується можливість побудови предиктивних моделей, здатних прогнозувати властивості хліба ще на етапі технологічного моделювання. Такі підходи особливо перспективні для розроблення нових рецептур, зокрема для безглютенових або збагачених клітковиною виробів.

Сукупність наведених досліджень засвідчує, що аналіз структури хліба давно вийшов за межі візуальної морфології. Сучасна наука трактує м'якушку як складну *біоінженерну систему*, в якій кожна мікроструктурна характеристика впливає на механічні властивості, сенсорне сприйняття споживачем і навіть фізіологічні перетворення після споживання. Тому лише комплексний аналітичний підхід здатен сформулювати наукове підґрунтя для широкого впровадження інтелектуальних технологій у майбутнє хлібопечення.

Висновки

Оцінювання структури хліба пройшло тривалий шлях — від візуальних спостережень і описових характеристик до високотехнологічних аналітичних систем, здатних точно відтворювати внутрішню морфологію м'якушки без її руйнування і навіть безконтактно. На ранніх етапах розвитку галузі структура розглядалася переважно як *сенсорна категорія*, пов'язана із зовнішнім виглядом і сприйняттям текстури. Але вже першими науковими дослідженнями було доведено, що морфологічні параметри — розмір, форма та розподіл пор, є кількісними показниками, які можна зіставляти з фізичними (структурно-механічними) властивостями кінцевого продукту.

Поява цифрових технологій зробила можливим автоматизований аналіз зображень, що став базовим методом дослідження структури м'якушки. Від простих порогових алгоритмів і гістограмних аналізів наука перейшла до використання складних фрактальних і мультифрактальних моделей. Завдяки цьому стало можливим об'єктивно оцінювати характеристики пористої структури, що має вирішальне значення для стандартизації якості хлібних виробів. Поява об'ємних методів дослідження, серед яких найважливіше місце займають рентгенівська мікротомографія і магнітно-резонансна томографія, забезпечили тривимірне відтворення внутрішньої структури без руйнування зразка, даючи змогу простежити динаміку формування пористої структури у ході дозрівання тіста і його випікання. Їхні результати суттєво розширили уявлення про механізми газоутримання, теплоперенесення й структуроутворення, що лежать в основі формування структури м'якушки. Розвиток ультразвукових методів підтвердив перспективність безконтактного оцінювання пористості насамперед для поточного контролю готових виробів у промислових умовах.

Не менш важливим кроком стала інтеграція структурного аналізу з механічними та реологічними методами, що розглядають м'якушку як пористу піну, механічна поведінка якої визначається співвідношенням газової та твердої фаз. Таке трактування дало змогу описати пружність, жорсткість і крихкість хліба через параметри його мікроструктури. Дослідження, що поєднали одержані структурні характеристики з даними сенсорного аналізу, створили основу для об'єктивного прогнозування споживчих властивостей.

Сучасний етап розвитку методик оцінювання структури хлібних виробів характеризується формуванням мультидисциплінарної платформи дослідження, де поєднуються фізичні, хімічні, біотехнологічні й сенсорні аспекти. Синергія методів цифрової морфометрії, реологічного аналізу, мікротомографії та оптичних вимірювань створює можливість не лише описувати сталу структуру, але й *моделювати її формування* в реальному часі, використовуючи математичні й комп'ютерні моделі змін просторової матриці м'якушки хліба у ході технологічного процесу, спостерігати, як у процесі випікання формується і змінюється розмір пор і товщина їхніх стінок. Це має ключове значення для оптимізації рецептур, впливу на процес дозрівання тіста й прогнозованого формування типу тіста із заданою чи регульованою текстурою.

Найперспективнішим напрямом сьогодення у цій сфері є застосування *машинного навчання та штучного інтелекту* для автоматичного розпізнавання типів пористості, прогнозування технологічних дефектів і кореляції між параметрами мікроструктури та споживчими характеристиками. На основі вже наявних баз цифрових зображень м'якушки можливе створення стандартизованих бібліотек структурних профілів, що забезпечить об'єктивну класифікацію продукції на промисловому рівні. Тож з огляду на сучасні тенденції можна прогнозувати, що майбутнє оцінювання структури хліба пов'язане з концепцією «*інтелектуального хлібопечення*», у якому аналітичні методи стануть складовою автоматизованих систем керування технологічними процесами. Використання сенсорів реального часу, комп'ютерного зору та цифрових шаблонів-профілів дасть змогу оперативно оцінювання вплив здійснених рецептурних і технологічних заходів, коригувати па-

раметри замішування, дозрівання, вистоювання й випікання відповідно до цільових характеристик м'якучки. *Оцінювання структури хлібних виробів поступово перетворюється на окрему комплексну наукову дисципліну, у якій взаємопов'язано задіяні морфологічний, структурно-механічний і цифровий аналізи. Цей напрям буде активно розвиватися, відкриваючи нові можливості для підвищення якості продукції, розроблення інноваційних рецептур і забезпечення сталості хлібопечення на всіх етапах технологічного процесу.*

Література

- Aleixandre, A., Benavent-Gil, Y., & Rosell, C. M. (2019). Effect of bread structure and *in vitro* oral processing methods in bolus disintegration and glycemic index. *Nutrients*, 11(9), 2105. <https://doi.org/10.3390/nu11092105>.
- Aleixandre, A., Benavent-Gil, Y., Velickova, E., & Rosell, C. M. (2021). Mastication of crisp bread: Role of bread texture and structure on texture perception. *Food Research International*, 147, 110477. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110477>.
- Baravalle, R. G., Delrieux, C. A., & Gómez, J. C. (2015). Multifractal characterisation and classification of bread crumb digital images. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2015(1). <https://doi.org/10.1186/s13640-015-0063-8>.
- Bosakova-Ardenska, A., Danev, A., & Gogova, Tz. (2019). White bread porosity evaluation by image processing with HisMedian algorithm. *Fundamental Sciences and Applications*, 25(1), 1—7. <https://journals.tu-plovdiv.bg/index.php/journal/article/view/11>.
- Bosakova-Ardenska, A., Danev, A., & Gogova, T. (2022). HisDataTJ: ImageJ plugin for global thresholding with application in bread porosity evaluation. In *2022 International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ciees55704.2022.9990788>.
- Bosakova-Ardenska, A., Danev, A., Andreeva, H., & Gogova, T. (2018). Bread porosity evaluation by histogram analysis. In *CompSysTech '18: 19th International Conference on Computer Systems and Technologies*. ACM. <https://doi.org/10.1145/3274005.3274020>.
- Cafarelli, B., Spada, A., Laverse, J., Lampignano, V., & Del Nobile, M. A. (2014). An insight into the bread bubble structure: An X-ray microtomography approach. *Food Research International*, 66, 180—185. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.08.036>.
- Campbell, G. M., & Martin, P. J. (2012). Bread aeration and dough rheology: An introduction. In *Breadmaking* (pp. 299—336). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857095695.2.299>.
- Danev, A., Bosakova-Ardenska, A., & Apostolov, M. (2019). Application of thresholding algorithms for brown bread porosity evaluation. *Food Science and Applied Biotechnology*, 2(2), 99. <https://doi.org/10.30721/fsab2019.v2.i2.51>.
- Della Valle, G., Chiron, H., Cicerelli, L., Kansou, K., Katina, K., Ndiaye, A., Whitworth, M., & Poutanen, K. (2014). Basic knowledge models for the processing of bread as a solid foam. *Key Engineering Materials*, 611—612, 901—908. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.901>.
- Derossi, A., de Pilli, T., & Severini, C. (2013). Use of lineal-path distribution function as statistical descriptor of the crumb structure of bread. *Food Biophysics*, 8(4), 223—232. <https://doi.org/10.1007/s11483-013-9289-0>.
- Dewaest, M., Villemejane, C., Berland, S., Neron, S., Clement, J., Verel, A., & Michon, C. (2017). Effect of crumb cellular structure characterized by image analysis on cake softness. *Journal of Texture Studies*, 49(3), 328—338. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12303>.
- Eelderink, C., Noort, M. W. J., Sozer, N., Koehorst, M., Holst, J. J., Deacon, C. F., Rehfeld, J. F., Poutanen, K., Vonk, R. J., Oudhuis, L., & Priebe, M. G. (2015). The structure of wheat bread influences the postprandial metabolic response in healthy men. *Food & Function*, 6(10), 3236—3248. <https://doi.org/10.1039/c5fo00354g>.
- Elmehdi, H. M., Page, J. H., & Scanlon, M. G. (2003). Using ultrasound to investigate the cellular structure of bread crumb. *Journal of Cereal Science*, 38(1), 33—42. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(03\)00002-X](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(03)00002-X).

- Falcone, P. M., Baiano, A., Zanini, F., Mancini, L., Tromba, G., Montanari, F., & Del Nobile, M. A. (2004). A novel approach to the study of bread porous structure: Phase-contrast X-ray microtomography. *Journal of Food Science*, 69(1), FEP38—FEP43. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb17865.x>.
- Farrera-Rebollo, R. R., Salgado-Cruz, M. de l. P., Chanona-Pérez, J., Gutiérrez-López, G. F., Alamillo-Beltrán, L., & Calderón-Domínguez, G. (2011). Evaluation of image analysis tools for characterization of sweet bread crumb structure. *Food and Bioprocess Technology*, 5(2), 474—484. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0513-y>.
- Gao, J., Wang, Y., Dong, Z., & Zhou, W. (2017). Structural and mechanical characteristics of bread and their impact on oral processing: A review. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(4), 858—872. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13671>.
- Gao, J., Wong, J. X., Lim, J. C.-S., Henry, J., & Zhou, W. (2015). Influence of bread structure on human oral processing. *Journal of Food Engineering*, 167, 147—155. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.07.022>.
- Gonzales-Barron, U., & Butler, F. (2007). Fractal texture analysis of bread crumb digital images. *European Food Research and Technology*, 226(4), 721—729. <https://doi.org/10.1007/s00217-007-0582-3>.
- Jakubczyk, E., Marzec, A., & Lewicki, P. (2008). Relationship between water activity of crisp bread and its mechanical properties and structure. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 58, 45—51.
- Jeliński, T., Sadowska, J., & Fornal, J. (1998). Evaluation of bread crumb structure by digital image analysis method. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 7, 137—142.
- Jeliński, T., Sadowska, J., & Fornal, J. (2002). Digital image analysis — essence and application in cereal science. In *Physical Methods in Agriculture* (pp. 219—240). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0085-8_13.
- Jensen, S., Samanta, S., Chakrabarti-Bell, S., Regenauer-Lieb, K., Siddique, K. H. M., & Wang, S. (2014). Automated thresholding and analysis of microCT scanned bread dough. *Journal of Microscopy*, 256(2), 100—110. <https://doi.org/10.1111/jmi.12163>.
- Jourdren, S., Masson, M., Saint-Eve, A., Panouillé, M., Blumenthal, D., Lejeune, P., Délérís, I., & Souchon, I. (2017). Effect of bread crumb and crust structure on the in vivo release of volatiles and the dynamics of aroma perception. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(16), 3330—3340. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b00287>.
- Karimi, M. (2012). Effect of different processing parameters on quality factors and image texture features of bread. *Journal of Bioprocessing & Biotechniques*, 2(5), 1—5. <https://doi.org/10.4172/2155-9821.1000127>.
- Keetels, C. J. A. M., van Vliet, T., & Walstra, P. (1996). Relationship between the sponge structure of starch bread and its mechanical properties. *Journal of Cereal Science*, 24(1), 27—31. <https://doi.org/10.1006/jcrs.1996.0034>.
- Keetels, C. J. A. M., Visser, K. A., van Vliet, T., Jurgens, A., & Walstra, P. (1996). Structure and mechanics of starch bread. *Journal of Cereal Science*, 24(1), 15—26. <https://doi.org/10.1006/jcrs.1996.0033>.
- Lape, A., Jensen, S., Jeor, V. S., & Lendon, C. (2008). Use of X-ray micro computed tomography in the evaluation of bread crumb structure. *Microscopy and Microanalysis*, 14(S2), 700—701. <https://doi.org/10.1017/s1431927608081889>.
- Liu, Z., & Scanlon, M. G. (2003). Predicting mechanical properties of bread crumb. *Food and Bioprocess Technology*, 81(3), 224—238. <https://doi.org/10.1205/096030803322437992>.
- Lomolino, G., Morari, F., dal Ferro, N., Vincenzi, S., & Pasini, G. (2017). Investigating the einkorn (*Triticum monococcum*) and common wheat (*Triticum aestivum*) bread crumb structure with X-ray microtomography: Effects on rheological and sensory properties. *International Journal of Food Science & Technology*, 52(6), 1498—1507. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13425>.
- Magdić, D., Horvat, D., Drezner, G., Jurković, Z., & Šimić, G. (2006). Image analysis of bread crumb structure in relation to gluten strength of wheat. *Agriculture*, 12, 58—62.
- Mathieu, V., Monnet, A.-F., Jourden, S., Panouillé, M., Chappard, C., & Souchon, I. (2016). Kinetics of bread crumb hydration as related to porous microstructure. *Food & Function*, 7(8), 3577—3589. <https://doi.org/10.1039/c6fo00522e>.

- Mills, E. N. C., Salt, L. J., Jenkins, J. A., Skeggs, P. K., & Wilde, P. J. (2005). Bubbles in bread — the potential role of the aqueous phase of doughs in determining crumb structure. In S. P. Cauvain (Ed.), *Using cereal science and technology for the benefit of consumers* (pp. 137—141). Cambridge, UK: Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845690632.5.137>.
- Nicolas, V., Vanin, F., Grenier, D., Lucas, T., Doursat, C., & Flick, D. (2016). Modeling bread baking with focus on overall deformation and local porosity evolution. *AIChE Journal*, 62(11), 3847—3863. <https://doi.org/10.1002/aic.15301>.
- Petrauskas, A. (2010). The application of the ultrasonic method for evaluating the porosity of bread. *Ultragarsas/Ultrasound*, 65(3), 20—27.
- Petrusha, O., Daschynska, O., & Shulika, A. (2017). Development of the measurement method of porosity of bakery products by analysis of digital image. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(3(40)), 61—66. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.129520>.
- Pojić, M., Musse, M., Rondeau, C., Hadnadev, M., Grenier, D., Mariette, F., Cambert, M., Diascom, Y., Quellec, S., Torbica, A., Hadnadev, T. D., & Lucas, T. (2016). Overall and local bread expansion, mechanical properties, and molecular structure during bread baking: Effect of emulsifying starches. *Food and Bioprocess Technology*, 9(8), 1287—1305. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1713-2>.
- Puerta, P., Garzón, R., Rosell, C. M., Fiszman, S., Laguna, L., & Tárrega, A. (2021). Modifying gluten-free bread's structure using different baking conditions: Impact on oral processing and texture perception. *LWT*, 140, 110718. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110718>.
- Rathnayake, H. A., Navaratne, S. B., & Navaratne, C. M. (2018). Porous crumb structure of leavened baked products. *International Journal of Food Science*, 2018, 1—15. <https://doi.org/10.1155/2018/8187318>.
- Romano, A., Cavella, S., & Masi, P. (2010). Studio dell'influenza delle matrici lipidiche sulla struttura del pane mediante l'analisi d'immagine [Use of image analysis to study the influence of lipids on bread structure]. *Tecnica Molitoria*, 61(12), 1289—1293. <https://hdl.handle.net/11588/374792>.
- Scanlon, M. G., & Zghal, M. C. (2001). Bread properties and crumb structure. *Food Research International*, 34(10), 841—864. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(01\)00109-0](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(01)00109-0).
- Schiraldi, A., Piazza, L., Brenna, O., & Vittadini, E. (1996). Structure and properties of bread dough and crumb. *Journal of Thermal Analysis*, 47(5), 1339—1360. <https://doi.org/10.1007/BF01992832>.
- Shibata, M., Tsuta, M., Sugiyama, J., Fujita, K., Kokawa, M., Araki, T., & Nabetani, H. (2013). Image analysis of bread crumb structure in relation to mechanical properties. *International Journal of Food Engineering*, 9(1), 115—120. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2012-0163>.
- Švec, I., & Hrušková, M. (2011). Image data of crumb structure of bread from flour of Czech spring wheat cultivars. *Czech Journal of Food Sciences*, 22(4), 133—142. <https://doi.org/10.17221/3417-CJFS>.
- Takano, H., Ishida, N., Koizumi, M., & Kano, H. (2002). Imaging of the fermentation process of bread dough and the grain structure of baked breads by magnetic resonance imaging. *Journal of Food Science*, 67(1), 244—250. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb11392.x>.
- Van Rooyen, J., Simsek, S., Oyeyinka, S. A., & Manley, M. (2023). Wheat starch structure-function relationship in breadmaking: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(3), 2292. Wheat starch structure-function relationship in breadmaking 2309. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13147>.
- Verdú, S., Ivorra, E., Sánchez, A. J., Barat, J. M., & Grau, R. (2015). Relationship between fermentation behavior, measured with a 3D vision structured light technique, and the internal structure of bread. *Journal of Food Engineering*, 146, 227—233. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.08.014>.
- Wang, S., Austin, P., & Bell, S. (2011). It's a maze: The pore structure of bread crumbs. *Journal of Cereal Science*, 54(2), 203—210. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.05.004>.
- Whitworth, M. B., Cauvain, S. P., & Cliffe, D. (2005). Measurement of bread cell structure by image analysis. In D. C. Laurie, S. P. Cauvain, & L. J. Salmon (Eds.). *Using cereal science and technology for the benefit of consumers* (pp. 193—198). Cambridge, UK: Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845690632.5.193>.
- Wyrwisz, J., Moczowska-Wyrwisz, M., & Kurek, M. A. (2024). Modeling of texture and starch retrogradation of high-in-fiber bread using response surface methodology. *Applied Sciences*, 14(24), 11603. <https://doi.org/10.3390/app142411603>.

Zanoni, B., Peri, C., & Gianotti, R. (1995). Determination of the thermal diffusivity of bread as a function of porosity. *Journal of Food Engineering*, 26(4), 497—510. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)00073-I](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)00073-I).

Zghal, M. C., Scanlon, M. G., & Sapirstein, H. D. (2001). Effects of flour strength, baking absorption, and processing conditions on the structure and mechanical properties of bread crumb. *Cereal Chemistry Journal*, 78(1), 1—7. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2001.78.1.1>.

Zghal, M. C., Scanlon, M. G., & Sapirstein, H. D. (2002). Cellular structure of bread crumb and its influence on mechanical properties. *Journal of Cereal Science*, 36(2), 167—176. <https://doi.org/10.1006/jcrs.2001.0445>.

УДК 637.5/05

INFLUENCE OF WHEAT FIBER ON THE PROPERTIES OF MEAT AND MEAT-CONTAINING BURGER PATTIES**I. Strashynskyi**, <https://orcid.org/0009-0006-6834-6990>**O. Perhat**, <https://orcid.org/0000-0003-3616-1327>*National University of Food Technologies***Key words:**

*Dietary fiber
Meat and meat-containing
systems
Minced semi-finished
products
Burger patties
Functional and
technological properties*

Article history:

Received 11.11.2025

Received in revised form
26.11.2025

Accepted 17.12.2025

Corresponding author:

I. Strashynskyi

E-mail:

sim2407@ukr.net

Citation: Страшинський І. М., Пергат О. А. (2025). Дослідження впливу пшеничної клітковини на властивості м'ясних і м'ясомістких котлет-бургерів. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 326—334.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-24

ABSTRACT

Dietary fibers are incorporated into formulations as an ingredient to improve the functional and technological properties of meat and meat-containing systems, such as water-holding and fat-holding capacity, gel-forming ability, fat-binding ability, and the ability to increase viscosity. In addition, dietary fibers naturally present in various sources such as cereals, legumes, fruits, and vegetables play an important physiological role for consumer health. They contribute to lowering cholesterol levels and blood pressure, improving blood glucose control in case of diabetes, positively influencing weight loss, as well as reducing the risk of cancer.

The aim of the study was to determine the influence of different amounts of wheat fiber on meat and meat-containing minced systems when replacing meat raw materials (beef and pork fat) in burger patties with hydrated wheat fiber. Wheat fiber Vitacel® WF 200 in amounts of 1.25%, 3.0%, 4.5%, and 6.0% was added to the minced systems after preliminary hydration in a ratio of 1:6.

The chemical composition, caloric value, and technological parameters of the burger patties after cooking were examined. The results indicated that increasing the content of wheat fiber in the formulations reduced the lipid and protein content in the samples. Conversely, the moisture content increased in proportion to the amount of added hydrated wheat fiber.

The introduction of hydrated wheat fiber Vitacel® into the experimental burger patty mixes and the reduction of meat raw material content did not significantly affect the pH value or cooking loss. The use of wheat fiber in meat minced systems reduced shrinkage during cooking of formed burger patties, which positively affected the quality of cooked meat and meat-containing minced semi-finished products.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-24

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПШЕНИЧНОЇ КЛІТКОВИНИ НА ВЛАСТИВОСТІ М'ЯСНИХ І М'ЯСОМІСТКИХ КОТЛЕТ-БУРГЕРІВ

І. М. Страшинський, <https://orcid.org/0009-0006-6834-6990>

О. А. Пергат, <https://orcid.org/0000-0003-3616-1327>

Національний університет харчових технологій

Харчові волокна включають у рецептури як інгредієнт для підвищення таких функціонально-технологічних властивостей м'ясних і м'ясомістких систем, як вологоутримувальна і жиротримувальна здатність, гелеутворююча здатність та здатність зв'язувати жир і підвищувати в'язкість. Крім того, харчові волокна, що природно присутні в різних джерелах злаків, бобових, фруктів та овочів, відіграють важливу фізіологічну роль для здоров'я споживачів. Вони сприяють зниженню рівня холестерину та артеріального тиску, покращенню контролю глюкози в крові при діабеті, позитивно впливають на втрату маси тіла, а також знижують ризик онкозахворювань.

Мета дослідження — визначення впливу різної кількості пшеничної клітковини на м'ясні і м'ясомісткі системи посічених напівфабрикатів при заміні м'ясної сировини (яловичини та сала) в котлетах-бургерах гідратованою пшеничною клітковиною. Пшеничну клітковину Вітацель® WF 200 у кількості 1,25, 3,0, 4,5 та 6,0% вносили у фарші після попередньої гідратації у співвідношенні 1:6.

Досліджено хімічний склад, калорійність і технологічні параметри котлет-бургерів після доведення до кулінарної готовності. Результати досліджень свідчать про те, що зі збільшенням вмісту в рецептурах пшеничної клітковини знижується вміст ліпідів і білка у зразках. І навпаки, вміст вологи збільшувався відповідно до кількості доданої гідратованої пшеничної клітковини.

Внесення гідратованої пшеничної клітковини Vitacel® у дослідні фарші котлет-бургерів і зниження вмісту м'ясної сировини суттєво не вплинуло на показник рН та втрату маси при термообробленні. Використання пшеничного волокна у м'ясних фаршах зменшує усадку під час доведення до кулінарної готовності сформованих котлет-бургерів, що позитивно впливає на якість доведених до кулінарної готовності м'ясних і м'ясомістких посічених напівфабрикатів.

Ключові слова: харчові волокна, м'ясні і м'ясомісткі системи, посічені напівфабрикати, котлети-бургери, функціонально-технологічні властивості.

Постановка проблеми. Важливе місце у харчуванні займає широкий асортимент м'ясних виробів, який забезпечує організм людини поживними речовинами, включаючи амінокислоти, жирні кислоти, мікроелементи та вітаміни. М'ясо та м'ясні продукти є дуже складними структурами, які мають характерну текстуру, органолептичні показники та харчову цінність.

Для того, щоб надати схожі властивості м'ясомістким продуктам і покращити структурні властивості м'ясних виробів існує необхідність використання в рецептурах цих продуктів структуроформуючих функціональних компонентів. Наприк-

лад, функція міофібрилярних м'язових білків полягає в побудові текстури та імобілізації вологи в м'ясі (Lei, & Xiong, 2020). Аналогічну роль в м'ясомістких продуктах, а також м'ясних аналогах виконують вуглеводні полімери (Schreuders et al., 2019; Гречко et al., 2019; Страшинський, & Пергат, 2024). До них відносяться інгредієнти, що належать до трьох груп: рослинні волокна, крохмаль і полісахариди та їх похідні. Ці інгредієнти відповідають за покращення текстури, зв'язування вологи в продукті та зменшення синерезису (McClements, & Grossmann, 2021; Morimoto, 2025; Mehta et al., 2015; Dekkers et al., 2018; Cui et al., 2022).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незалежно від ступеня подрібнення м'ясної сировини (гетерогенна або гомогенна структура цільном'язових виробів практично не містять харчових волокон, незважаючи на використання спецій, в яких може бути певна кількість клітковини (Delgado-Ospina et al., 2021), тому використанню харчових волокон у технології м'ясопродуктів, в тому числі м'ясомістких посічених напівфабрикатів, приділяється значна увага. Це обумовлено підвищенням функціональних властивостей та органолептичних характеристик, покращенням харчової цінності й необхідністю задоволення потреб і уподобань споживачів, що сприяє збільшенню застосування харчових волокон у рецептурах м'ясних виробів (Das et al., 2020).

Використання певного виду клітковини у м'ясопродуктах обумовлює ряд факторів, зокрема технологічних властивостей (таких як концентрація, розмір частинок, здатність утримувати вологу та здатність до набухання), фізико-хімічних властивостей (показник рН, антиоксидантна активність, прооксидантна активність, склад і тип клітковини — розчинна/нерозчинна), а також сенсорних властивостей (Delgado-Ospina et al., 2021; Han, & Bertram, 2017). Властивості нем'ясних інгредієнтів, особливо харчових волокон, формують функціональні, сенсорні, кольорні й текстурні зміни в структурі продукту, які необхідно брати до уваги під час розробки технологічного процесу.

При виборі типу клітковини потрібно враховувати структуру продукту та конкретні виробничі процеси. М'ясопродукти з подрібненою структурою, особливо емульговані продукти, містять відносно велику кількість жиру (20—35%), представленого переважно свинячим жиром (Corimayhua-Silva et al., 2024). Роль жиру в цих продуктах полягає у сприянні стабільності м'ясної емульсії, зменшенні втрат при термообробленні, покращенні текстури та соковитості готових виробів (Zhao et al., 2018). У численних дослідженнях використання харчових волокон розглянуто з точки зору зниження вмісту жиру та покращення якісних показників широкого асортименту м'ясопродуктів.

Для дорослих рекомендована допустима кількість харчових волокон становить 28—36 г/день, 70—80% з яких має становити нерозчинна клітковина (Страшинський, & Пергат, 2024). Нерозчинна фракція харчових волокон пов'язана з регуляцією кишечника, тоді як розчинна клітковина пов'язана зі зниженням рівня холестерину та всмоктуванням кишкової глюкози. Отже, включення харчових волокон у рецептури м'ясних і м'ясомістких продуктів допоможе підвищити їхню приживальність для споживачів.

Харчові волокна містяться в клітинній стінці рослин, які не перетравлюються організмом у шлунково-кишковому тракті людини, оскільки для цього в організмі відсутній специфічний фермент. Завдяки своїм функціональним

властивостям харчові волокна знижують ризик серцево-судинних захворювань, діабету, гіпертонії, ожиріння та деяких шлунково-кишкових захворювань, проявляють протиракову захисну дію.

Фізико-хімічні властивості харчових волокон, такі як розмір частинок, в'язкість і вологоутримувальна здатність, є добре відомими ознаками сенсорної якості певного продукту харчування з додаванням клітковини, яка знижує відчуття голоду. Крім того, важливою функціональною характеристикою клітковини є її висока вологоутримувальна здатність у м'ясних системах, що підвищує соковитість готових виробів і знижує втрати при зберіганні й доведенні до кулінарної готовності (Nielsen et al., 2018; Kehlet et al., 2017).

Препарат WF 200 Вітацел® — це білий дрібнозернистий концентрат пшеничних волокон, що має нейтральний смак і використовується для збагачення харчовими волокнами, зменшення вмісту жиру, покращення текстури та контролю міграції вологи у готових виробках. Продукт може використовуватися у м'ясних продуктах, містить 94,5% нерозчинної клітковини та 2,5% розчинної клітковини, має довжину 250 мкм і товщину 25 мкм, складається з 74% целюлози, 26% геміцелюлози та 0,5% лігніну (Vitacel® WF Wheat Fiber).

Мета дослідження: дослідити вплив використання в технології посічених напівфабрикатів різної кількості пшеничної клітковини, що замінює м'ясну сировину (яловичину та сало) в котлетах-бургерах, виготовлених за традиційною технологією, на хімічний склад, калорійність і технологічні показники котлет-бургерів.

Матеріали і методи. Використано попередньо гідратовану у співвідношенні 1:6 пшеничну клітковину Вітацел® WF 200 в кількості 1,25, 3,0 4,5 та 6,0%. Заміни м'ясної сировини, що використовуються в дослідженні, були обрані відповідно до вимог мінімальних специфікацій якості і забезпечують при використанні 6,0% клітковини в рецептурах отримання м'ясомістких зразків, а при використанні 1,25, 3,0 і 4,5% клітковини — отримання зразків м'ясних напівфабрикатів.

Хімічний склад котлет-бургерів, виготовлених з різним вмістом клітковини, визначали згідно з (Сухенко та ін., 2019). Калорійність розраховували за формулою:

$$\text{Калорії} = (C \cdot 4) + (P \cdot 4) + (F \cdot 9), \quad (1)$$

де С — вміст вуглеводів (г/100 г); Р — вміст білка (г/100 г); F — вміст жиру (г/100 г).

Визначення рН фаршу та готових виробів проводили на лабораторному рН-метрі. Величину рН визначали у водяній витяжці, отриманій при екстрагуванні сирого фаршу або готового продукту в співвідношенні з розчинником (водою) 1:10.

Втрати при термообробленні V_T розраховували за формулою:

$$V_T(\%) = \left(\frac{M_0 - M_1}{M_0} \right) \times 100, \quad (2)$$

де M_0 і M_1 маса зразків, які зважували на технічних вагах з точністю 0,01 г до та після термооброблення.

Зменшення діаметра ΔD було розраховано за формулою:

$$\Delta D(\%) = \frac{D_0 - D_1}{D_0} \times 100, \quad (3)$$

де D_0 і D_1 діаметр зразків (з точністю 0,1 см) до та після термооброблення; ΔD — зменшення діаметра.

Аналізи проводили у трьох повторностях. Оцінка похибки експериментальних даних і вимірюваних величин здійснювалась за загальноприйнятими методиками.

Викладення основних результатів дослідження. Сировиною тваринного походження для виготовлення посічених напівфабрикатів було яловиче і свиняче сало та інші інгредієнти: пшенична клітковина Vitacel® WF 200, вода, кухонна сіль, безфосфатний комплекс активних стабілізаторів і приправа «Бургер». Виготовлення контрольного і дослідних зразків посічених напівфабрикатів котлет-бургерів відпрацьовано в лабораторії кафедри технології м'яса і м'ясних продуктів НУХТ та у виробничій лабораторії ТОВ «Фудтек». Технологічний процес передбачав такі етапи: підготовка та подрібнення нежирної м'ясної сировини (яловичини) на м'ясорубці з діаметром отворів 12—16 мм; попередня гідратація пшеничної клітковини з розрахунку одна частина клітковини на кожні шість частин води (1 г клітковини : 6 г води) згідно з рекомендаціями виробника. Приготування м'ясного фаршу передбачало:

- 1-й етап — перемішування яловичини з внесенням розчину безфосфатного комплексу активних стабілізаторів (БКАС) і кухонної солі та гідратованої клітковини Vitacel® WF 200 протягом 8—10 хв до повного поглинання вологи й отримання однорідної маси, яку витримували для дозрівання 90—120 хв при температурі 2 ± 2 °C;

- 2-й етап — внесення жирної сировини і перемішування протягом 4—5 хв; повторне подрібнення м'ясного фаршу на м'ясорубці з діаметром отворів решітки 5 мм, після чого готовий фарш залишали на експозицію протягом 15—20 хв для стабілізації білкових зв'язків і рівномірного розподілу інгредієнтів при температурі 2 ± 2 °C; формування напівфабрикатів для бургерів вручну.

Для дослідження впливу пшеничної клітковини на м'ясну фаршеву систему клітковину Vitacel® WF 200 вносили після попередньої гідратації, виготовляли контрольний і дослідні зразки посічених напівфабрикатів згідно з рецептурами, наведеними в табл. 1. Зменшення вмісту жиру та м'яса в рецептурах провели таким чином, щоб підтримувати співвідношення одна частина жиру на кожні чотири частини м'яса (1 г жиру : 4 г м'яса).

Таблиця 1. Рецептури контрольного і дослідних зразків бургерів «Яловичі»

№ п/п	Складові компоненти	Контрольний зразок за ТУ У 10.1-34485173-009:2013, %	Дослідний зразок № 1, %	Дослідний зразок № 2, %	Дослідний зразок № 3, %	Дослідний зразок № 4, %
1.	Яловичина жилована 2 сорту	80	71,6	63,2	54,8	46,4
2.	Сало свинини бокове або обрізки сала	20	17,9	15,8	13,7	11,6
3.	Клітковина	—	1,5	3,0	4,5	6,0

Продовження таблиці 1

4.	Вода на гідратацію клітковини	—	9	18	27	36
Допоміжна сировина						
5.	Кухонна сіль	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
6.	Приправа «Бургер»	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
7.	Харчові фосфати	0,3	—	—	—	—
8.	БКАС	—	0,8	0,8	0,8	0,8
9.	Технологічна волога	7	7	7	7	7

Наведена заміна м'ясної сировини гідратованою пшеничною клітковиною забезпечила пропорційне зменшення кількості м'яса та жиру в кожній рецептурі. Як допоміжну сировину використано кухонну сіль, приправу «Бургер», для контрольного зразка харчові фосфати. Для дослідних зразків вносили БКАС згідно з патентом на корисну модель № 160690 (Страшинський та ін., 2025), який для рівномірного розподілення в м'ясній системі використовували у вигляді розчину. Контрольний зразок виготовлений без використання клітковини.

Котлети-бургери доводили до кулінарної готовності при температурі 180 °C до досягнення в геометричному центрі зразків 75 °C (перевертаючи кожен бургер кожні 2 хв).

Результати визначення хімічного складу (вміст білка, ліпідів, золи та вологи) й енергетичної цінності яловичих бургерів з гідратованою пшеничною клітковиною наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Хімічний склад і калорійність котлет-бургерів, виготовлених з різним вмістом клітковини Vitacel®

Зразки бургерів	Масова частка, %				Енергетична цінність, ккал
	білка	жиру	золи	вологи	
Контрольний зразок	18,21±0,55	17,44±0,41	2,72±0,03	61,67±0,39	230,94±2,95
Дослідний зразок № 1	15,57±0,54	14,02±1,31	2,51±0,15	65,52±1,31	198,04±13,76
Дослідний зразок № 2	14,09±0,44	12,81±0,77	2,56±0,03	66,65±0,57	187,14±7,32
Дослідний зразок № 3	11,59±0,22	9,51±0,89	2,47±0,04	69,75±0,92	158,66±10,06
Дослідний зразок № 4	9,89±0,49	8,44±0,43	2,45±0,04	71,26±0,79	147,26±5,33

Додавання гідратованої пшеничної клітковини до фаршів котлет-бургерів суттєво вплинуло на вміст ліпідів і білків: зі збільшенням клітковини знижується кількість ліпідів і білка у зразках. Щодо вмісту золи, то суттєвих відмінностей між варіантами не виявлено. Зниження вмісту білка та жиру можна пояснити відповідним зменшенням кількості м'яса та свинячого жиру в дослідних зразках (табл. 1). Вміст вологи у зразках збільшується при внесенні гідратованого пшеничного волокна. Подібні результати описані в (Choe et al.,

2013), де підтверджено значне підвищення вмісту вологи в дослідних м'ясо-продуктах, але вміст золи внаслідок збільшення кількості клітковини не змінювався. Крім того, ці автори зазначили, що зменшення вмісту жиру та збільшення вмісту білка були пов'язані зі збільшенням частки пшеничної клітковини. Автори (Choi et al., 2009) стверджують, що вміст вологи у свинячих фаршах збільшився, а вміст жиру зменшився завдяки заміні свинячого сала комбінацією клітковини рисових висівок (2%) та рослинних олій (10%). Натомість ці автори також повідомили про вищий вміст білка у фарші, виготовленому з рослинної олії та суміші клітковини рисових висівок, ніж у контрольних зразках фаршу з м'ясної сировини.

Слід звернути увагу на зниження в дослідному зразку № 1 вмісту ліпідів порівняно з контрольним зразком котлет-бургерів на 19,63%. Також зниження спостерігалось в дослідних зразках № 2 на 26,79%, № 3 — на 45,51%, №4 — на 51,80% порівняно з контрольним виробом. Таке різке зниження ліпідів дозволяє виробляти продукт з нижчою калорійністю, а отже, він може бути альтернативою висококалорійній їжі для харчування людей, які хочуть зменшити кількість споживаних калорій або збільшити частку нерозчинної клітковини у своєму раціоні.

Щодо калорійності яловичих бургерів з додаванням гідратованої пшеничної клітковини (табл. 2), то калорійність коливалася від 147,26 (високий вміст клітковини) до 230,94 ккал/100 г (контрольний зразок). Результати цього дослідження показали, що включення різної кількості пшеничної клітковини до рецептури яловичих бургерів впливає на калорійність, в результаті чого вони ставали виробами з меншим джерелом енергії.

Зниження калорійності між контрольним зразком і зразком з вмістом 1,5% клітковини становить на 14,2%. При порівнянні контрольних зразків бургерів з іншими варіантами дослідних зразків було отримано зниження на 19% для зразка № 2, на 31,1% — для зразка з вмістом клітковини 4,5%, на 36,2% — для зразка №4 з вмістом 6% клітковини в рецептурі.

Результати технологічних параметрів (значення рН, втрати при термообробленні, зменшення діаметра) наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Результати технологічних параметрів котлет-бургерів, виготовлених з різним вмістом клітковини і води

Фізико-хімічні показники	Зразки бургерів				
	контрольний зразок	дослідний зразок № 1	дослідний зразок № 2	дослідний зразок № 3	дослідний зразок № 4
Активна кислотність, рН	5,87±0,02	5,91±0,04	5,92±0,05	5,93±0,04	5,91±0,04
Втрати при термообробленні, В _т , %	31,32±1,98	29,05±1,81	26,93±1,25	27,51±0,75	29,74±0,63
Зменшення діаметра ΔD, %	25,58±1,16	22,35±1,96	20,56±1,41	19,07±0,51	16,86±0,41

Внесення гідратованої пшеничної клітковини Vitacel® у дослідні фарші котлет-бургерів та зниження вмісту м'ясної сировини не викликало суттєвих відмінностей значень рН і втрат при термообробленні. Відсутність суттєвих

відмінностей втрат маси під час доведення до кулінарної готовності дослідних зразків можна пояснити високою вологоутримувальною здатністю пшеничного волокна.

Згідно з дослідженням (Sánchez-Alonso et al., 2007) пшенична клітковина здатна зв'язуватися з водою перед приготуванням (у сирому фарші) та утримувати її навіть після денатурації білків при нагріванні і термообробленні. Ці автори виявили, що пшенична клітковина здатна утримувати більше вологи, доданої до рибного бургера, порівняно з контрольною обробкою (філе рибного фаршу без клітковини). У (Raúl et al., 2018) зазначається, що додавання до 3% пшеничної клітковини у фішбургери суттєво не впливає на втрати жиру під час приготування.

На діаметр доведених до кулінарної готовності котлет-бургерів впливає кількість доданого до м'ясних фаршів гідратованого пшеничного волокна. Виявлено, що зі збільшенням кількості заміни м'ясної сировини гідратованим пшеничним волокном зменшення діаметра бургерів знижується (табл. 3). Як наслідок, можна стверджувати, що пшенична клітковина зменшує усадку під час доведення до кулінарної готовності сформованих котлет-бургерів, що позитивно впливає на якість готових виробів. Зменшення діаметра при термообробленні є результатом денатурації м'ясних білків, яку спричиняє втрата вологи та жиру. Завдяки здатності зв'язувати вологу та жир пшенична клітковина в дослідних зразках запобігає зменшенню діаметра під час приготування.

Висновки

Доведено вплив використання в рецептурах посічених напівфабрикатів пшеничної клітковини на властивості м'ясних і м'ясомістких котлет-бургерів. Проведені дослідження свідчать про зниження вмісту ліпідів і білка у зразках та збільшення кількості вологи, але не виявлено значного впливу на показник рН та втрати маси при термообробленні. Котлети-бургери, що містять клітковину, можуть бути альтернативою висококалорійній їжі для харчування людей, які хочуть зменшити споживання калорій або збільшити частку нерозчинної клітковини у своєму раціоні. Використання пшеничної клітковини зменшує усадку під час доведення до кулінарної готовності сформованих котлет-бургерів, що позитивно впливає на якість готових виробів.

Література

- Гречко, В. В., Страшинський, І. М., Пасічний, В. М. (2019). Харчові волокна як функціональний інгредієнт у м'ясних напівфабрикатах. *Технічні науки та технології*, 2(16), 154—164. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-2\(16\)-154-164](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-2(16)-154-164).
- Страшинський, І. М., Пергат, О. А. (2024). Властивості модельних фаршів м'ясних і м'ясомістких напівфабрикатів в залежності від кількості структуроутворювачів. *Вісник ЛТЕУ (Технічні науки)*, 40, 59—66. <https://doi.org/10.32782/2522-1221-2024-40-091>.
- Сухенко, Ю. Г., Жеплінська, М. М., Пасічний, В. М., Тимошенко, І. В. (2019). *Оптимізація виробничих процесів*. Київ: Фірма «ІНКОС».
- Choe, J.-H., Kim, H.-Y., Lee, J.-M., Kim, Y.-J., Kim, C.-J. (2013). Quality of frankfurter-type sausages with added pig skin and wheat fiber mixture as fat replacers. *Meat Science*, 93(4), 849—854. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.11.054>.
- Choi, Y.-S., Choi, J.-H., Han, D.-J., Kim, H.-Y., Lee, M.-A., Kim, H.-W., Jeong, J.-Y., Kim, C.-J. (2009). Characteristics of low-fat meat emulsion systems with pork fat replaced by vegetable oils and rice bran fiber. *Meat Science*, 82(2), 266—271. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.01.019>.

Corimayhua-Silva, A. A., Elías-Peñafiel, C., Rojas-Ayerve, T., Guevara-Pérez, A., Farfán-Rodríguez, L., Encina-Zelada, C. R. (2024). Red Dragon Fruit Peels: Effect of Two Species Ratio and Particle Size on Fibre Quality and Its Application in Reduced-Fat Alpaca-Based Sausages. *Foods*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/foods13030386>.

Cui, B., Liang H., Li, J., Zhou, B., Chen, W., Liu, J., Li, B. (2022). Development and characterization of edible plant-based fibers using a wet-spinning technique. *Food Hydrocolloids*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107965>.

Das, A. K., Kumar Nanda, P., Madane, P., Biswas, S., Das, A., Zhang, W., Lorenzo, J. M. (2020). A comprehensive review on antioxidant dietary fibre enriched meat-based functional food. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 323—336. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.010>.

Dekkers, B. L., Remko, M. (2018). Boom, Atze Jan van der Goot. Structuring processes for meat analogues. *Trends in Food Science & Technology*, 81, 25—36. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.011>.

Delgado-Ospina, J., Martuscelli, M., Grande-Tovar, C. D., Lucas-González, R., Molina-Hernandez, J. B., Viuda-Martos, M., Fernández-López, J., Pérez-Álvarez, J. Á., Chaves-López, C. (2021). Cacao Pod Husk Flour as an Ingredient for Reformulating Frankfurters: Effects on Quality Properties. *Foods*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/foods10061243>.

Han, M., Bertram, H. C. (2017). Designing healthier comminuted meat products: Effect of dietary fibers on water distribution and texture of a fat-reduced meat model system. *Meat Science*, 133, 159—165. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2017.07.001>.

Kehlet, U., Pagter, M., Aaslyng, M. D., Raben, A. (2017). Meatballs with 3% and 6% dietary fibre from rye bran or pea fibre — Effects on sensory quality and subjective appetite sensations. *Meat Science*, 125, 66—75. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.11.007>.

McClements, D. J., Grossmann, L. (2021). The science of plant-based foods: Constructing next-generation meat, fish, milk, and egg analogs. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 20, 4049—4100. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12771>.

Mehta, N., Ahlawat, S. S., Sharma, D. P., Dabur, R. S. (2015). Novel trends in development of dietary fiber rich meat products — a critical review. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 633—647. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1010-2>.

Morimoto, N. (2025). Dietary Fiber: Importance and Impact on Health Parameters. *Handbook of Public Health Nutrition*, 1—26. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32047-7_104-1.

Nielsen, L. V., Kristensen, M. D., Klingenberg, L., Ritz, C., Belza, A., Astrup, A., Raben, A. (2018). Protein from Meat or Vegetable Sources in Meals Matched for Fiber Content has Similar Effects on Subjective Appetite Sensations and Energy Intake — A Randomized Acute Cross-Over Meal Test Study. *Nutrients*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/nu10010096>.

Raúl, L. J., Araújo, I. B., de Barbosa, R. C., Maciel, M. I. S., Shinohara, N. K. S., Campagnoli de Oliveira Filho, P. R. (2018). Manufacture of Biquara (*Haemulon Plumierii* — Lacepède, 1801) Fish-burger with Addition of Wheat Bran. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 27(5), 544—556. <https://doi.org/10.1080/10498850.2018.1461159>.

Sánchez-Alonso, I., Haji-Maleki, R., Borderías, A. J. (2007). Wheat fiber as a functional ingredient in restructured fish products. *Food Chemistry*, 100(3), 1037—1043. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.09.090>.

Schreuders Floor, K. G., Dekkers, B. L., Bodnár, I., Ermi, P., Boom, R. M., van der Goot, A. J. (2019). Comparing structuring potential of pea and soy protein with gluten for meat analogue preparation. *Journal of Food Engineering*, 261, 32—39. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.04.022>.

Sha, L., Xiong, Y. L. (2020). Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 51—61. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.022>.

VITACEL® WF Wheat Fiber. (б. д.). Every fiber for a better tomorrow. <https://www.jrs.eu/en/food-ingredients/products/vitacel-wheat-fiber.php>.

Zhao, Yi., Hou, Q., Zhuang, X., Wang, Ya., Zhou, G., Zhang, W. (2018). Effect of regenerated cellulose fiber on the physicochemical properties and sensory characteristics of fat-reduced emulsified sausage. *LWT*, 97, 157—163. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.06.053>.

УДК 664.664.9

APPLICATION OF MUNTONS MALTICHOC DRIED REGULAR AS A NATURAL COLORANT AND FLAVOR-FORMING INGREDIENT IN TOAST BREAD TECHNOLOGY

O. Bilyk¹, <http://orcid.org/0000-0003-3606-1254>L. Burchenko¹, <http://orcid.org/0000-0002-5413-961X>Yu. Bondarenko¹, <http://orcid.org/0000-0002-3781-5604>S. Kraievskaya², <https://orcid.org/0000-0003-3499-9636>¹National University of Food Technologies²West Ukrainian National University**Key words:***Colorant**Color**Muntions Maltichoc Dried**Regular**Toast quality***Article history:**

Received 13.11.2025

Received in revised form

28.11.2025

Accepted 15.12.2025

Corresponding author:

O. Bilyk

E-mail:

bilyklena@gmail.com

Citation: Білик О. А., Бурченко Л. М., Бондаренко Ю. В., Краєвська С. П. (2025). Застосування Muntions maltichoc dried regular як натурального барвника та смако-ароматуювального інгредієнта в технології тостового хліба. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 335—352.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-25

ABSTRACT

The feasibility of using the Muntions Maltichoc Dried Regular (MDR) blend in toast bread technology in order to improve its sensory and nutritional characteristics was investigated. MDR is a dried powder of barley extract and barley malt with the addition of other malt ingredients and natural glutamic acid, which contributes to the formation of a rich taste, aroma, and intense color of the finished products.

It was found that the addition of MDR increased the specific volume of the products, while the improved color, taste, and aroma enhanced consumer appeal and willingness to taste the product. MDR was found to have a positive effect on extending product freshness due to the presence of dextrans in its composition, which retain moisture more effectively and are less susceptible to retrogradation during storage. The optimal dosage of MDR in the toast bread formulation was determined to be 1.0% relative to the mass of flour. An increase in the dough elasticity index by 3.5% compared to the control indicated an improvement in the dough's ability to recover after deformation, resulting in enhanced elasticity and a greater capacity to retain carbon dioxide.

It was found that the crust color of "ShokoToast" bread was significantly darker than that of the control sample. The total color difference relative to the control sample was 14.2, while the crust lightness value (L^*) was 20% lower, indicating reduced lightness characteristic of darker colors.

The use of MDR in the formulation increased the protein and mineral content as well as the energy value of the products without a significant change in carbohydrate content. The obtained results confirm the feasibility of using MDR as a natural ingredient to expand the range of toast bakery products with improved consumer properties.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-25

ЗАСТОСУВАННЯ MUNTONS MALTICHOC DRIED REGULAR ЯК НАТУРАЛЬНОГО БАРВНИКА ТА СМАКО-АРОМАТОУТВОРЮЮЧОГО ІНГРЕДІЄНТА В ТЕХНОЛОГІЇ ТОСТОВОГО ХЛІБА

О. А. Білик¹, <http://orcid.org/0000-0003-3606-1254>

Л. М. Бурченко¹, <http://orcid.org/0000-0002-5413-961X>

Ю. В. Бондаренко¹, <http://orcid.org/0000-0002-3781-5604>

С. П. Красівська², <https://orcid.org/0000-0003-3499-9636>

¹Національний університет харчових технологій

²Західноукраїнський національний університет

У статті досліджено можливість використання суміші Muntons Maltichoc Dried Regular (MDR) у технології тостового хліба з метою покращення його органолептичних і харчових характеристик. MDR є сушеним порошком екстракту ячменю та ячмінного солоду з додаванням інших солодових інгредієнтів і натуральної глутамінової кислоти, що зумовлює формування насиченого смаку, аромату та інтенсивного забарвлення готових виробів.

Встановлено, що у разі дозування MDR збільшується питомий об'єм виробів, колір, смак і запах сприяють більшому бажанню скуштувати виріб. Встановлено, що MDR позитивно впливає на подовження свіжості виробів за рахунок наявності у складі декстринів, які більше утримують вологу і не піддаються ретроградації під час зберігання. Також встановлено, що оптимальне дозування в рецептурі тостового хліба — 1,0% MDR до маси борошна.

Збільшення індексу еластичності тіста на 3,5% у разі внесення MDR порівняно з контролем вказує на покращання здатності тіста відновлюватися після здуття бульбашки, а отже, еластичність тіста краща, що дає йому змогу утримувати більше вуглекислого газу.

Встановлено, що колір скоринки тостового хліба «ШокоТост» значно темніший порівняно з контрольним зразком, різниця зміни кольору становить 14,2, значення яскравості скоринки L^* на 20% менше, що вказує на важкість зорового сприйняття (характерно для темних кольорів).

Доведено, що використання MDR у рецептурі сприяє підвищенню вмісту білків і мінеральних речовин, а також зростанню енергетичної цінності виробів без істотної зміни кількості вуглеводів. Отримані результати свідчать про доцільність застосування MDR як натурального інгредієнта для розширення асортименту тостових хлібобулочних виробів із покращеними споживчими властивостями.

Ключові слова: барвник, колір, Muntons Maltichoc Dried Regular, якість тостового хліба.

Постановка проблеми. На ринку хліба і хлібобулочних виробів в Україні спостерігається висока конкуренція. Виробники хлібобулочних виробів пропонують

споживачам широкий асортимент виробів з різноманітними смаковими властивостями, поживною цінністю, спеціального призначення. Розширення асортименту хлібобулочних виробів є важливим важелем хлібопекарських підприємств в конкуруванні за споживача (Дробот, 2023).

Сьогоднішній споживач має можливість задовільнити всі свої гастрономічні вподобання, але проблема в тому, що пандемія, війна призвела до зменшення можливості отримувати задоволення за межами домівок і тому їжа як задоволення стоїть на першому місці. Через цю проблему виникла нова тенденція під назвою «Kuchisabishii» — це японський термін, який безпосередньо перекладається як «самотній рот», коли ти не голодний, але їси, тому що твій рот самотній. Отже, найактуальніша проблема задовольнити споживача вирішується у різноманітненні асортименту привабливими та оригінальними органолептичними показниками якості (Kuchisabishii, 2025). На сьогодні це можливо за рахунок використання різної нетрадиційної сировини.

Тостовий хліб набуває все більшої популярності серед споживачів. На ринку сьогодні існує багато різноманітних видів тостового хліба і його продажі з року в рік збільшуються, тому для дослідження обрано саме цей вид хлібобулочних виробів.

З нетрадиційної сировини для хлібобулочних виробів обрано солодові екстракти. Провідний виробник солодових продуктів — фірма Muntons Ingredients (Белика Британія), пропонує нові інгредієнти для харчової промисловості: Malti Crunch Chocolate та Muntons Maltichoc Dried Regular (MDR) (Muntons Maltichoc Dried Regular is a sustainable cocoa power alternative without impacting the quality of product application, 2025).

У статті досліджено можливості використання Muntons Maltichoc Dried Regular як натурального смако-ароматичного інгредієнта в технології тостового хліба. Це актуальне наукове дослідження, оскільки в країнах Європейського Союзу при виробництві хлібобулочних виробів заборонено використовувати саме барвники, тоді як MDR — це інгредієнт, застосування якого розширює можливості для урізноманітнення асортименту кольорових виробів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні тенденції розвитку хлібопекарської промисловості характеризуються зростанням вимог споживачів до якості хлібобулочних виробів, зокрема до їх аромату, смаку, кольору та загальної сенсорної привабливості. Аромат хліба є одним із важливих чинників споживчого вибору, оскільки саме леткі ароматичні сполуки формують перше враження про продукт і значною мірою визначають його прийнятність. У зв'язку з цим значна кількість наукових досліджень спрямована на вивчення впливу технологічних факторів і рецептурних компонентів на формування ароматичного профілю хліба.

У праці (Birch, Petersen, & Hansen, 2013) показано, що умови бродіння, зокрема кількість дріжджів і температура ферментації, істотно впливають на склад летких ароматичних сполук м'якушки пшеничного хліба. Збільшення кількості дріжджів сприяє інтенсифікації метаболічних процесів, у результаті чого зростає вміст альдегідів і кетонів, серед яких 2,3-бутандіон і фенілацетальдегід характеризуються високою ароматичною активністю. Водночас підвищення температури бродіння активізує процеси окислення ліпідів, що призводить до накопичення гексаналю та

гептаналю з високими значеннями активності запаху. Низькотемпературне бродиння, навпаки, сприяє утворенню складних ефірів, хоча їх внесок у загальний ароматичний профіль залишається відносно незначним. Отримані результати свідчать про важливість керування умовами бродиння для цілеспрямованого формування аромату хліба.

Іншим перспективним напрямом удосконалення сенсорних властивостей хліба є використання ферментних препаратів. У праці (Xu et al., 2023) досліджено вплив комерційної пептидази Flavourzyme на аромат м'якушки та скоринки хліба. Встановлено, що додавання Flavourzyme суттєво підвищує вміст вільних амінокислот і низькомолекулярних пептидів у тісті, що створює сприятливі умови для інтенсифікації реакцій Маяра під час випікання. Це, у свою чергу, сприяє накопиченню ароматично активних сполук, таких як 3-метил-1-бутанол, 2-феніл-етанол, піразини та мальтол. Сенсорний аналіз підтвердив посилення сирних і алкогольних ноток у м'якушці та карамельно-підсмажених і горіхових відтінків у скоринці, що свідчить про ефективність ферментативної модифікації білково-вуглеводної матриці тіста для покращення аромату виробів.

Використання нетрадиційної сировини також активно досліджується як інструмент регулювання забарвлення, ароматичного та смакового профілю хліба. Зокрема, у праці (Luning, Roozen, Moëst, & Posthumus, 1991) показано, що додавання ферментативно активного соєвого борошна змінює легкий склад хліба, збільшуючи концентрацію продуктів окислення ліпідів, таких як гексаналь і 1-гексанол. Хоча це може сприяти формуванню специфічних ароматичних відтінків, надмірне накопичення таких сполук здатне негативно впливати на сенсорне сприйняття продукту, що обмежує можливі рівні заміни традиційної сировини.

Окрему увагу приділено формуванню кольору хліба як важливої складової його візуальної привабливості. У дослідженні (Haghighat, Honarvar, & Mooraki, 2023) запропоновано використання коричневого цукру та активованого вугілля для отримання хліба з інтенсивнішим забарвленням. Встановлено, що оптимальне поєднання цих інгредієнтів забезпечує покращення фізико-хімічних показників і стабільність кольорових характеристик. Водночас використання активованого вугілля потребує обережного дозування з огляду на можливий вплив на текстуру та харчову цінність виробів.

У контексті покращення аромату, смаку та кольору хлібобулочних виробів особливе місце посідають солодові інгредієнти. Солод, отриманий переважно з ячменю, є джерелом мальтози, ароматичних сполук, вітамінів і амінокислот, що зумовлює його багатofункціональність у хлібопекарській технології. Використання солоду у вигляді екстрактів або сушених форм є технологічно доцільнішим порівняно з борошном або сиропами, оскільки забезпечує стабільність дозування та зручність застосування. Як діастатичні, так і недіастатичні солоди сприяють покращенню аромату, кольору та структури виробів, хоча їх використання повинно узгоджуватися з ферментною активністю борошна.

В умовах глобального скорочення виробництва какао-бобів і зростання цін на какао особливої актуальності набуває пошук альтернативних інгредієнтів, здатних забезпечити шоколадні та смажені смакові ноти. У цьому аспекті солодові продукти нового покоління, зокрема Muntions Maltichoc Dried Regular, розглядаються як стійка альтернатива традиційним какаовмісним компонентам. Завдяки

поєднанню солодових екстрактів і природних ароматичних сполук такі інгредієнти дозволяють формувати насичений смак і темне забарвлення виробів без істотного впливу на базову технологічну схему виробництва.

Отже, аналіз літературних джерел свідчить, що керування умовами бродіння, використання ферментних препаратів, нетрадиційної сировини та солодових інгредієнтів є ефективними інструментами формування сенсорних властивостей хлібобулочних виробів. Солодові екстракти, зокрема продукти типу MDR, поєднують у собі технологічну зручність, стабільність якості та здатність покращувати аромат, смак і колір хліба, що робить їх перспективними для застосування в сучасних рецептурах тостових хлібобулочних виробів.

Мета дослідження: розроблення тостового хліба з привабливим та оригінальним смаком, ароматом і зовнішнім виглядом.

Матеріали і методи. Для досліджень обрано тостовий хліб з такою рецептурою: 1000 г борошна пшеничного вищого сорту, дріжджі хлібопекарські 50 г, сіль кухонна 15 г, цукор білий 100 г, масло вершкове 50 г, сухе молоко 20 г.

Використовували Muntions Maltichoc Dried Regular (MDR) — сушений порошок екстракту ячменю, ячмінного солоду та інших солодових інгредієнтів, натуральної глутамінової кислоти, яка покращує смак і колір, а також надає насиченого шоколадного смаку за рахунок введення гірких смажених смакових ноток (Muntions Maltichoc Dried Regular is a sustainable cocoa power alternative without impacting the quality of product application, 2025). Хімічний склад і органолептичні показники, надані виробником, наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Органолептичні показники якості та хімічний склад Muntions Maltichoc Dried Regular

Найменування показників	MDR
Зовнішній вигляд	порошок
Смак і запах	злегка солодкуватий, смажений
Колір	темно-коричневий порошок
Масова частка вологи, %	3,6
Масова частка білку, %	6,7
Масова частка жиру, %	1,4
ненасичені	0,7
Масова частка вуглеводів, %	86,8
цукрів	22,9
Харчові волокна	17,5
Зола	1,5

Для встановлення технологічно можливого дозування MDR у рецептуру хліба проводили пробне лабораторне випікання. Дослідні зразки тіста замішували з включенням в рецептуру контрольного зразка 1, 2, 3 та 4% MDR до маси борошна.

Тісто для всіх зразків замішували в тістомісильній машині ESHER (Італія) на першій швидкості 4...6 хв і 10...12 хв — на другій швидкості. Початкова температура тіста становила 25...26 °С. Тісто залишали на відлежування протягом 15...20 хв за температури 30...32 °С. Після відлежування тісто ділили на шматки масою 0,275 кг, які формували у вигляді круглих подових булочних виробів і по

три вкладали в форми, які поміщали на вистоювання в шафу вистоювання Sveba Dahlin AB DC-21 (Швеція) за температури 35...38 °С. Кінець вистоювання встановлювали органолептично. Вистояні тістові заготовки випікали у секційній печі Sveba Dahlin AB DC-21 (Швеція) при подачі пари (6 с) за температури 200...220 °С протягом 25...30 хвилин.

Оцінювання готових виробів проводили через 4 год після випікання за органолептичними показниками, зокрема: станом поверхні, правильністю форми, структурою пористості, еластичністю, кольором і розжовуваністю м'якушки, а також ароматом і смаком (Galenko, Shevchenko, Ceccanti, Mignani, & Litvynchuk, 2024).

Масову частку вологи м'якушки визначали методом висушування наважки в сушильній шафі СЕШ-3М (ТОВ «УкрАналитика», Україна) за температури 130 °С протягом 40 хвилин. Кислотність вимірювали шляхом титрування витяжки, приготовленої з м'якушки, розчином гідроксиду натрію або калію в присутності фенолфталеїну як індикатора (Hetman, Mykhonik, Kuzmin, & Shevchenko, 2021).

Пористість виробів характеризували як відсоткове співвідношення об'єму пор до загального об'єму м'якушки (Verheyen, Albrecht, Elgeti, Jekle, & Becker, 2015), вимірюючи її за допомогою приладу контролю пористості КП.

Об'єм хліба встановлювали за допомогою об'ємомірника (ємності з дрібним зерном), який працює за принципом витіснення зерна хлібом. Об'єм витісненого зерна (см³), виміряний циліндром, відповідав об'єму хліба (Shevchenko, Drobot, & Galenko, 2022). Питомий об'єм визначали як відношення об'єму хліба до його маси з точністю до 1 см³/100 г (Zhu, Sakulnak, & Wang, 2016).

Газоутримувальну здатність тіста визначали, фіксуючи зміну його об'єму від початку бродіння до моменту осідання в мірних циліндрах за температури 30 °С, відносної вологості 75%, а також за показником розпливання кульки тіста (Дробот, 2015).

За результатами органолептичного та фізико-хімічного оцінювання готових виробів розраховували комплексний показник якості. Комплексний показник якості — це загальна кількість балів, яку отримує дослідний зразок під час його аналізу. Для його розрахунку кожен виріб оцінювали за такими показниками: питомий об'єм, правильність форми, колір скоринки, черствіння через 72 год, стан поверхні скоринки, колір м'якушки, структура пористості, формостійкість подового хліба, реологічні властивості м'якушки, аромат хліба, смак хліба, розжовуваність м'якушки.

Отримані значення оцінювали за п'ятибальною шкалою з урахуванням коефіцієнта вагомості, який встановлювали для кожного показника методом експертної оцінки. Тобто надану показнику кількість балів множили на коефіцієнт вагомості. Далі знаходили суму отриманих величин. Чим більшу кількість балів отримує в результаті розрахунку зразок, тим кращі його показники якості (Лебеденко, Пшенишнюк, & Соколова, 2014). В експертну комісію було включено сім кандидатів технічних наук, трьох здобувачів доктора філософії та 15 здобувачів вищої освіти за спеціальністю «Харчові технології».

Співвідношення скоринки/м'якушки було розраховано як масу скоринки, віднесено до маси м'якушки в сухому вигляді (Dessev та ін., 2020). Співвідношення

скоринки до м'якушки визначали шляхом відділення скоринки від виробу за допомогою леза бритви; критерії поділу ґрунтувалися на сухому та більш щільному шарі на поверхні хліба, який має колір від коричневого до білого. Потім їх поміщали в алюмінієві чашки і ставили в сушильну шафу при 103 °C на 16 год (три повтори). Для кожного аналізу використовували три зразки хліба. Зразки охолоджували в ексікаторі та зважували аналітичними вагами з чутливістю $\pm 0,01$ г.

Для встановлення впливу MDR на ступінь підрум'янювання скоринки хліба під час випікання досліджували колір скоринки та м'якушки. Дослідження здійснювали за методикою, описаною в (Abedin, Tajria, Abdullah, Hassan, & Farzana, 2025; Swiacka та ін., 2024) за допомогою Chroma meter CR-200 (Minolta, Japan) із системою Hunter $L^*a^*b^*$. Легкість L^* описує світлість зразка зі значеннями від 0 (чорний) до 100 (білий). Психометричний тон a^* описує зелену ($-a^*$) та червону ($+a^*$) шкали, тоді як психометрична кольоровість b^* визначає синій ($-b^*$) та жовтий ($+b^*$). Показники a^* та b^* обмежені калібруванням білого. Числове значення ΔE описує загальну різницю кольорів і визначається за формулою (1):

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}, \quad (1)$$

де L_0^* , a_0^* , b_0^* контрольного зразка, L^* , a^* , b^* дослідного зразка. Кожний показник вимірювався в п'яти точках, а для розрахунку був усереднений.

Обчислення індексу білизни (WT), насичення кольору, індекс потемніння (BI) кожного зразка визначали згідно з рівняннями, наведеними в (Abedin, Tajria, Abdullah, Hassan, & Farzana, 2025; Swiacka та ін., 2024).

Уся сировина та реактиви відповідали вимогам нормативної документації та зберігалися в умовах, зазначених виробником.

Для забезпечення достовірності результати кожного експерименту отримували у триразовому повторенні. Під час обробки враховували середньоквадратичне відхилення, а графічне представлення даних виконували за допомогою стандартних інструментів статистичного аналізу Microsoft Excel 2010.

Викладення основних результатів дослідження. У технології тостового хліба ключовим критерієм є якість сировини, тому важливим етапом наукового дослідження є визначення органолептичних і фізико-хімічних показників солодового екстракту. Muntons Maltichoc Dried Regular (MDR) — це сушений порошок екстракту ячменю та ячмінного солоду з додаванням інших солодових інгредієнтів і натуральної глютамінової кислоти, що зумовлює його виражені смако-ароматичні та барвні властивості. Результати досліджень органолептичних і фізико-хімічних показників якості наведено в табл. 2. Комплексна оцінка органолептичних і фізико-хімічних показників MDR (табл. 2) свідчить про доцільність його використання як функціонального інгредієнта у виробництві тостового хліба.

Органолептичні характеристики MDR (злегка солодкуватий, смажений смак і запах, а також темно-коричневий колір порошку) є технологічно цінними для формування привабливих споживчих властивостей тостового хліба, зокрема кольору, смаку й аромату. Введення MDR у рецептуру сприятиме посиленню смаку виробів, формуванню насичених солодових і гірко-смажених ноток, що особливо актуально для тостового хліба. Наявність натуральної глютамінової кислоти забезпечує ефект умами, підвищуючи смакову повноту і гармонійність продукту

без застосування штучних підсилювачів смаку, що відповідає сучасним вимогам до clean label-рішень.

Таблиця 2. Органолептичні, фізико-хімічні Muntions Maltichoc Dried Regular (n=3, p≥0,95, δ=3...5%)

Найменування показників	MDR
Органолептичні показники	
Зовнішній вигляд	порошок
Смак і запах	злегка солодкуватий, смажений
Колір	темно-коричневий порошок
Фізико-хімічні показник	
Масова частка вологи, %	3,6
Індекс розчинності, см ³	1,3
Відносна швидкість розчинення, %	48,0
Ступінь злежування, %, за розміру пор сита 250 нм	2,1

Темно-коричнєве забарвлення MDR зумовлює його здатність інтенсифікувати колір м'якушки і скоринки тостового хліба. Це дає змогу регулювати колірні характеристики готових виробів, надаючи їм привабливого «підсмаженого» вигляду та підсилювати асоціацію зі смаком солоду і шоколадно-карамельними відтінками, що позитивно сприймається споживачами.

Фізико-хімічні показники MDR також підтверджують технологічну доцільність його використання. Низька масова частка вологи (3,6%) забезпечує добру зберіжувальність порошку, мікробіологічну стабільність і зручність у дозуванні, а також мінімальний вплив на зміну показника вологості тіста. Індекс розчинності 1,3 см³ та відносна швидкість розчинення 48,0% свідчать про здатність MDR достатньо швидко диспергуватися у водному середовищі, що сприяє рівномірному розподілу інгредієнта в тісті та стабільності смако-ароматичного профілю готових виробів. Низький ступінь злежування (2,1% за розміру пор сита 250 нм) вказує на добрі сипкі властивості порошку, що є важливим для промислового використання в умовах дозування та зберігання.

З технологічної точки зору, використання MDR у рецептурі тостового хліба може також опосередковано впливати на перебіг реакцій Маяра та карамелізації під час випікання і подальшого обсмажування скибок у тостері. Наявність солодових компонентів і продуктів їх термічної обробки сприяє формуванню більш інтенсивного аромату та забарвлення скоринки, що дозволяє підвищити сенсорну привабливість виробів без істотної зміни базової технологічної схеми.

Отже, результати органолептичної та фізико-хімічної оцінки MDR (табл. 2) підтверджують доцільність його застосування в технології тостового хліба як натурального інгредієнта для покращення смаку, аромату та кольору готових виробів, а також для розширення асортименту хлібобулочних виробів з підвищеною сенсорною привабливістю й орієнтацією на сучасні споживчі тренди.

Згідно з рекомендаціями виробника дозування в борошняні вироби MDR становить 1,0% до маси борошна. Оскільки одне із завдань дослідження — розробити

тостовий хліб, який має насичений смак та аромат, було прийнято рішення дослідити можливість більшого дозування: 2,0, 3,0 та 4,0% MDR.

Для цього здійснювали лабораторні випікання, застосовуючи чорлівудський спосіб тістоприготування. Тісто для тостового хліба готували за рецептурою американського тостового хліба, MDR дозували в кількості 1,0, 2,0, 3,0 та 4,0% до маси борошна. Отримані результати наведено в табл. 3. та на рис. 1.

Таблиця 3. Показники якості тостового хліба у разі використання MDR за бальною оцінкою (n=3, p≥0,95, δ=3...5%)

Показник якості тостового хліба	Коефіцієнт вагомості	Контроль, без добавок	Дозування MDR, % до маси борошна			
			1,0	2,0	3,0	4,0
Питомий об'єм, см ³ на 100 г хліба	2,0	348	369	374	354	341
		4,2	4,6	4,6	4,2	4,0
Правильність форми для виробу, що випікався без кришки	1,0	0,46	0,48	0,48	0,46	0,44
		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Черствіння через 72 год од. пр.	3,0	46	71	76	75	77
		2,8	3,8	4,0	4,0	4,0
Кришкуватість, %	3,0	11,8	9,6	9,2	9,0	8,7
		3,2	3,6	3,6	3,6	3,8
Стан поверхні скоринки	1,0	Бездоганно гладенька, без пухирців і тріщин, підривів, глянцева				Досить гладенька, помітні підриви
		5,0	5,0	5,0	5,0	4,0
Структура пористості	3,0	Пори дрібні, тонкостінні, не бездоганно розподілені по всій поверхні як для тостового хліба, випеченого у формі без кришки				
		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Реологічні властивості м'якушки	1,0	Дуже м'яка, ніжна, еластична		М'яка, еластична		Трохи ущільнена
		5,0	5,0	4,0	4,0	3,0
Аромат хліба	1,5	Аромат властивий тостовому хлібу, вершковий	Інтенсивно виражений, властивий для тостового хліба, присмак шоколаду	Інтенсивно виражений, властивий для тостового хліба, присмак шоколаду, підгорілість		
		5,0	5,0	4,0	4,0	4,0
Смак хліба	1,5	Смак властивий тостовому хлібу, вершковий	Інтенсивно виражений, властивий для тостового хліба, присмак шоколаду	Інтенсивно виражений, властивий для тостового хліба, присмак шоколаду, гірчинка		
		5,0	5,0	4,0	4,0	4,0

Продовження таблиці 3

Розжовуваність м'якушки	3,0	Ніжна, на один укус			Ніжна, на один укус, заминається	
		5,0	5,0	5,0	3,0	3,0
Комплексний показник якості K_0, бали		86,4	91,4	88,0	81,2	79,4

Розрахунок комплексного показника якості здійснювали за формулою 2.2.

Тостовий хліб без добавок (контроль):

$$K_0 = 2 \cdot 4,2 + 1 \cdot 5 + 3 \cdot 2,8 + 3 \cdot 3,2 + 1 \cdot 5 + 3 \cdot 5 + 1 \cdot 5 + 1,5 \cdot 5 + 1,5 \cdot 5 + 3 \cdot 5 = 86,4 \text{ бала.}$$

Тостовий хліб з 1,0% MDR до маси борошна:

$$K_0 = 2 \cdot 4,6 + 1 \cdot 5 + 3 \cdot 3,8 + 3 \cdot 3,6 + 1 \cdot 5 + 3 \cdot 5 + 1 \cdot 5 + 1,5 \cdot 5 + 1,5 \cdot 5 + 3 \cdot 5 = 91,4 \text{ бала.}$$

Тостовий хліб з 2,0% MDR до маси борошна:

$$K_0 = 2 \cdot 4,6 + 1 \cdot 5 + 3 \cdot 4 + 3 \cdot 3,6 + 1 \cdot 5 + 3 \cdot 5 + 1 \cdot 4 + 1,5 \cdot 4 + 1,5 \cdot 4 + 3 \cdot 5 = 88 \text{ балів.}$$

Тостовий хліб з 3,0% MDR до маси борошна:

$$K_0 = 2 \cdot 4,2 + 1 \cdot 5 + 3 \cdot 4 + 3 \cdot 3,6 + 1 \cdot 5 + 3 \cdot 5 + 1 \cdot 4 + 1,5 \cdot 4 + 1,5 \cdot 4 + 3 \cdot 3 = 81,2 \text{ бала.}$$

Тостовий хліб з 4,0% MDR до маси борошна:

$$K_0 = 2 \cdot 4,0 + 1 \cdot 5 + 3 \cdot 4 + 3 \cdot 3,8 + 1 \cdot 4 + 3 \cdot 5 + 1 \cdot 3 + 1,5 \cdot 4 + 1,5 \cdot 4 + 3 \cdot 3 = 79,4 \text{ бала.}$$

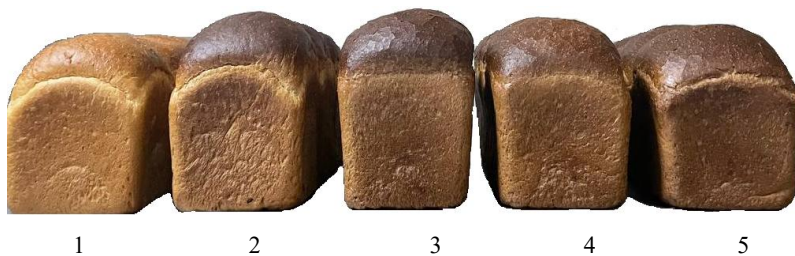


Рис. 1. Фото готових виробів тостового хліба: 1 — контроль без добавок; 2 — з 1,0% MDR до маси борошна; 3 — з 2,0% MDR до маси борошна; 4 — з 3,0% MDR до маси борошна; 5 — з 4,0% MDR до маси борошна

Результати досліджень показали, що в разі дозування MDR 3% та більше зменшується питомий об'єм виробів, хоча в тістову систему вноситься більша кількість солодового цукру. Це пов'язано з тим, що солодові цукри ферментуються дріжджами на пізніх стадіях бродіння, а в технології тостового хліба відсутній технологічний процес бродіння, тож замість позитивного ефекту виникають підриви верхньої скоринки та зменшення питомого об'єму.

Результати бальної оцінки показали, що найвищий показник якості у зразка з 1,0% MDR до маси борошна. Зразок з 2,0% має вищий показник якості, ніж контроль, але він поступається зразку з 1,0% MDR до маси борошна. Тому подальші дослідження стосуються впливу 1,0% MDR до маси борошна на структурно-механічні властивості тіста, біохімічні процеси, що проходять у тісті, та споживчу якість.

Попередніми дослідженнями встановлено позитивний вплив на питомий об'єм, правильність форми виробів і тонкостінну пористість, тому доцільно було дослідити, як впливає MDR в кількості 1,0% до маси борошна на кількість і якість

клейковини. Отримані результати наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Кількість та якість клейковини (n=3, p≥0,95, δ=3...5%)

Показники якості	Контроль	1% MDR
Вміст клейковини:		
сирої, %	29,5	29,2
сухої, %	10,9	10,2
Якість клейковини:		
колір	світлий	світлий
розтяжність	хороша	хороша
еластичність	хороша	хороша
ІДК, од. пр.	64,3	56,8
Гідратаційна здатність, %	194,5	198,6

Аналіз підтвердив, що при використанні MDR зменшується кількість клейковини в межах похибки досліджу, адже цукри, внесені з MDR, конкурують з клейковинними білками за воду.

Оскільки тостові хліба випікаються тільки формовими, доцільно було дослідити газоутримувальну здатність тіста, яка визначалася за зміною його об'єму в мірному циліндрі на 250 см³ протягом 90 хв (процес відлежування та випікання в першій зоні) у термостаті за температури 30 °С.

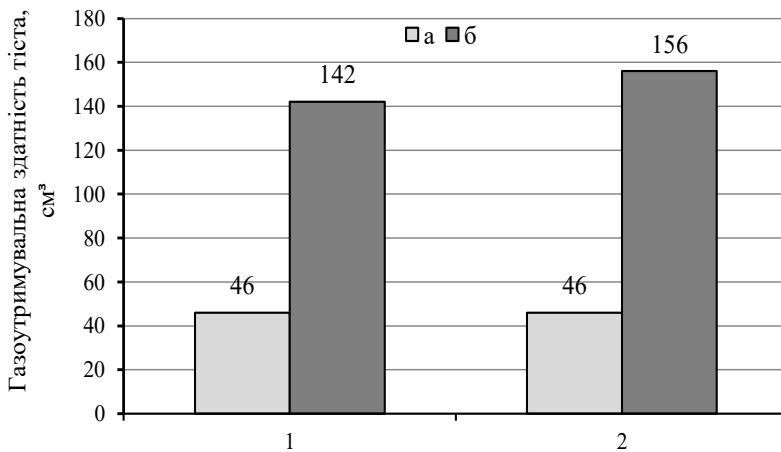


Рис. 2. Газоутримувальна здатність тіста: 1 — контроль без добавок; 2 — з 1,0% MDR до маси борошна; а — початкова; б — кінцева

Аналіз газоутримувальної здатності показав, що в разі використання MDR показник перевищує контрольний зразок на 9,8%, що підтверджено більшим об'ємом і в результаті виробу випікаються без дефектів. Краща газоутримувальна здатність пов'язана з укріпленням клейковини.

Для підтвердження отриманих результатів здійснювали інструментальне дослідження з визначення пружно-еластичних характеристик тіста за допомогою

альвеографа фірми «Шопен» (Франція). Аналіз альвеографічних кривих наведено в табл. 5.

Таблиця 5. Пружно-еластичні властивості тіста за альвеографом ($n=3$, $p \leq 0,95$, $\delta=3...5$)

Показники	Контроль без добавок	1,0% MDR до маси борошна
Пружність тіста, P , мм	68	62
Розтяжність тіста, L , мм	124	101
Відношення пружності до розтяжності P/L	0,55	0,61
Енергія деформації тіста (сила борошна), W , од.приладу	264	214
Індекс еластичності Ie , %	57,8	59,8
Індекс розтяжності, G	24,8	22,4

Збільшення індексу еластичності тіста на 3,5% у разі внесення 1,0% MDR до маси борошна порівняно з контролем вказує на покращання здатності тіста відновлюватися після здуття кульки, а отже, еластичність тіста краща, що дає змогу йому утримувати більше вуглекислого газу. Також спостерігається послаблення сили борошна, тобто зменшення енергії деформації тіста: цей показник знаходиться в межах середнього.

Інтенсивність бродіння тіста можна оцінити за показником підйімальної сили, тобто здатністю тіста накопичувати й утримувати вуглекислий газ. Умовно — це проміжок часу в хвиликах з моменту опускання у воду кульки тіста, замішаного з напівфабрикату, до моменту її підйому. Отримані результати досліджень наведено на рис. 3.

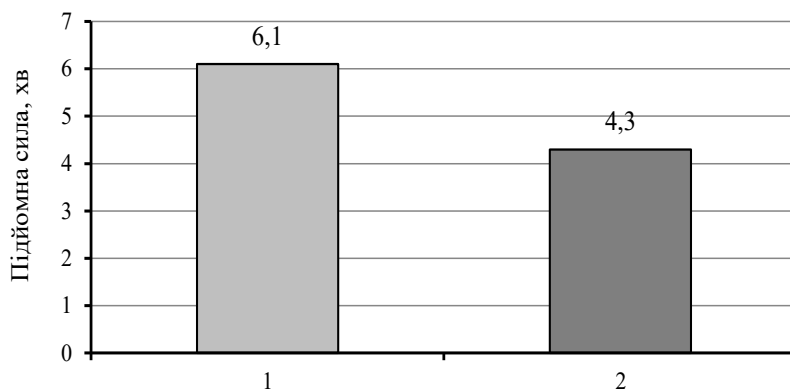


Рис. 3. Підймальна сила тіста: 1 — контроль без добавок; 2 — з 1,0% MDR до маси борошна

Аналіз рис. 3 показує, що підймальна сила тіста з 1,0% MDR до маси борошна менша на 29,5%, що підтверджує інтенсифікацію процесу бродіння.

У результаті науково-дослідної роботи розроблено рецептуру тостового хліба «ШокоТост». Подальші дослідження стосувалися визначення споживчих показників тостового хліба «ШокоТост».

Колір виробів відіграє важливу роль у виборі споживачами саме цього виробу. Тому урізноманітнення асортименту за кольорним показником є одним із засобів у боротьбі за конкурентоспроможність готової продукції.

За результатами органолептичної оцінки, використання MDR змінює колір як скоринки, так і м'якушки виробів. Доцільно було дослідити різницю в кольорі виробів у разі використання MDR порівняно з контрольним виробом за допомогою цифрового колориметра LS173, де визначався вплив на такі параметри, як L^* (яскравість $L^* = 0$ і $L^* = 100$ прийнято як чорний і білий відповідно), a^* (психометричний тон — від зеленого (–) до червоного (+) в діапазоні 120...120), b^* (психометрична кольоровість — від синього (–) до жовтого (+) в діапазоні 120...120) та розраховувалася зміна кольору відносно контрольного зразка ΔE^* (Mandiuk, Lohinova, Arsenieva, Petrussha, & Polishchuk, 2024). Результати досліджень наведено в табл. 6.

Таблиця 6. Характеристики зразків тостового хліба в кольорових моделях RGB ($n=3$, $p \geq 0,95$, $\delta=3...5\%$)

Зразки хлібобулочних виробів	Колірні характеристики			
	L_0^*	a_0^*	b_0^*	ΔE_0^*
Скоринка				
тостовий хліб	44,7	16,99	25,66	
тостовий хліб «ШокоТост»	35,0	14,4	15,5	14,2
М'якушка				
тостовий хліб	70,0	-0,26	10,1	
тостовий хліб «ШокоТост»	61,8	0,4	9,2	8,2

З табл. 6 видно, що колір скоринки тостового хліба «ШокоТост» значно темніший за контрольний зразок. Різниця зміни кольору відносно контрольного зразка становить 14,2, значення яскравості скоринки L^* на 20% менше, що вказує на важкість зорового сприйняття (тобто характеристика темних кольорів). Що стосується м'якушки, то спостерігається таж сама тенденція.

Значення психометричного тону a^* скоринки підтвердило, що обидва вироби мають червоний відтінок. Значення a^* м'якушки знаходиться майже біля нуля, а отже, м'якушка характеризується сіруватим забарвленням. Значення психометричної кольоровості b^* скоринки та м'якушки показало, що за використання MDR інтенсивність кольоровості зменшується за рахунок зменшення жовтих пігментів і збільшення синіх.

Основною із споживчих характеристик є свіжість виробів, тому доцільно встановити вплив використання MDR на свіжість готових виробів. У процесі зберігання хлібобулочних виробів погіршуються передусім органолептичні показники якості, вироби стають твердішими або крихкуватими, зменшується еластичність, втрачаються смак і аромат.

Зміна властивостей хлібобулочних виробів під час зберігання пов'язана, поперше, з втратою вологи і, по-друге, зі змінами стану крохмалю: зерна крохмалю

переходять з аморфного стану в кристалічний, тобто проходить так звана ретроградація крохмалю, пов'язана з агрегацією молекул амілопектину та амілози; по-третє, проходить старіння денатурованої у процесі теплової обробки (випікання) клейковини, яка віддає вологу і, як наслідок, знижується її гідратаційна здатність, що призводить до ущільнення структури м'якушки.

Відомо, що в багатокомпонентних харчових продуктах відбувається внутрішня міграція вологи, рушійною силою якої є градієнт відносної вологості між різними частинами продукту. Контраст між м'якушкою і хрусткою скоринкою — це результат процесу випікання, коли поверхня піддається впливу більш високих температур, ніж м'якушка, в результаті чого створюється градієнт відносної вологості, який і обумовлює перерозподіл вологи в продукті. Це є причиною пом'якшення скоринки і черствіння м'якушки та утворення товстого підскоринкового шару, тому доцільно було дослідити вплив використання MDR на площу утворення підскоринкового шару. Результати досліджень свідчать (рис. 4), що у процесі зберігання за використання MDR підскоринковий шар через 72 год зберігання менший порівняно з підскоринковим шаром контрольного виробу, а маса підскоринкового шару контролю після 72 год зберігання вдвічі більша за масу досліджуваного виробу.

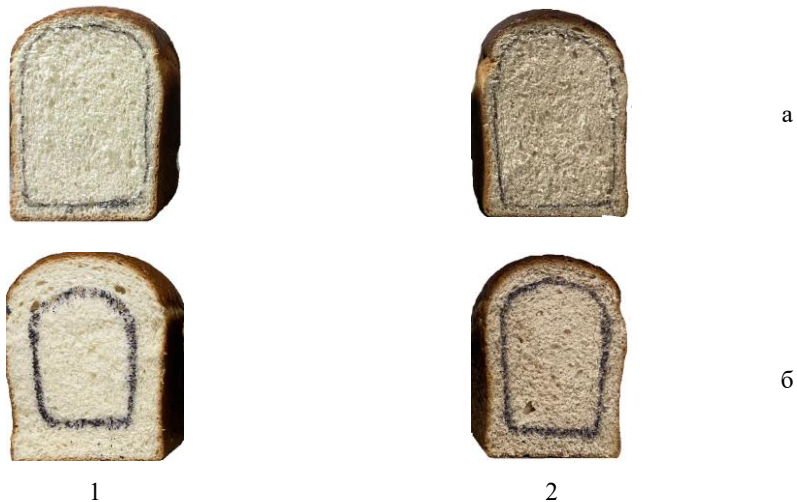


Рис. 4. Утворення підскоринкового шару: 1 — контроль без добавок; 2 — з 1,0% MDR до маси борошна; а — після 4 год випікання; б — після 72 год зберігання

Оскільки під час першого етапу досліджень встановлено, що в процесі зберігання м'якушка виробів стає твердіша, а не інтенсивно кришиться, було обрано визначення набухання, тобто гідрофільності м'якушки. Зменшення гідрофільності м'якушки впливає на зниження здатності її до набухання і поглинання води, а також здатності колоїдів та інших речовин м'якушки мігрувати у водний розчин. Отримані результати досліджень наведено на рис. 5.

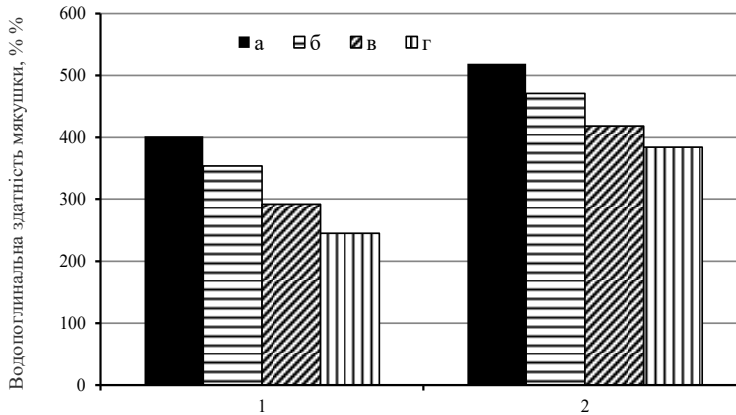


Рис. 5. Водопоглинальна здатність м'якушки готових виробів під час зберігання, %:
1 — контроль без добавок; 2 — з 1,0% MDR до маси борошна; а — через 4 год; б — через 24 год; в — через 48 год; г — через 72 год

Встановлено (рис. 5), що набухання м'якушки виробів зменшується зі збільшенням тривалості їх зберігання. При зберіганні контролю це зменшення є найбільш суттєвим. Зв'язування води м'якушкою виробів, що випікалися з MDR, також зменшується в процесі зберігання. Це зменшення за три доби зберігання складало 25% порівняно з контролем (38%), що свідчить про уповільнення старіння гідроколоїдів виробів. Пояснюється це тим, що в складі MDR наявні декстрини, які більше утримують вологу і не піддаються ретроградації під час зберігання.

Подальші дослідження стосувалися розрахунку хімічного складу розробленого виробу та порівняння з прототипом.

У розрахунках використовували добову норму вживання хліба — 277 г, передбачену «споживчим кошником», затвердженим Кабінетом Міністрів України, та норми фізіологічних потреб населення в основних харчових речовинах та енергії (наказ МОЗ України про затвердження норм фізіологічних потреб населення України в основних харчових речовинах та енергії, 1999). Розрахунки хімічного складу наведено в табл. 7.

Таблиця 7. Хімічний склад 100 г тостового хліба

Харчові речовини	Тостовий хліб за американою рецептурою	Тостовий хліб «ШокоТост»	Зміна відносно рівня контролю, %
Білки, г	8,47	9,69	+0,5
Жири, г	1,04	2,33	—
Вуглеводи, г	53,14	53,14	+1,1
Мінеральні речовини, г	0,38	0,59	—
Харчові волокна, г	2,65	2,65	+4,6
Енергетична цінність, ккал	255,87	272,37	+0,9

Розрахунок хімічного складу тостового хліба, наведений у табл. 6, свідчить про зміну поживної та енергетичної цінності виробів при використанні в рецептурі

тостового хліба «ШокоТост» MDR порівняно з контрольним зразком тостового хліба за американською рецептурою.

Вміст білків у тостовому хлібі «ШокоТост» становить 9,69 г на 100 г продукту, що перевищує аналогічний показник контрольного зразка (8,47 г). Збільшення білкової складової зумовлене введенням солодових інгредієнтів, які містять азотомісні сполуки та амінокислоти, що підвищує загальну поживну цінність виробів і сприяє формуванню більш насиченого смаку.

Вміст жирів у дослідному зразку «ШокоТост» є вищим порівняно з контролем (2,33 г проти 1,04 г), що пояснюється особливостями рецептурного складу та використанням компонентів солодового походження. Зростання частки жирів зумовлює підвищення калорійності виробів і позитивно впливає на смакові властивості та відчуття м'якості м'якушки.

Кількість вуглеводів в обох зразках залишається практично незмінною і становить 53,14 г на 100 г продукту, що вказує на збереження базової вуглеводної структури тостового хліба. Незначне відхилення відносно контролю свідчить про те, що введення інгредієнтів у рецептуру «ШокоТост» не призводить до істотних змін вмісту доступних вуглеводів.

Вміст мінеральних речовин у тостовому хлібі «ШокоТост» зростає з 0,38 до 0,59 г, що є непрямим показником підвищення мінеральної цінності продукту. Це може бути пов'язано з наявністю у складі солодових компонентів мінеральних речовин, характерних для продуктів переробки зерна.

Вміст харчових волокон у дослідному та контрольному зразках залишається на рівні 2,65 г, однак відносна зміна показника свідчить про позитивну тенденцію до збагачення раціону харчовими волокнами. Це має важливе фізіологічне значення, оскільки харчові волокна сприяють нормалізації процесів травлення та підвищують функціональну цінність хлібобулочних виробів.

Енергетична цінність тостового хліба «ШокоТост» становить 272,37 ккал, що перевищує показник контрольного зразка (255,87 ккал). Підвищення калорійності обумовлене зростанням вмісту білків і жирів та свідчить про формування більш поживного продукту, орієнтованого на споживачів, які надають перевагу насиченому смаку та підвищеній енергетичній цінності.

Таким чином, результати розрахунку хімічного складу підтверджують, що використання рецептури «ШокоТост» дозволяє підвищити поживну й енергетичну цінність тостового хліба без істотного збільшення вмісту вуглеводів, що є технологічним і нутріціологічно доцільним.

Висновки

У результаті аналізу літературних джерел і проведення експериментальних досліджень розроблено рецептуру тостового хліба «ШокоТост» з привабливими смаковими властивостями.

1. Встановлено, що використання MDR збагатить хлібобулочні вироби харчовими волокнами, власними цукрами та білками, що позитивно вплине також на смак і аромат. MDR за розчинністю мають високі показники, а отже, в тістовій системі вони краще розподіляються по всьому об'єму тіста.

2. Встановлено, що у разі використання MDR збільшується питомий об'єм виробів, а колір, смак і запах сприяють більшому бажанню скуштувати виріб. Встановлено, що інгредієнт MDR позитивно вплинув на подовження свіжості виробів за рахунок наявності в складі декстринів, які збільшують вологоутримувальну здатність і не піддаються ретроградації під час зберігання.

3. Доведено, що оптимальним є дозування в рецептуру тостового хліба 1,0% MDR до маси борошна. Збільшення індексу еластичності тіста на 3,5% у разі внесення 1,0% MDR до маси борошна порівняно з контролем вказує на покращання здатності тіста відновлюватися після здуття бульбашки, а отже, еластичність тіста краща, що дає йому змогу утримувати більше вуглекислого газу.

4. Встановлено, що колір скоринки тостового хліба «ШокоТост» значно темніший за контрольний зразок; різниця зміни кольору відносно контрольного зразка становить 14,2, значення яскравості скоринки L^* на 20% менше, що вказує на важкість зорового сприйняття кольорів хліба.

Література

Дробот, В. І. (2023). Хліб в умовах сьогодення: матеріали міжнародних науково-практичних конференцій «Інноваційні технології у хлібопекарському виробництві» і «Здобутки та перспективи розвитку кондитерської галузі». К.: НУХТ.

Дробот, В. І. (2015). *Технохімічний контроль сировини та хлібобулочних і макаронних виробів*. Київ: Кондор-Видавництво.

Лебеденко, Т. Є., Пшенишнюк, Г. Ф., Соколова, Н. Ю. (2014). *Технологія хлібопекарського виробництва. Практикум*: навч. пос. Одеса: Освіта України.

Abedin, J., Tajria, J., Abdullah, A. T. M., Hassan, M. T., Farzana, T. (2025). Enhancing nutritional and antioxidant properties of wheat bread: The role of foxtail millet and ripe banana pulp. *Food Chemistry Advances*, 6, 100932. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.100932>.

Birch, A. N., Petersen, M. A., Hansen, Å. S. (2013). The aroma profile of wheat bread crumb influenced by yeast concentration and fermentation temperature, *LWT — Food Science and Technology*, 50(2), 480—488. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.08.019>.

Dessev, T., Lalanne, V., Keramat, J., Jury, V., Prost, C., Le-Bail, A. (2020). Influence of Baking Conditions on Bread Characteristics and Acrylamide Concentration. *Journal of Food Science and Nutrition Research*, 3, 291—310. <https://doi.org/10.26502/jfsnr.2642-11000056>.

Galenko, O., Shevchenko, A., Ceccanti, C., Mignani, C., & Litvynchuk, S. (2024). Transformative shifts in dough and bread structure with pumpkin seed protein concentrate enrichment. *European Food Research and Technology*, 250, 1177—1188. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04454-z>.

Haghighat, M. L., Honarvar, M., Mooraki, N. (2023). Investigating the possibility of producing bread enriched with activated carbon and brown sugar and its physical, chemical and sensory properties. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 33, 100733. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100733>.

Hetman, I., Mykhonik, L., Kuzmin, O., & Shevchenko, A. (2021). Influence of spontaneous fermentation leavens from cereal flour on the indicators of the technological process of making wheat bread. *Ukrainian Food Journal*, 10(3), 492—506. <http://dx.doi.org/10.24263/2304-974X-2021-10-3-6>.

Kuchisabishii. 2025. <https://timesofindia.indiatimes.com/life-style/health-fitness/health-news/kuchisabi-shii-the-japanese-word-which-has-immense-relevance-to-lockdown-life/articleshow/89404995.cms>].

Luning, P. A., Roozen, J. P., Moëst, R. A. F. J., Posthumus, M. A. (1991). Volatile composition of white bread using enzyme active soya flour as improver. *Food Chemistry*, 41(1), 81—91, [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(91\)90134-A](https://doi.org/10.1016/0308-8146(91)90134-A).

Mandiuk, O., Lohinova, A., Arsenieva, L., Petrusha, O., Polishchuk, G. (2024). Effects of protein and carbohydrate ingredients on colour of baked milk products. *Ukrainian Food Journal*, 13(1). <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2024-13-1-3>.

Muntions Maltichoc Dried Regular is a sustainable cocoa power alternative without impacting the quality of product application. (2025). <https://www.muntions.com/muntions-maltichoc-dried-regular-is-a-proving-a-sustainable-cocoa-power-alternative-without-impacting-the-quality-of-product-application/>.

Shevchenko, A., Drobot, V., Galenko, O. (2022). Use of pumpkin seed flour in preparation of bakery products. *Ukrainian Food Journal*, 11(1), 90—101. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/37689>.

Swiacka, J., Kima, L., Voß, A., Grebenteuch, S., Rohn, S., Jekle, M. (2024). Special bakery products — Acrylamide formation and bread quality are influenced by potato addition. *Journal of Cereal Science*, 117, 103926. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.103926>.

Verheyen, C., Albrecht, A., Elgeti, D., Jekle, M., & Becker, T. (2015). Impact of gas formation kinetics on dough development and bread quality. *Food Research International*, 76, 860—866. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.08.013>.

Xu, D., Gu, M., Xi, J., Chen, L., Jin, Ya., Wu, F., Xu, X., Zhao, Q. (2023). Effect of a commercial peptidase on volatile composition and sensory properties of wheat bread crumb and crust. *LWT*, 189, 115532. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115532>.

Zhu, F., Sakulnak, R., & Wang, S. (2016). Effect of black tea on antioxidant, textural, and sensory properties of Chinese steamed bread. *Food Chemistry*, 194, 1217—1223. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.110>.

УДК 664.15:543.8:664.951.2

EVALUATION OF THE QUALITY OF CREAM-WHIPPED CANDIES WITH CHIA SEEDS DURING STORAGE

O. Shydakova-Kameniuka¹, <https://orcid.org/0000-0002-8550-7817>

O. Shkliaiiev², <https://orcid.org/0000-0003-4479-508X>

O. Zagorulko¹, <https://orcid.org/0000-0003-1186-3832>

O. Cherevko¹, <https://orcid.org/0009-0008-5120-2899>

K. Kasabova¹, <https://orcid.org/0000-0001-5827-1768>

¹State Biotechnological University,

²LP "ALLCOOKIES"

Key words:

Cream-whipped candies

Chia seeds

Storage stability

Functional and

technological properties

Article history:

Received 07.11.2025

Received in revised form

20.11.2025

Accepted 16.12.2025

Corresponding author:

A. Zahorulko

E-mail:

zagorulko.andrey.nikolaeovich@gmail.com

Citation: Шидакова-Камениука О. Г., Шкляев О. М., Загорулько О. Є., Черевко О. І., Касабова К. Р. (2025). Оцінка якості кремово-збивних цукерок з насінням чіа в процесі зберігання. *Наукові праці НУХТ*, 31(6), 353—364. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-26

ABSTRACT

The effect of chia seeds on the physicochemical, structural-mechanical, and sensory quality indicators of cream-whipped candies during storage was investigated. The products were prepared according to the classical technology in two variations — using agar or pectin as the gelling agent. The preparation of the experimental samples involved the addition of pre-hydrated whole chia seeds (50% of the dry egg albumin mass) during the whipping of egg albumin, as well as the incorporation of ground chia seeds (50% of the fat mass) into the milk-fat mixture. The samples were stored in polyethylene film for 60 days ($t=18—22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}=70—75\%$).

During storage, all samples showed a gradual decrease in moisture content and an increase in firmness, caused by the "aging" processes of the candy's protein-carbohydrate system. Compared to the control, the samples with chia seeds exhibited lower moisture losses — by 32.1% and 41.1% for agar-based and pectin-based candies, respectively. They were also characterized by a slower increase in firmness. The acidity of the candies during storage was not affected by the presence of chia seeds and changed only slightly, remaining within $6.2—6.6^{\circ}\text{ T}$ for agar-based and $5.0—2.3^{\circ}\text{ T}$ for pectin-based products. The content of reducing substances remained stable, indicating the absence of undesirable biochemical reactions.

Sensory evaluation showed that the color, taste, and aroma of all samples did not change during storage. However, the texture of candies with chia seeds remained softer and more tender compared to the control samples.

The use of chia seeds contributed to the retardation of staling processes, preservation of structure, consistency, and sensory characteristics of cream-whipped candies throughout the storage period, confirming their effectiveness in improving the stability of consumer quality.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-6-26

ОЦІНКА ЯКОСТІ КРЕМОВО-ЗБИВНИХ ЦУКЕРОК З НАСІННЯМ ЧІА В ПРОЦЕСІ ЗБЕРІГАННЯ

О. Г. Шидакова-Каменюка¹, <https://orcid.org/0000-0002-8550-7817>

О. М. Шкляєв², <https://orcid.org/0000-0003-4479-508X>

О. Є. Загорулько¹, <https://orcid.org/0000-0003-1186-3832>

О. І. Черевко¹, <https://orcid.org/0009-0008-5120-2899>

К. Р. Касабова¹, <https://orcid.org/0000-0001-5827-1768>

¹Державний біотехнологічний університет,

²ТОВ «ОЛКУКІЗ»

Досліджено вплив насіння чіа на фізико-хімічні, структурно-механічні та органолептичні показники якості кремово-збивних цукерок під час зберігання. Вироби виготовляли за класичною технологією у двох варіаціях — з використанням агару або пектину як драглеутворювача. Приготування дослідних зразків передбачало внесення під час збивання яєчного альбуміну попередньо гідратованого цілого насіння чіа (50% від маси сухого альбуміну) та додавання під час отримання молочно-жирової суміші подрібненого насіння чіа (50% від маси жиру). Зразки зберігали в поліетиленовій плівці 60 діб ($t=18\ldots 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W=70\ldots 75\%$). У процесі зберігання в усіх зразках відзначалося поступове зменшення вологості та збільшення міцності, що зумовлене процесами дегідратації та зміцненням каркасу білково-вуглеводної матриці. Зразки з насінням чіа порівняно з контрольними характеризувалися меншими втратами води — на 32,1% та 41,1% для виробів на агарі та пектині відповідно. Також для них притаманне повільніше зростання показника міцності. Кислотність цукерок у процесі зберігання не залежала від наявності в їх складі насіння чіа та змінювалася незначно, залишаючись у межах 6,2—6,6° Т для виробів на агарі і 5,0—2,3° Т — для виробів на пектині. Також залишався стабільним вміст редукувальних речовин, що характеризує відсутність перебігу небажаних біохімічних реакцій. Органолептична оцінка показала, що колір, смак та аромат усіх виробів у процесі зберігання не зазнав змін, однак консистенція цукерок з чіа залишалася більш ніжною та м'якою порівняно з контрольними зразками.

Застосування насіння чіа сприяє уповільненню черствіння, збереженню структури, консистенції та смакових характеристик кремово-збивних цукерок упродовж усього терміну зберігання, що підтверджує доцільність його використання для підвищення стабільності їх споживчої якості.

Ключові слова: кремово-збивні цукерки, насіння чіа, стабільність при зберіганні, функціонально-технологічні властивості.

Постановка проблеми. Кондитерська галузь України зазнала значних змін у останні декілька років. На сьогодні українські кондитери адаптуються до нових реалій, поступово відновлюючи обсяги виробництва (Чмут, 2024). Значною мірою нарощування кондитерських потужностей відбувається за рахунок експортних поставок — експорт кондитерських виробів складає близько 25% від загального обсягу продукції, що виробляється. При цьому лідирують в експорті шоколадні

вироби, зокрема цукеркової групи (Agronews, 2024), тому вітчизняні кондитерські виробники значну увагу спрямовують на розроблення такої продукції з властивостями, які затребувані в закордонного споживача. Зокрема, останнім часом збільшується попит на солодощі, які поєднують приємні органолептичні властивості з фізіологічно-функціональними, що стимулює виробників до пошуку альтернативної біологічно-цінної сировини рослинного походження (Statista Market Insights, 2024). На особливу увагу, як перспективне джерело поліненасичених жирних кислот ω -3 та ω -6 (що містяться у оптимальному фізіологічному співвідношенні), біологічно цінних білків, розчинних і нерозчинних харчових волокон, антиоксидантів тощо, заслуговує насіння чіа (*Salvia hispanica* L.) (Vera-Cespedes, Muñoz, Rincón, & Haros, 2023; Kulczyński, Kobus-Cisowska, Taczanowski, Kmiecik, & Gramza-Michałowska, 2019). Хімічний склад і функціонально-технологічні властивості насіння чіа сприяють поширенню його застосування як фізіологічно-цінної та технологічної добавки для різних видів кондитерської продукції, в тому числі кремово-збивних цукерок.

Разом з тим введення нетрадиційної рослинної сировини до рецептури збивних цукеркових мас може впливати не лише на їх фізико-хімічні, структурно-механічні й органолептичні властивості одразу після виготовлення, а й на стабільність цих характеристик під час зберігання. Зважаючи на це, оцінка показників якості нових виробів з внесенням нетрадиційних добавок у динаміці зберігання є необхідною для визначення стабільності споживчих властивостей розробленої продукції та її відповідності за цими властивостями нормативним вимогам.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вплив нетрадиційних рослинних добавок, що вносяться до кондитерських виробів, на якість готової продукції (в тому числі і під час зберігання) значною мірою зумовлюється особливостями їх хімічного складу. Хімічний склад насіння чіа представлений групою фізіологічно-корисних сполук, які насамперед сприяють покращенню функціонування організму людини. Відомо, що насіння чіа позитивно впливає на артеріальний тиск, сприяє поліпшенню ліпідного профілю крові, здатне знижувати рівень цукру, стимулювати імунну систему тощо (Fateh, Ahmed, Najafabadi, & Moludi, 2024; Zia-ud Din та ін., 2021). У технології кондитерських виробів насіння чіа найчастіше використовується саме для їх збагачення. Однак значна кількість дослідників при цьому відмічають і певний вплив цієї добавки на фізико-хімічні та структурно-механічні властивості напівфабрикатів і готових виробів, що знаходить відображення і на органолептичному профілі продукції.

Найбільш досліджено серед кондитерської групи виробів можливість використання чіа в технології печива. Так, у праці (Михальська та ін., 2020) обґрунтовано використання для покращення нутрієнтного складу здобного печива 20% цілого насіння чіа. У дослідженні (Azzam та ін., 2025) рекомендовано внесення до печива подрібненого до порошкоподібного стану білого або чорного насіння чіа в кількості 15% від маси борошна. Всі зразки характеризуються покращеним нутрієнтним складом, але внесення порошку з чорного насіння чіа забезпечує суттєвіше збагачення мінеральними речовинами. Відмічено, що візуально зразки печива з чіа порівняно з контрольними набувають більшої щільності та міцності. Автори пояснюють це високими водозв'язувальними властивостями добавок.

У (Hassan, Elgharably, Ashoush, Abd-El-Khalek, & Salem, 2023) рекомендований вміст подрібненого до порошкоподібного стану насіння чіа в технології печива становив 7% від маси борошна. Дослідження впливу добавки на властивості тіста показало підвищення еластичності тіста та зменшення показника його розтяжності. Обмеження дозування порошку чіа в кількості 7% автори обґрунтовують погіршенням органолептичних властивостей, пов'язаних зі зміною кольору та текстури виробів.

У (Sarkar, Miah, Masum, Amin, & Alam, 2025) вивчено можливості використання в технології печива шроту з насіння чіа, який є побічним продуктом отримання олії, та порошку сухих квітів чіа, які відносяться до відходів, що залишаються після збирання врожаю. Найкращі сенсорні показники були притаманні печиву зі внесенням 15% шроту насіння чіа та 15% порошку сухих квітів чіа. Такі вироби характеризуються покращеним ароматом, більш складним приємним смаком і поліпшеними текстурними властивостями. Печиво з цими добавками містить більше вологи внаслідок зменшення втрат під час випікання, що також пояснюється високою гідрофільністю чіа. Також у цих виробках менша активність води та містяться поліфенольні сполуки, що покращує мікробіологічну стабільність продукції під час зберігання. Відзначено, що присутність поліфенолів надає печиву антиоксидантних властивостей і гальмує перебіг окиснювальних процесів в його жировій складовій у процесі зберігання.

Хороші сенсорні властивості має печиво з використанням суміші борошна насіння чіа та цілого насіння чіа (1:1) із заміною до 30% пшеничного борошна (Brandão, Dutra, Gaspardi, & Campos, 2019). Після 40 діб зберігання таке печиво порівняно з контрольним зразком мало більшу вологість, меншу обсіменінність мікроорганізмами та кращу сенсорну сприйнятливність.

У праці (Goyat, Passi, Suri, & Dutta, 2018) доведено доцільність застосування під час виготовлення печива суміші подрібнених до порошкоподібного стану насіння чіа та кіноа (1:1) в кількості до 15% від маси пшеничного борошна. Таке печиво краще зберігало форму в процесі випікання, мало дещо більшу твердість, більшу ніж у контролі вологість, вищу антиоксидантну активність, що корелює з дослідженнями інших авторів, які вивчали подібні системи. Дослідники також відмічають позитивний вплив суміші на збереженість смакових характеристик і стабільність жирової складової печива та його підвищену мікробіологічну стійкість у процесі зберігання.

Крім технології печива, насіння чіа та продукти його переробки рекомендуються також до використання у складі кексів і мафінів. Зокрема, авторами (Aranibar, Aguirre, & Borneo, 2019) рекомендовано додавати до мафінів 5% шроту насіння чіа. Такий вміст добавки забезпечував покращення нутрієнтного складу виробів, формування приємних смакових характеристик, підвищення антиоксидантних властивостей та уповільнення черствіння продукції в процесі зберігання. Так, у (Sharma, Mogra, & Mordia, 2020) підтверджено можливість використання під час виготовлення мафінів до 20% цілого насіння чіа без погіршення їх сенсорних властивостей. Для інтенсифікації технології у виробничих умовах дослідники пропонують готувати суміш пшеничного борошна з насінням чіа (тривалість зберігання такої суміші становить 3 міс.), а потім використовувати зазначену суміш під час виготовлення мафінів.

Ціле насіння чіа також пропонується до введення в технологію безглютенових кексів на основі гречаного та рисового борошна (Мацук, Колпікова, & Іщенко, 2019). За дозування добавки 10% вироби мають кращу пористість, приємні смакові характеристики (з горіховим присмаком) та вищу вологість.

У праці (Felisberto та ін., 2015) рекомендовано використовувати в технології тортів гель слизу насіння чіа для заміни 25% рецептурного жиру, що дозволяє отримати вироби зниженої енергоємності без втрати споживчих властивостей. Дослідження (Moreira, Sanches, Strieder, Rostagno, & Capitani, 2023) пропонує технологію брауні з повною заміною гелем насіння чіа яєчної сировини, що робить таку продукцію придатною для вегетаріанських харчових раціонів.

Отже, можна зробити висновки, що використання насіння чіа в технології борошняних кондитерських виробів вивчене досить широко. При цьому дослідники відзначають, поруч з покращенням нутрієнтного профілю, певний вплив цієї добавки на властивості напівфабрикатів і готової продукції. Зокрема, відзначається позитивний ефект внесення чіа на стабільність характеристик виробів у процесі зберігання: пригнічення розвитку мікроорганізмів, гальмування окиснення жирів, уповільнення черствіння тощо. Однак технологія борошняних кондитерських виробів передбачає стадію їх випікання. При цьому високі температури спричиняють зниження біологічної цінності насіння та можуть викликати утворення токсичних продуктів розпаду (наприклад, акріламід) (Mesías, Gómez, Olombrada, & Morales, 2023).

Тому доцільним є внесення насіння чіа до тих кондитерських систем, де це можна зробити за щадних температурних режимів. Так, у попередніх дослідженнях обґрунтована можливість використання насіння чіа під час виготовлення кремovo-збивних цукерок типу «Пташине молоко» (Shydakova-Kamenuka та ін., 2020; Shydakova-Kamenuka та ін., 2024). Розроблена технологія передбачала використання цілого та подрібненого насіння чіа. З огляду на виявлені піностабілізуючі властивості цілого насіння його вносили під час приготування напівфабрикату «збита білкова маса» (дозування — 50% від маси сухого альбуміну). Подрібнене насіння показало хороші жиротримувальні та емульгувальні властивості, тому рекомендоване його внесення на стадії приготування напівфабрикату «молочно-жирова суміш» (дозування — 50% від маси жиру). Такі виробы характеризуються хорошими структурно-механічними властивостями та покращеним нутрієнтним профілем. Також проведено низку досліджень з оцінювання стабільності мікробіологічних показників якості (Шидакова-Каменюка, Шкляєв, & Рогова, 2019) та ступеня окиснення жирів (Shydakova-Kamenuka та ін., 2020) таких цукерок у процесі зберігання, які підтвердили ефективність внесення добавки.

Невирішеним залишається питання щодо оцінювання змін фізико-хімічних та структурно-механічних властивостей кремovo-збивних цукерок з насінням чіа в процесі зберігання.

Мета дослідження: визначення фізико-хімічних, структурно-механічних та органолептичних показників якості кремovo-збивних цукерок у процесі зберігання.

Матеріали і методи. Об'єктом досліджень була технологія кремovo-збивних цукерок з додаванням цілого та подрібненого насіння чіа. За контроль обрано кремovo-збивні цукерки «Пташине молоко класичне» у двох варіаціях — з викори-

станням як драглеутворювача агару або пектину. Технологія виготовлення цукерок передбачала такі операції: гідратацію сухого яєчного альбуміну (за гідромодуля 1:7 впродовж 10 хв) та його збивання впродовж 15...20 хв; приготування клейового сиропу (з цукру, патоки та драглеутворювача) з вмістом СР 78...80%; заварювання збитої білкової маси охолодженим до температури 63...67 °С клейовим сиропом; приготування молочно-жирової суміші шляхом збивання пластифікованого маргарину зі згущеним молоком; перемішування молочно-жирової суміші із завареною збитою білковою масою з одночасним введенням лимонної кислоти та ваніліну; формування отриманої маси розмазуванням в пласт товщиною 18...20 мм; структуроутворення маси впродовж 60...90 хв за температури 18...21 °С; розрізання на корпуси; глазурування шоколадною глазур'ю та зберігання. Сировина, використана в дослідженнях, відповідала вимогам чинної нормативної документації.

Приготування зразків з додаванням насіння чіа передбачало внесення під час збивання яєчного альбуміну попередньо гідратованого (за гідромодуля 1:7 впродовж 10 хв) цілого насіння чіа в кількості 50% від маси сухого яєчного альбуміну. Також під час приготування молочно-жирової суміші передбачено додавання подрібненого насіння чіа в кількості 50% від маси жиру (Shydakova-Kamieniuka та ін., 2024).

Дослідженню підлягали такі зразки кремово-збивних цукерок:

- на агарі без добавки;
- на агарі з насінням чіа;
- на пектині без добавки;
- на пектині з насінням чіа.

Приготовані зразки упаковували в поліетиленову плівку та зберігали за температури 18...22 °С та відносної вологості 70...75% впродовж 60 діб (термін зберігання обрано відповідно до ДСТУ 4135:2021. Цукерки. Загальні технічні умови) з відбиранням проб для аналізу через кожні 10 діб.

У процесі зберігання в досліджуваних зразках аналізували фізико-хімічні показники (вологість, кислотність і вміст редукувальних речовин), структурно-механічні (міцність) та органолептичні властивості.

Відбір проб для досліджень здійснювали за ДСТУ 4619. Перед визначенням фізико-хімічних і структурно-механічних властивостей зразки цукерок звільняли від покриття.

Вміст вологи оцінювали методом прискореного висушування за ДСТУ 4910; вміст редукувальних речовин — гексаціанофератним методом за ДСТУ 5059; титровану кислотність — за ДСТУ 5024; міцність — на приладі Валента за руйнуючим навантаженням (у г).

Статистичну обробку результатів експериментів здійснювали для серії паралельних вимірів ($n=4-5$, $p<0,05$).

Органолептичну оцінку визначали за ДСТУ 4683. Під час проведення органолептичного аналізу групою експертів (у кількості 8 осіб) оцінювалися за 5-бальною шкалою одиничні органолептичні показники якості цукерок (зовнішній вигляд, колір, структура, смак і запах), після чого здійснювався розрахунок середньоарифметичних значень за кожним показником.

Викладення основних результатів дослідження. Під час зберігання кремово-збивних цукерок відбуваються складні фізико-хімічні процеси, пов'язані насамперед з поступовою втратою вологи. На початковій стадії цей процес супроводжується втратою капілярної вологи поверхневим шаром корпусів цукерок. Поступово, в міру висихання зовнішніх шарів, активізується процес внутрішньої дифузії рідкої фази — водного розчину цукрів, патоки, кислоти, водорозчинних білків та інших гідрофільних компонентів, із центральної частини корпусу до його поверхні. Цей процес супроводжується збільшенням кількості вільної води, що вивільняється внаслідок характерного для драглів на агарі та пектині явища синерезису. Як наслідок, волога разом з розчиненими молекулами сахарози мігрує до периферійних шарів, де відбувається часткова кристалізація цукру з утворенням цукрової скоринки. Накопичення вологи у проміжку між корпусом і глазур'ю спричиняє послаблення адгезійного контакту між корпусом і покриттям. Ці явища призводять до часткового відшарування глазури, утворення мікротріщин на її поверхні та подальшого обсіпання.

Результати дослідження динаміки зміни вологості кремово-збивних цукерок свідчать, що введення насіння чіа сприяє суттєвому уповільненню втрати вологи під час зберігання виробів (рис. 1).

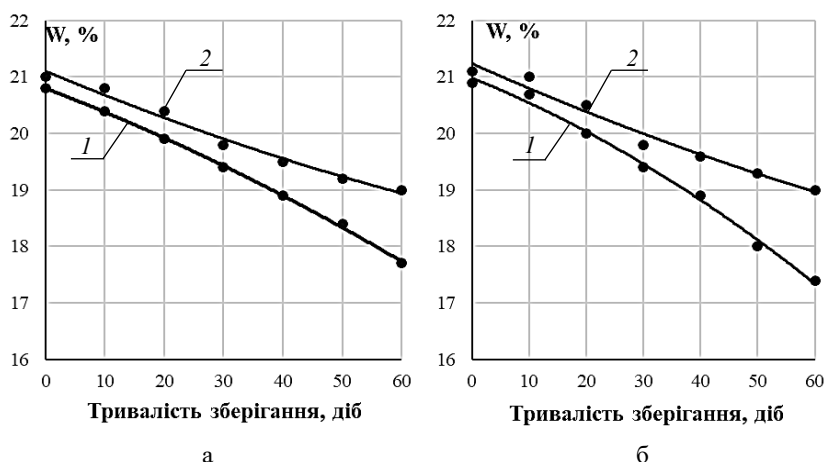


Рис. 1. Зміна вологості (W) кремово-збивних цукерок на агарі (а) та на пектині (б) під час зберігання: 1 — без добавки; 2 — з насінням чіа

Встановлено, що вже на 30-у добу експерименту втрати води в контрольних зразках залежно від типу драглеутворювача становили 6,7 та 7,2%, тоді як через 60 діб цей показник зростав до 14,9 та 16,8% відповідно. У зразках із додаванням насіння чіа втрати були помітно нижчими — 5,7 та 6,2% на 30-у добу та лише 9,5 та 9,9 на 60-у добу зберігання для виробів на агарі та пектині відповідно. Таким чином, порівняно з контрольними зразками, вироби з чіа на агарі та пектині через 2 місяці зберігання втрачали вологи менше на 32,1 та 41,1%. Отримані результати пояснюються особливостями хімічного складу насіння, зокрема присутністю в ньому значної кількості гідрофільних полісахаридів, які мають здатність до утворення в'язких гелів при контакті з водою. Технологія виготовлення цукерок передбачала внесення подрібненого насіння чіа без попередньої гідратації, тому під час

подальшого зберігання воно активно зв'язує частину вологи, що вивільняється з драглевій системи внаслідок синерезису. Це сприяє стабілізації внутрішньої структури корпусів, перешкоджає міграції води до поверхневого шару та знижує інтенсивність випаровування. Крім того, полісахаридний комплекс насіння чіа виконує роль природного загущувача, що підвищує в'язкість внутрішньої рідкої фази і зменшує швидкість дифузії води. Це забезпечує більш тривале збереження м'якої консистенції виробів, зменшує ризик утворення кристалічної скоринки на поверхні корпусів та сприяє підвищенню загальної стабільності структури кремово-збивних цукерок протягом усього терміну зберігання.

Уповільнення черствіння кремово-збивних цукерок у присутності насіння чіа також підтверджуються дослідженнями показника їх міцності. Встановлено, що для всіх досліджуваних зразків притаманне підвищення показника міцності з часом (рис. 2).

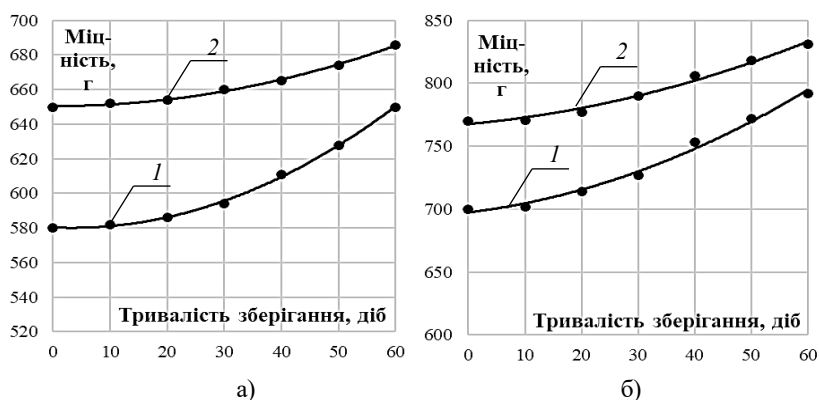


Рис. 2. Зміна міцності кремово-збивних цукерок на агарі (а) та на пектині (б) під час зберігання: 1 — без добавки; 2 — з насінням чіа

Отримані результати можна пояснити дією кількох взаємопов'язаних факторів. Насамперед, у процесі зберігання відбувається поступове ущільнення структури пінної маси, що пов'язане з міграцією вологи з тонких плівок, які оточують повітряні бульбашки. Це призводить до посилення міжмолекулярних контактів і підвищення загальної стабільності просторового каркасу. Додатково, в міру висихання зразків, зменшується товщина рідкого шару дисперсійного середовища між молекулами драглеутворювача, внаслідок чого зростають сили когезії, що сприяє ущільненню та зміцненню структури драгля. Одночасно з цим спостерігається часткове вивільнення вологи в міжмолекулярний простір, зумовлене процесами синерезису характерними для колоїдних систем на основі агару та пектину. У зразках кремово-збивних цукерок, до складу яких було введено насіння чіа, інтенсивність цих змін є значно нижчою. Насіння чіа утримує частину вологи, запобігаючи надмірному ущільненню гелевої матриці. Це забезпечує повільніше зростання міцності виробів з добавкою у процесі зберігання. Так, у контрольних зразках цукерок на агарі та пектині наприкінці досліджуваного терміну зберігання показник міцності збільшується на 12,1% та 13,1%, тоді як для зразків з чіа цей показник зростає, відповідно, на 5,5% та 7,9%. Таким чином, динаміка зміни міцності досліджуваних зразків у процесі зберігання корелює з результатами оцінювання змін їх

вологості.

Отримані дані узгоджуються з результатами досліджень інших науковців, які відмічали гальмуючий вплив насіння чіа на процеси черствіння борошняних кондитерських виробів, обґрунтовуючи це відомими високими гідрофільними властивостями цієї добавки (Sarkar, Miah, Masum, Amin, & Alam, 2025; 8. Brandão, Dutra, Gaspardi, & Campos, 2019).

Важливими показниками якості кремово-збивних цукерок є їх кислотність і вміст редукувальних речовин. Підвищення кислотності виробів у процесі зберігання може свідчити про перебіг мікробіологічних процесів, а надмірне нарощування редукувальних речовин може спричиняти зміну смаку та кольору продукції внаслідок інтенсифікації процесів неензиматичного потемніння. Результати досліджень показали, що за внесення насіння чіа до кремово-збивних цукерок показники їх титрованої кислотності та вмісту редукувальних речовин у процесі зберігання практично не змінюються (табл. 1).

Таблиця 1. Вміст редукувальних речовин і титрована кислотність досліджуваних зразків під час зберігання ($n=5$, $\sigma=3,5\ldots4,0\%$)

Зразок цукерок		Вміст редукувальних речовин, %		Титрована кислотність, °Т	
		0 діб	60 діб	0 діб	60 діб
На основі агару	контроль	13,0	13,6	6,2	6,5
	з чіа	13,0	13,6	6,2	6,6
На основі пектину	контроль	14,4	14,8	5,0	5,3
	з чіа	14,5	14,9	5,0	5,3

Проведення органолептичної оцінки також показало, що в процесі зберігання досліджувані зразки цукерок зберігали приємний вершково-ванільний смак та аромат, в цукерках з насінням чіа він мав легкий горіховий відтінок. Колір виробів не змінювався. Незначно погіршувалася лише їх консистенція внаслідок незначного ущільнення структури, яке є більш вираженим для виробів без внесення насіння чіа. Відмічено, що контрольні зразки на агарі та пектині не відрізнялися між собою за органолептичною оцінкою ні одразу після виготовлення, ні через 60 діб зберігання. Зразки цукерок на різних драглеутворювачах з додаванням насіння чіа також мали однакову органолептичну оцінку (рис. 3).

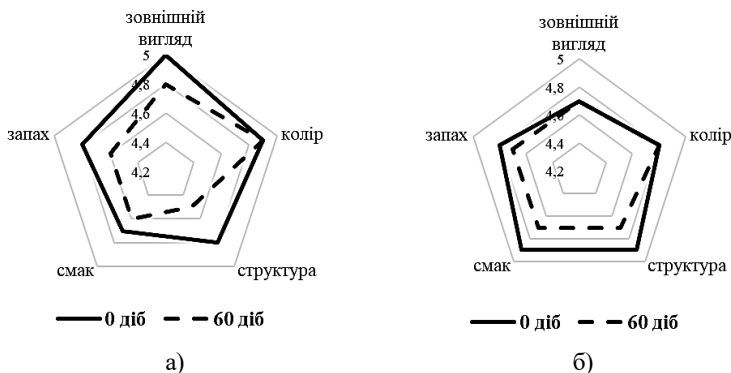


Рис. 3. Профілограми органолептичних властивостей кремово-збивних цукерок за зберігання: а) контроль; б) з насінням чіа

Отже, під час зберігання впродовж 60 діб (нормативний термін зберігання) кремowo-збивні цукерки з насінням чіа за показниками міцності, вологості та органолептичними характеристиками перевершують контрольні зразки. На перспективу це може бути однією з підстав для пролонгації тривалості зберігання таких виробів.

Подальший розвиток досліджень передбачає оцінювання можливості використання насіння чіа в технології інших збивних кондитерських мас, зокрема пастильних виробів і лукуму.

Висновки

Дослідження підтвердило доцільність використання насіння чіа (*Salvia hispanica* L.) в технології кремowo-збивних цукерок на різних драглеутворювачах як функціональної рослинної добавки, що позитивно впливає на збереження їх якості під час зберігання. Встановлено, що порівняно з контролем через 60 діб зберігання цукерки з чіа на агарі та пектині втрачали вологи менше на 32,1% та 41,1% та характеризувалися повільнішим зростанням показника міцності, що свідчить про гальмування процесів черствіння. Як наслідок, кремowo-збивні цукерки з використанням насіння чіа зберігали більш м'яку консистенцію, порівняно з контрольними зразками. Крім того, стабільними залишалися показники кислотності та вмісту редукувальних речовин як у контрольних зразках, так і у виробках з добавкою, що може свідчити про відсутність небажаних біохімічних реакцій. Органолептична оцінка не виявила негативного впливу насіння чіа на смак, аромат і колір, а консистенція виробів залишалася більш ніжною порівняно з контрольними зразками.

Отже, насіння чіа може бути рекомендовано як натуральний функціонально-технологічний інгредієнт у виробництві кремowo-збивних цукерок, що забезпечує стабільність якості, покращує споживчі властивості та потенційно дозволяє подовжити їх термін придатності до споживання.

Література

Мацук, Ю. А., Колпікова, Є. О., & Іщенко, Н. В. (2019). Обґрунтування технології безглютенових кексів із додаванням насіння чіа. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі*, 1(91), 8—14. <http://doi.org/10.37734/2518-7171-2019-1-1>.

Михальська, Л., Дуборезов, О., Шкраба, О., Попович, В., Маркус, Я., Павлова, В., Дорохович В. (2020). Застосування насіння чіа для покращення нутрієнтного складу здобного печива. Взято з <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/b53b8bd4-122d-4164-8c8e-a51cc6d64098/content>.

Чмут, А. В. (2024). Аналіз розвитку підприємств кондитерської галузі України в умовах військового стану. *Вісник Херсонського державного університету. Серія Економічні науки*, 51, 45—50. <https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2024-51-6>.

Шидакова-Каменюка, О. Г., Шкляєв, О. М., & Рогова, А. Л. (2019). Мікробіологічна безпека кремowo-збивних цукерок з насінням чіа. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 25(3), 234—242. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2019-25-3-27>.

Agronews. (2024, September 5). *Україна відновлює експорт шоколадних виробів*. Agronews.ua. Взято з <https://agronews.ua/news/ukrayina-vidnovlyuye-eksport-shokoladnyh-vyrobiv/>.

Aranibar, C., Aguirre, A., & Borneo, R. (2019). Utilization of a by-product of chia oil extraction as a potential source for value addition in wheat muffins. *Journal of Food Sci Technol*, 56, 4189—4197. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03889-1>.

- Azzam, C. R., Mostafa, S. M., Rizk, M. S., Arafa, R. A., Salem, E. A., & Hussein, A. M. S. (2025). Comparative analysis of nutritional, rheological, and sensory attributes of biscuits enriched with white and black chia seed powders: Evaluation under Egyptian cultivation conditions. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 106, 104252. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104252>.
- Brandão, N. A., Dutra, M. B. L., Gaspardi, A. L. A., & Campos, M. R. S. (2019). Chia (*Salvia hispanica* L.) cookies: physicochemical/microbiological attributes, nutrimental value and sensory analysis. *Food Measure*, 13, 1100—1110. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-00025-z>.
- Fateh, H. L., Ahmed, D. H., Najafabadi, M. S., & Moludi, J. (2024). The impact of chia seeds on diabetes, blood pressure, lipid profile, and obesity indicators: Systematic review and meta-regression analysis of 14 randomized controlled trials. *Prostaglandins & Other Lipid Mediators*, 175, 106907. <https://doi.org/10.1016/j.prostaglandins.2024.106907>.
- Felisberto, M. H. F., Wahanik, A. L., Gomes-Ruffi, C. R., Clerici, M. T. P. S., Chang, Y. K., & Steel, C. J. (2015). Use of chia (*Salvia hispanica* L.) mucilage gel to reduce fat in pound cakes. *LWT — Food Science and Technology*, 63(2), 1049—1055. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.114>.
- Goyat, J., Passi, S. J., Suri, S., & Dutta, H. (2018). Development of Chia (*Salvia Hispanica*, L.) and Quinoa (*Chenopodium Quinoa*, L.) Seed Flour Substituted Cookies- Physicochemical, Nutritional and Storage Studies. *Curr. Res. Nutr. Food Sci.*, 6(3). <http://dx.doi.org/10.12944/CRNFSJ.6.3.18>.
- Hassan, H., Elgharably, A., Ashoush, I. S., Abd-El-Khalek, M., & Salem, S. (2023). Rheological, physical properties and sensory evaluation of biscuits enriched with Chia seed powder. *Egyptian Journal of Nutrition*, 38(2), 32—50.
- Kulczyński, B., Kobus-Cisowska, J., Taczanowski, M., Kmiecik, D., & Gramza-Michałowska, A. (2019). The Chemical Composition and Nutritional Value of Chia Seeds-Current State of Knowledge. *Nutrients*, 11(6), 1242. <https://doi.org/10.3390/nu11061242>.
- Mesías, M., Gómez, P., Olombrada, E., & Morales, F. J. (2023). Formation of acrylamide during the roasting of chia seeds (*Salvia hispanica* L.). *Food Chemistry*, 401, 134169. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134169>.
- Moreira, M. R., Sanches, V. L., Strieder, M. M., Rostagno, M. A., & Capitani, C. D. (2023). Vegan brownie enriched with phenolic compounds obtained from a chia (*Salvia hispanica* L.) coproduct: Nutritional, technological, and functional characteristics and sensory acceptance. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 34, 100835. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100835>.
- Sarkar, A., Miah, M. S., Masum, M., Amin, M. S. A., & Alam, M. (2025). Fortification of wheat biscuits with chia seed fiber and flower waste: Nutritional, antinutritional, functional, and storage properties. *Applied Food Research*, 5(1), 100864. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100864>.
- Sharma, V., Mogra, R., & Mordia, A. (2020). Effect of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds incorporation on nutritional quality of muffin mix. *Nutrition & Food Science*, 50(6), 1151—1161. <https://doi.org/10.1108/NFS-10-2019-0306>.
- Shydakova-Kamieniuka, O., Shklieriev, O., Samokhvalova, O., Artamonova, M., Stepankova, G., Bolkhovitina, O., & Rogova, A. (2020). Harnessing the technological potential of chia seeds in the technology of cream-whipped candy masses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(11(104)), 52—60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.199923>.
- Shydakova-Kamieniuka, O., Shklieriev, O., Samokhvalova, O., Artamonova, M., Stepankova, G., Bolkhovitina, O., & Rogova, A. (2020). Estimation of oxidative stability of the lipid complex of cream-shaken candies with chia seeds at storage. *EUREKA: Life Sciences*, (2), 54—62. <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2020.001192>.
- Shydakova-Kamieniuka, O., Zagorulko, A., Kasabova, K., Mikhaylov, V., Shklieriev, O., Rohova, A., Novik, A., & Lapytska, N. (2024). Applying chia seeds to improve the structural characteristics and nutrient composition of whipped candies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(11(132)), 73—83. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318530>.
- Statista Market Insights. (2024, February). *Confectionery and snacks market: Data and analysis (Study ID 48835)*. Einar Willumsen. Взято з https://einarwillumsen.com/wp-content/uploads/2024/02/study_id48835_confectionery-and-snacks-market-data-and-analysis.pdf.

Vera-Céspedes, N., Muñoz, L. A., Rincón, M. Á., & Haros, C. M. (2023). Physico-Chemical and Nutritional Properties of Chia Seeds from Latin American Countries. *Foods*, 12(16), 3013. <https://doi.org/10.3390/foods12163013>.

Zia-ud Din, Alam, M., Ullah, H., Shi, D., Xu, B., Li, H., & Xiao, C. (2021). Nutritional, phytochemical and therapeutic potential of chia seed (*Salvia hispanica* L.). A mini-review. *Food Hydrocolloids for Health*, 1, 100010. <https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2021.100010>.

Зміст журналу
«Наукові праці Національного університету харчових технологій»
за 2025 рік

Автоматизація та інформаційні технології

<i>Залозний Р. В., Засць Н. А.</i> Системний аналіз і структура керування аквапонними системами	№ 1
<i>Бондаренко Є. А.</i> Декомпозиція твердопаливного парового енергетичного котла як об'єкта процедурного керування	№ 2
<i>Жданова О. Г., Рибачук Л. В., Лівенцов М. В., Ткаченко І. А., Щеглов В. Д.</i> Дослідження проблеми ефективного розміщення мережевих об'єктів з використанням методів комбінаторної оптимізації	№ 2
<i>Мошенський А. О., Савченко І. О.</i> Методологія розробки системних стратегій автоматизованого екологічного моніторингу в контексті інформаційних систем підтримки прийняття рішень	№ 3
<i>Величко І. В., Сідлецький В. М.</i> Прогнозування станів автоматизованих HVAC систем на основі нейромережевої моделі об'єкта в NLMPC	№ 3
<i>Залозний Р. В., Засць Н. А., Луцька Н. М.</i> Розробка та дослідження динамічної моделі біофізичних процесів в аквапонних системах	№ 3
<i>Новак М. С., Смітюх Я. В.</i> Визначення допустимих відхилів теплового стану сталевих конструкцій під час валідаційних експериментів	№ 4
<i>Поддукін В. В.</i> Дослідження адаптивних людино-машинних інтерфейсів та їхньої інтеграції в автоматизовані системи хлібопекарського виробництва	№ 4
<i>Паровенко М. Д., Клименко О. М.</i> Оптимізація керування технологічним процесом кип'ятіння суслу з використанням спостерігача для оцінки стану системи	№ 4
<i>Струзік В. А.</i> Застосування рефакторингу для підвищення безпеки програмного забезпечення	№ 4
<i>Кривець О. Ю., Харкянен О. В.</i> Дослідження інтеграції штучного інтелекту у системи запобігання природно-техногенним загрозам	№ 5
<i>Погрібняк М. С.</i> Інтелектуальні системи автоматизації виробничих процесів на базі машинного навчання та інтернету речей	№ 5
<i>Полупан В. В., Міркевич Р. М.</i> Моделювання та візуалізація технологічних процесів з використанням доповненої реальності	№ 5
<i>Романов М. О.</i> Онтології керування виробничими операціями у пивоварній промисловості	№ 5
<i>Павлов С. Г., Лисенко В. П., Лендел Т. І., Наконечна К. В.</i> Метод Харрінгтона в системі експрес-оцінки якості біосировини для зброджування	№ 5
<i>Мельник В. С., Смітюх Я. В.</i> Імітаційне моделювання конвективної сушарки періодичної дії як об'єкта керування	№ 6

Безпека харчових продуктів і виробництв

<i>Шульга О. С., Шульга С. І., Консорс О. К.</i> Зміни в харчовому законодавстві України за 2024 рік	№ 2
<i>Євтушенко О. В., Сірик А. О., Літвинчук С. І., Маринін А. І., Святненко Р. С.</i> Забезпечення якості та безпечності продуктів бджільництва в умовах євроінтеграції	№ 6

Біотехнології

<i>Шопінський В. В., Буценко Л. М.</i> Біотехнологічний потенціал ендофітних мікроорганізмів у підвищенні стійкості рослин до абіотичних стресів	№ 1

<i>Шопова З. С., Полищук В. Ю., Дуган О. М.</i> Теоретичний аналіз створення надпродуцентів рибофлавіну шляхом регуляції активності ізоцитратліази в аскоміцетів роду <i>Eremothecium</i>	№ 1
<i>Синявська Д. А., Грегірчак Н. М.</i> Аналіз ризиків вмісту елементних домішок в іноваційному мультишпигамовому пробіотику з наночастинками селену: безпека для споживачів	№ 2
<i>Шопінський В. В., Буценко Л. М.</i> Ендоефітні бактерії насіння сосни звичайної	№ 2
<i>Чезринцев А. І., Красінко В. О.</i> Удосконалення біотехнології інактивованих вакцин проти ньюкаслської хвороби шляхом підбору кількісного вмісту масляної фази	№ 2
<i>Скроцька О. І., Марченко В. В., Коваль Р. В.</i> Підходи до оптимізації параметрів біосинтезу наночастинок срібла	№ 2
<i>Косовець І. Р., Миколаєнко Р. М., Стабніков В. П., Резніченко Ю. М.</i> Полігідроксіалканоати як альтернатива синтетичним пластикам	№ 3
<i>Пирог Т. П., Охмакевич А. М.</i> Спільне культивування як фактор регуляції вторинного метаболізму актинобактерій	№ 3
<i>Скроцька О. І., Проценко М. Д., Жолобо О. В.</i> Біосинтез наночастинок селену при використанні бактерій: характеристика, властивості та механізми	№ 3
<i>Воронцов О. О., Стабніков В. П., Воронцов О. О.</i> Аналіз перспектив розвитку біотехнологій отримання біометану	№ 4
<i>Кравченко В. В., Ковшар І. Д., Резніченко Ю. М.</i> Біотехнологічні аспекти та практичне значення одержання полігідроксибутирату ціанобактеріями	№ 4
<i>Лич І. В., Стаднік Г. В.</i> Біотехнології в переробці молочної сироватки: отримання цінних продуктів	№ 5
<i>Ямковий О. О., Буценко Л. М.</i> Сучасні методи тестування геномодулювальної дії біологічно активних речовин	№ 5
<i>Воронцов О. О., Стабніков В. П.</i> Інтенсифікація метаногенезу шляхом попередньої обробки сировини	№ 6
<i>Скроцька О. І., Жолобо О. В.</i> Наночастинки селену в харчовій промисловості та сільському господарстві: сучасний стан досліджень, перспективи та нормативна база ЄС	№ 6
<i>Гіріна А. С., Грегірчак Н. М.</i> Розвиток ресурсозберігаючих технологій валоризації яблучних відходів у виробництві ферментованих напоїв: перспективи сталого розвитку в Україні	№ 6
Економіка, менеджмент і маркетинг	
<i>Сімкін Д. О., Петухова О. М.</i> Аутсорсинг як інструмент підвищення ефективності діяльності підприємств харчової промисловості	№ 1
<i>Страшинська Л. В., Данкеєва О. М., Закревська Л. М.</i> Трансформація вітчизняного продовольчого ритейлу в умовах кризових явищ: основні тенденції, споживча поведінка та управління відносинами з покупцями	№ 2
<i>Скопенко Н. С., Северина І. В.</i> Трансформація стратегій розвитку агрокомпаній України в умовах викликів війни	№ 2
<i>Капінус Л. В., Лелека О. О., Кучерина В. П.</i> Івент-маркетинг як інструмент формування лояльності споживачів продукції підприємства	№ 2
<i>Безпалько О. В., Гринюк Ю. М., Грищенко А. В.</i> Навігатор інклюзії: економіка праці та проблеми працевлаштування людей з інвалідністю	№ 3
<i>Арич М. І., Петухова О. М.</i> Сучасні особливості візуалізації інформації в комерційній діяльності та формуванні іміджу підприємств	№ 3
<i>Брагіна О. С.</i> Економічна сутність сталого розвитку підприємства	№ 3

<i>Роганова Г. О., Прозорова А. Р.</i> Оцінка кредитоспроможності малого підприємства	№ 4
<i>Шеремет О. О., Страшинський В. І.</i> Підвищення якості олійно-жирової продукції як фактор посилення її конкурентоспроможності на ринку	№ 5
<i>Капінус Л. В., Тур О. В., Лелека О. О.</i> Дослідження впливу цифрових маркетингових технологій на рекламну діяльність підприємств	№ 5
Механічна та електрична інженерія	
<i>Тептя В. В., Остра Н. В., Малогулко Ю. В., Сікорська О. В., Повстянко К. О.</i> Інноваційні підходи до забезпечення стабільного електропостачання і запобігання відключенням: український досвід	№ 1
<i>Авдєєва Л. Ю., Макаренко А. А.</i> Сучасні методи виробництва сушеного м'яса і м'ясних продуктів	№ 1
<i>Балюта С. М., Копилова Л. О., Сінюков Д. В., Жуков М. Ю., Кондрашевський М. С.</i> Адаптивне регулювання напруги в системах електрозабезпечення із розосередженою генерацією	№ 1
<i>Володін С. О., Мирончук В. Г., Васильківський К. В., Запорожець О. В.</i> Інженерний аналіз та оптимізація систем керування позиційними приводами в запірно-регулювальних системах продуктопроводів	№ 1
<i>Погорілий Т. М.</i> Моделювання оптимальних параметрів роботи горизонтальної центрифуги для отримання крохмалю типу «А»	№ 1
<i>Козак О. С., Десик М. Г., Теличкун В. І.</i> Аналіз способів і обладнання для охолодження хлібобулочної продукції на сучасних хлібопекарських підприємствах	№ 2
<i>Турчина Т. Я., Авдєєва Л. Ю., Макаренко А. А., Декуша Г. В.</i> Дослідження впливу структуруючих добавок на кінетику сушіння одиничних крапель гарбузових композицій і фізичний стан висушених часток	№ 2
<i>Балюта С. М., Копилова Л. О., Сінюков Д. В., Жуков М. Ю., Кондрашевський М. С., Зінкевич П. О.</i> Дослідження можливості підвищення показників якості електричної енергії в системах електрозабезпечення з нелінійним навантаженням	№ 3
<i>Філоненко В. М., Прядко М. О., Сторожук О. Т.</i> Аналіз впливу теплової енергії вторинних енергоресурсів пароконтактної технології сушіння жому на енергоефективність цукрового заводу	№ 3
<i>Пащенко Б. С., Штефан Є. В., Михайлов А. О., Михайлов О. В.</i> Дослідження структуроутворення пористих фільтруючих елементів для обладнання харчової промисловості	№ 3
<i>Туфєкчі В. І., Кривопляс-Володіна Л. О., Токарчук С. В., Дорошенко А. М.</i> Дослідження інтелектуальних методів позиціонування групових упаковок у робототехнічних системах пакувального виробництва	№ 3
<i>Козак О. С., Десик М. Г., Теличкун В. І.</i> Аналіз способів і обладнання для охолодження хлібобулочної продукції на сучасних хлібопекарських підприємствах	№ 4
<i>Слюсенко А. М., Лементар С. Ю., Пономаренко В. В.</i> Дослідження аеродинаміки сушильного агента у флюїдному днищі розпилювальної сушарки	№ 4
<i>Романюк В. Т., Шпак В. В., Зінкевич П. О.</i> Дослідження властивостей покриття з охолоджувальним ефектом на основі карбонату кальцію для проводів повітряних ліній електропередавання	№ 4
<i>Петренко В. П., Прядко М. О., Пилипенко О. Ю., Максименко Д. В.</i> Дослідження процесів теплообміну в густих стікаючих плівках розчинів, циклічно збурених хвилювими напливами під час випаровування	№ 4
<i>Зьоменко О. С., Губеня О. О.</i> Вплив густини таблетки на її міцність і зусилля пресування	№ 4

<i>Шпак В. В., Романюк В. Т., Зінкевич П. О.</i> Інноваційні технології та перспективи систем накопичення енергії в електроенергетиці	№ 5
<i>Булій Ю. В.</i> Моделювання фазової рівноваги в системі етиловий спирт—вода для оптимізації роботи брагоректифікаційних установок	№ 6
<i>Балюта С. М., Копилова Л. О., Жуков М. Ю.</i> Автоматизоване керування зарядкою електромобілів з оптимізацією оплати за електричну енергію	№ 6
<i>Мусійчук В. М., Гавва О. М., Чепелюк О. М., Чепелюк О. О.</i> Багатокритеріальне оцінювання технічного рівня обладнання для наповнення оболонок в'язко-пластичними харчовими масами	№ 6
<i>Чубенко В. В., Іващенко Н. В., Бондар В. І.</i> Перспективи вдосконалення батарей Карно для довготривалого зберігання відновлюваної енергії	№ 6
<i>Запорожець Ю. В., Зав'ялов В. Л., Саніа В. Я, Шпак В. В.</i> Вплив електроіскрових розрядів на властивості сокостружкової суміші при віброекстрагуванні з некондиційної бурякомаси	№ 6
<i>Туфекчі В. І., Токарчук С. В., Гавва О. О., Мирончук В. Г.</i> Інтелектуальні методи локалізації об'єктів у робототехнічних системах	№ 6
<i>Запорожець О. В., Володін С. О., Савчук О. С., Марценкевич Л. В.</i> Системний аналіз та оптимізація динамічних характеристик безклапанних дозаторів напірного типу	№ 6
Харчові технології	
<i>Сімахіна Г. О., Науменко Н. В.</i> Нові можливості оздоровчого харчування з позицій нутригенетики та нутригеноміки	№ 1
<i>Батраченко О. В.</i> Дослідження властивостей нових інноваційних напівфабрикатів у тістовій оболонці	№ 1
<i>Ощипок І. М.</i> Ефективна стратегія розвитку птахопереробних підприємств	№ 1
<i>Потапчук І. М., Гусятинська Н. А.</i> Використання коагулянтів і завантаження AFM для попереднього очищення води з поверхневих джерел для потреб теплосилових установок харчових підприємств	№ 1
<i>Загорулько А. М., Загорулько О. Є.</i> Удосконалення способу виробництва полікомпонентного напівфабрикату високого ступеня готовності	№ 1
<i>Сидоренко В. О., Бабич І. М., Куц А. М.</i> Наукові підходи до вибору нових сортів винограду Закарпаття для приготування ігристих вин	№ 1
<i>Якименко А. В., Мельник Л. М., Бессараб О. С.</i> Вплив кисню та аргону на адсорбційно-каталітичні процеси, що відбуваються при очищенні сортівок активним вугіллям і природними адсорбентами	№ 1
<i>Бажай-Жежерун С. А., Баїшта А. О., Рахметов Д. Б.</i> Харчова цінність смикавцю їстівного	№ 2
<i>Данилевич І. О., Пасічний В. М., Шубіна Є. А., Петрина А. Б.</i> Шляхи удосконалення технології маринованих напівфабрикатів з м'яса птиці з використанням ультразвуку	№ 2
<i>Макарова О. В., Коркач Г. В., Котузаки О. М., Чабан А. Б., Кананихіна О. М.</i> Використання вторинних продуктів переробки насіння олійних культур у технології кексів	№ 2
<i>Сімахіна Г. О., Науменко Н. В.</i> Отримання концентрату натуральних барвників для збагачення харчових середовищ	№ 3
<i>Михалевич А. П., Поліщук Г. Є.</i> Вплив процесу визрівання на якісні показники морозива сироваткового	№ 3
<i>Толстих В. Ю., Гордієнко Л. В., Коркач Г. В., Павловський С. М.</i> Збивні кондитерські вироби зниженої цукроємності з додаванням керобу	№ 3

<i>Белінський О. В., Галенко О. О.</i> Вплив біоактивних компонентів чорнозерного борошна і кукурудзяного молока на маркери здорового старіння	№ 4
<i>Сімахіна Г. О., Кочубей-Литвиненко О. В., Маслійчук О. Б.</i> Удосконалення системи і структури харчування військовослужбовців ЗСУ: теоретичні і практичні аспекти	№ 4
<i>Авдєєва Л. Ю., Макаренко А. А.</i> Реологічні властивості комплексу гарбузового пюре з мальтодекстрином	№ 4
<i>Шевченко А. О., Камбулова Ю. В.</i> Практики органічних агротехнологій і біодинаміки в Данії	№ 4
<i>Тележенко Л. М., Атанасова В. В., Козонова Ю. О., Білик К. О.</i> Інноваційні технологічні підходи до виробництва печива для закладів ресторанного господарства з використанням альтернативних видів борошна	№ 4
<i>Бартошак І. В., Поліщук Г. Є.</i> Вплив коагулянтів різного походження на показники якості сиру вершкового	№ 4
<i>Якименко А. В., Мельник Л. М.</i> Дослідження впливу фракційності палигорськіта на ступінь вилучення небажаних домішок із сортівко за нормальних умов та при розрідженні	№ 4
<i>Максимюк А. І., Павлюченко О. С., Кузьмін О. В.</i> Напрями удосконалення технології, організації виробництва та управління якістю вегетаріанських пудингів спеціального призначення для закладів ресторанного господарства	№ 5
<i>Білик О. А., Заброда А. В., Капрелянц Л. В., Непокротова Н. О.</i> Порівняльне дослідження впливу сухої пшеничної клейковини та ферментного препарату для коригування хлібопекарських властивостей борошна	№ 5
<i>Мукоїд Р. М., Булій Ю. В., Кириленко Р. Г., Сарана В. В.</i> Перспективи використання вітчизняних і закордонних сортів хмелю у пивоварінні	№ 5
<i>Юкало В. Г., Крупа О. М., Солопа М. Р.</i> Дослідження казеїнових фракцій для характеристики протейназ лактококів <i>L. lactis ssp. lactis</i>	№ 5
<i>Махінко Л. В., Махінко В. М., Грищенко А. М., Ковбаса В. М.</i> Наукові підходи до оптимізації складу харчових концентратів типу мюслі	№ 5
<i>Годунко Є. В., Бондаренко Ю. В., Юрчак В. Г.</i> Роль заквасок у формуванні якості та харчової цінності хлібобулочних і макаронних виробів	№ 5
<i>Демченко В. Л., Куницький Д. В., Маринін А. І., Рибальченко Н. П., Заремба П. Ю.</i> Особливості структури та властивості полімерних мембран на основі полівінілового спирту і наночастинок Ag/ZnO	№ 5
<i>Шевченко А. О., Загорулько А. М.</i> Вплив способів внесення порошку топінамбура в тісто з фруктозою для хлібобулочних виробів на показники їхньої якості	№ 6
<i>Оципок І. М.</i> Порівняльний аналіз цінності свинячих туш на основі сучасних методів та інструментів оцінювання якості	№ 6
<i>Юкало В. Г., Дацишин К. Є., Левін Д. С.</i> Комбінація декстранових гелів для виділення лактоферину з сироватки молока гель-фільтрацією в нативних умовах	№ 6
<i>Котляр Є. О., Єгоров Б. В.</i> Натуральні харчові добавки з виноградного насіння та ядер кісточкових фруктів	№ 6
<i>Карпетян А. А., Поварова Н. М.</i> Інноваційна білкова добавка як елемент оптимізації рецептури рубаних м'ясних напівфабрикатів	№ 6
<i>Сімахіна Г. О., Науменко Н. В.</i> Ягоди шовковиці: оздоровчі ефекти біокомпонентів та мінімізація їх втрат при зберіганні	№ 6
<i>Носенко Т. Т., Клименко О. С.</i> Синергічна дія антиоксидантів бутилгідрокситолуолу та бутилгідроксианізола на окиснювальну стабільність соєвої олії	№ 6

<i>Луканін О. С., Мельник Н. Б.</i> Формування ароматичного комплексу плодових дистилятів (на прикладі Вінницької обл.)	№ 6
<i>Махинько В. М., Грищенко А. М., Махинько Л. В., Костюк А. І.</i> Оцінювання структури хліба: огляд основних методик та їх застосування	№ 6
<i>Страшинський І. М., Пергат О. А.</i> Дослідження впливу пшеничної клітковини на властивості м'ясних і м'ясомістких котлет-бургерів	№ 6
<i>Білик О. А., Бурченко Л. М., Бондаренко Ю. В., Краєвська С. П.</i> Застосування Muntons maltichos dried regular як натурального барвника та смако-ароматоутворюючого інгредієнта в технології гостового хліба	№ 6
<i>Шидакова-Каменюка О. Г., Шкляєв О. М., Загорулько О. Є., Черевко О. І., Касабова К. Р.</i> Оцінка якості кремово-збивних цукерок з насінням чіа в процесі зберігання	№ 6
Хімічні науки	
<i>Кроніковський О. І., Чебаненко Х. В., Іщенко В. М., Кроніковська О. П., Стаднічук Н. О.</i> Аналітичні можливості карбоксилатних комплексів плюмбуму з краун-стерами	№ 4
Ювілеї	
До сторіччя з дня народження професора Олексія Лісовенка. Традиції наукової школи Лісовенка в сучасних умовах	№ 2
Новини освіти і науки	
Доробок українських науковців від видавництва CRC Press	№ 5

**Contents of the journal
"Scientific Works of the National University of Food Technologies"
for 2025**

Automation and information technologies

<i>Zaloznyi R., Zaiets N.</i> System analysis and control structure of aquaponic systems	№ 1
<i>Bondarenko Y.</i> Decomposition of a solid-fuel steam power boiler as an object of procedural control	№ 2
<i>Zhdanova O., Rybachuk L., Liventsov M., Tkachenko I., Shcheglov V.</i> Investigation of the problem of efficient placement of networked facilities using combinatorial optimization methods	№ 2
<i>Moshensky A., Savchenko I.</i> Methodology for developing systemic strategies of automated environmental monitoring in the context of decision support information systems	№ 3
<i>Velychko I., Sidletskiy V.</i> Forecasting states of automated HVAC systems based on neural networks of the object model in NLMPC	№ 3
<i>Zaloznyi R., Zaiets N., Lutska N.</i> Development and research of a dynamic model of biophysical processes in aquaponic systems	№ 3
<i>Novak M., Smityukh Y.</i> Determination of permissible deviations of the thermal state of steel structures during validation experiments	№ 4
<i>Poddukin V.</i> Study of adaptive human-machine interfaces and their integration into automated bakery production systems	№ 4
<i>Parovenko M., Klymenko O.</i> Wort boiling process control optimization using system state estimation	№ 4
<i>Struzik V.</i> Applying refactoring to improve software security	№ 4
<i>Kryvets O., Kharkianen O.</i> Research on the integration of artificial intelligence into systems for preventing natural and technological hazards	№ 5
<i>Pohribniak M.</i> Intelligent systems for automation of manufacturing processes based on machine learning and the internet of things	№ 5
<i>Polupan V., Mirkevych R.</i> Modeling and visualization of technological processes using augmented reality	№ 5
<i>Romanov M.</i> Manufacturing operations management ontologies for brewing industry	№ 5
<i>Pavlov S., Lysenko V., Lendel T., Nakonechna K.</i> Harrington's method in a system for rapid quality assessment of biogas feedstock for fermentation	№ 5
<i>Melnyk V., Smityukh Y.</i> Simulation modeling of a batch convective dryer as a control object	№ 6

Food Products and Manufacturing Safety

<i>Shulga O., Shulga S., Konsors O.</i> Food legislation changes in Ukraine for 2024	№ 2
<i>Yevtushenko O., Siryk A., Litvynchuk S., Marynin A., Svyatnenko R.</i> Ensuring the quality and safety of beekeeping products in the conditions of European integration	№ 6

Biotechnologies

<i>Shopinskyi V., Butsenko L.</i> Biotechnological potential of endophytic microorganisms in enhancing plant resistance to abiotic stresses	№ 1
<i>Shopova Z., Polishchuk V., Dugan O.</i> Theoretical analysis of the creation of riboflavin over-producers through regulation of isocitrate lyase activity in ascomycetes of the genus <i>Eremothecium</i>	№ 1
<i>Syniavska D., Hrehirchak N.</i> Risk analysis of elemental impurities in an innovative multistrain probiotic with selenium nanoparticles: safety for consumers	№ 2

<i>Shopinskyi V., Butsenko L.</i> Endophytic bacteria from seeds of scots pine	№ 2
<i>Chehrynets A., Krasinko V.</i> Improvement of biotechnology for inactivated newcastle disease vaccines through optimization of the oil phase content	№ 2
<i>Skrotska O., Marchenko V., Koval R.</i> Approaches to optimizing the parameters of silver nanoparticle biosynthesis	№ 2
<i>Kosovets I., Mykolaenko R., Stabnikov V., Reznichenko Y.</i> Polyhydroxyalkanates as an alternative to synthetic plastics	№ 3
<i>Pirog T., Okhmakevych A.</i> Co-cultivation as a factor regulating the secondary metabolism of actinobacteria	№ 3
<i>Skrotska O., Protsenko M., Zholobko O.</i> Biosynthesis of selenium nanoparticles using bacteria: characteristics, properties and mechanisms	№ 3
<i>Vorontsov O., Stabnikov V., Vorontsov O.</i> Analysis of the prospects for the development of biotechnology for biomethane production	№ 4
<i>Kravchenko V., Kovshar I., Reznichenko Yu.</i> Biotechnological aspects and practical significance of polyhydroxybutyrate production by cyanobacteria	№ 4
<i>Lych I., Stadnik H.</i> Biotechnology in whey processing: obtaining valuable products	№ 5
<i>Yamkovi O., Butsenko L.</i> Modern methods of testing the genomodular effect of biologically active substances	№ 5
<i>Vorontsov O., Stabnikov V.</i> Intensification of metanogenesis through pre-treatment of raw material	№ 6
<i>Skrotska O., Zholobko O.</i> Selenium nanoparticles in the food industry and agriculture: current status of research, prospects and EU regulatory framework	№ 6
<i>Hirina A., Hrehirchak N.</i> Development of resource-saving technologies for the valorization of apple waste in the production of fermented beverages: prospects for sustainable development in Ukraine	№ 6
Economy, Management and Marketing	
<i>Simkin D., Pietukhova O.</i> Outsourcing as a tool for enhancing efficiency in the food industry enterprises	№ 1
<i>Strashynska L., Dankeeva O., Zakrevska L.</i> Transformation of domestic food retail in the conditions of crisis phenomena: main trends, consumer behavior and management of relations with buyers	№ 2
<i>Skopenko N., Severyna I.</i> Transformation of development strategies of Ukrainian agricultural companies during the challenges of war	№ 2
<i>Kapinus L., Leleka O., Kucheryna V.</i> Event marketing as a tool for forming consumer loyalty to the company's products	№ 2
<i>Bezpalko O., Hryniuk Y., Hryshchenko A.</i> Inclusion navigator: labor economics and employment challenges of people with disabilities	№ 3
<i>Arych M., Pietukhova O.</i> Modern features of information visualization in commercial activities and formation of the image of enterprises	№ 3
<i>Brahina O.</i> The economic essence of sustainable development of an enterprise	№ 3
<i>Rohanova H., Prozorova A.</i> Assessment of the creditworthiness of a small enterprise	№ 4
<i>Sheremet O., Strashynskyi V.</i> Improving the quality of oil and fat products as a factor of strengthening its market competitiveness	№ 5
<i>Kapinus L., Tur O., Leleka O.</i> Research on the impact of digital marketing technologies on the advertising activities of enterprises	№ 5

Mechanical and Electrical Engineering

<i>Teptya V., Ostra N., Malohulko Yu., Sikorska O., Povstyanko K.</i> Innovative approaches to ensuring stable electricity supply and prevent power outages: ukrainian experience	№ 1
<i>Avdieieva L., Makarenko A.</i> Modern approaches to the production of dried meat and meat products	№ 1
<i>Baliuta S., Kopylova L., Sinyukov D., Zhukov M., Kondrashevsky M.</i> Adaptive voltage regulation in power supply systems with distributed generation	№ 1
<i>Volodin S., Myronchuk V., Vasytkivskyi K., Zaporozhets O.</i> Engineering analysis and optimization of positioning actuator control systems in locking and regulating systems of product pipes	№ 1
<i>Pohorilyi T.</i> Optimal parameters simulation of the horizontal centrifuge for receiving type "A" starch	№ 1
<i>Kozak O., Desyk M., Telychkun V.</i> Analysis of methods and equipment for cooling bakery products in modern bakeries	№ 2
<i>Turchyna T., Avdieieva L., Makarenko A., Dekusha H.</i> Research of the influence of drying carriers on the drying kinetics of single drops of pumpkin compositions and physical condition of dried particles	№ 2
<i>Baliuta S., Kopylova L., Sinyukov D., Zhukov M., Kondrashevsky M., Zinkevych P.</i> Study of the possibility of increasing quality indicators of the electrical energy in power supply systems with non-linear load	№ 3
<i>Filonenko V., Pryadko M., Storozhuk O.</i> Analysis of the impact of thermal energy of secondary energy resources of steam contact technology of pulp drying on the energy efficiency of a sugar factory	№ 3
<i>Pashchenko B., Shtefan Ye., Mikhailov A., Mikhailov O.</i> The research of structure formation of porous filter elements for food industry equipment	№ 3
<i>Tufekchi V., Kryvoplias-Volodina L., Tokarchuk S., Doroshenko A.</i> Research of intelligent methods for positioning group packages in robotic systems for packaging production	№ 3
<i>Kozak O., Desyk M., Telychkun V.</i> Analysis of methods and equipment for cooling bakery products in modern bakeries	№ 4
<i>Sliusenko A., Lementar S., Ponomarenko V.</i> Study of the aerodynamics of the drying agent in the fluidized bottom of a spray dryer	№ 4
<i>Romaniuk V., Shpak V., Zinkevych P.</i> Research of the properties of a coating with a cooling effect based on calcium carbonate for overhead power line wires	№ 4
<i>Petrenko V., Prydko M., Pylipenko O., Maksymenko D.</i> Study of heat exchange processes in dense flowing films of solutions cyclically disturbed by wave flows during evaporation	№ 4
<i>Zomenko O., Gubenia O.</i> Effect of tablet density on its strength and compression force	№ 4
<i>Shpak V., Romaniuk V., Zinkevych P.</i> Innovative technologies and prospects of energy storage systems in the electric power industry	№ 5
<i>Bulii Yu.</i> Modelling of phase equilibrium in the ethyl alcohol-water system for optimising the operation of distillation plants	№ 6
<i>Baliuta S., Kopylova L., Zhukov M.</i> Automated control of electric vehicle charging with optimization of electricity payment	№ 6
<i>Musiichuk V., Gavva O., Chepeliuk O., Chepeliuk O.</i> The multi-criterion evaluation of the technical level of equipment for filling shells with visco-plastic food mass	№ 6
<i>Chubenko V., Ivashchenko N., Bondar V.</i> Advancing Carnot batteries for long-duration renewable energy storage	№ 6

<i>Zaporozhets Yu., Zavialov V., Sapiga V., Shpak V.</i> The effect of electric spark discharges on the properties of the juice-pulp mixture during vibroextraction from substandard beet mass	№ 6
<i>Tufekchi V., Tokarchuk S., Gavva O., Myronchuk V.</i> Intelligent methods of object localisation in robotic systems	№ 6
<i>Zaporozhets O., Volodin S., Savchuk O., Martsynkevych L.</i> System analysis and optimization of dynamic characteristics of valveless pressure-type dispensers	№ 6
Food Technologies	
<i>Simakhina G., Naumenko N.</i> The novelty opportunities of healthy nutrition in terms of nutrigenetics and nutrigenomics	№ 1
<i>Batrachenko O.</i> Research of the properties of the innovative semi-finished products in a dough shell	№ 1
<i>Oshchypok I.</i> Effective strategy for the development of poultry processing enterprises	№ 1
<i>Potapchuk I., Husiatynska N.</i> Use of coagulants and AFM loading for pre-treatment of water from surface sources for the needs of thermal power plants of food enterprises	№ 1
<i>Zahorulko A., Zagorulko A.</i> Improvement of the manufacturing method of a high degree of readiness semi-finished polycomponent product	№ 1
<i>Sydorenko V., Babych I., Kuts A.</i> Scientific approaches to the selection of new grape varieties of transcarpatia for the preparation of sparkling wines	№ 1
<i>Yakimenko A., Melnyk L., Bessarab O.</i> Oxygen and argon impact on adsorption and catalytic processes occurring during purification of sortivka by active carbon and natural adsorbents	№ 1
<i>Bazhay-Zhezherun S., Bashta A., Rakhmetov D.</i> Nutritional value of <i>Cyperus esculentus</i> L.	№ 2
<i>Danylevych I., Pasichnyi V., Shubina Y., Petryna A.</i> Ways of improving the technology of marined semi-finished poultry meat using ultrasound	№ 2
<i>Makarova O., Korkach H., Kotuzaki O., Chaban A., Kananykhina O.</i> Use of oilseed processing by-products in the cake's technology	№ 2
<i>Simakhina G., Naumenko N.</i> Obtaining the natural colorant concentrate for enrichment of food bases	№ 3
<i>Mykhalevych A., Polishchuk G.</i> Impact of the aging process on the quality indicators of whey ice cream	№ 3
<i>Tolstykh V., Gordiienko L., Korkach H., Pavlovsky S.</i> Aerated confectionery products with reduced sugar content and carob addition	№ 3
<i>Belinskyi O., Galenko O.</i> The effect of bioactive components of black-grain flour and corn milk on markers of healthy aging	№ 4
<i>Simakhina G., Kochubey-Lytynenko O., Masliychuk O.</i> Improving the system and structure of AFU personnel nutrition: theoretical and practical aspects	№ 4
<i>Avdieieva L., Makarenko A.</i> Rheological characteristics of a composite based on pumpkin puree and maltodextrin	№ 4
<i>Shevchenko A., Kambulova Yu.</i> Organic and biodynamic agricultural practices in Denmark	№ 4
<i>Telezhenko L., Atanasova V., Kozonova Yu., Bilyk K.</i> Innovative technological approaches to cookie production for the foodservice industry using alternative types of flour	№ 4
<i>Bartoshak I., Polishchuk G.</i> Influence of coagulants of different origin on the quality indicators of cream cheese	№ 4
<i>Yakimenko A., Melnyk L.</i> Study of the effect of palygorskite fractionation on efficiency of removing undesirable impurities from sortivkas under normal and reduced pressure conditions	№ 4

<i>Maksymiuk A., Pavliuchenko O., Kuzmin O.</i> Directions for improving technology, production organization and quality management of special-purpose vegetarian puddings for restaurant enterprises	№ 5
<i>Bilyk O., Zabroda A., Kaprelyants L., Nepokrytova N.</i> Comparative study of the influence of dry wheat gluten and enzyme preparation for adjusting the bakery properties of flour	№ 5
<i>Mukoid R., Bulii Yu., Kyrylenko R., Sarana V.</i> Prospects for the use of national and foreign hop varieties in brewing	№ 5
<i>Yukalo V., Krupa O., Solopa M.</i> Use of casein fractions to characterize proteinases of lactococci <i>L. lactis</i> ssp. <i>lactis</i>	№ 5
<i>Makhynko L., Makhynko V., Hryshchenko A., Kovbasa V.</i> Scientific approaches to the optimization of muesli food concentrate composition	№ 5
<i>Godunko Ie., Bondarenko Yu., Yurchak V.</i> The role of sourdough starters in shaping the quality and nutritional value of bakery and pasta products	№ 5
<i>Demchenko V., Kynytskyi D., Marynin A., Rybalchenko N., Zaremba P.</i> Structural features and properties of polymer membranes based on polyvinyl alcohol and Ag/ZnO nanoparticles	№ 5
<i>Shevchenko A., Zahorulko A.</i> Influence of methods of adding artichoke powder into dough with fructose for bakery products on their quality indicators	№ 6
<i>Oshchypok I.</i> Comparative analysis of the value of pork carcasses based on modern methods and quality assessment tools	№ 6
<i>Yukalo V., Datsyshyn K., Levin D.</i> Combination of dextran gels for the obtaining of lactoferrin from milk whey by gel filtration in native conditions	№ 6
<i>Kotliar Ye., Iegorov B.</i> Natural food supplements from grape seeds and stone fruit kernels	№ 6
<i>Karapetian A., Povarova N.</i> Innovative protein additive as a component for optimizing the formulation of minced meat semi-finished products	№ 6
<i>Simakhina G., Naumenko N.</i> Mulberries: the healthy effects of biocomponents and minimizing their losses during storage	№ 6
<i>Nosenko T., Klymenko O.</i> Synergic effect of antioxidant butylhydroxytoluene and butylhydroxyanisole on the soybean oil oxidation stability	№ 6
<i>Lukanin O., Melnyk N.</i> Formation of the aromatic complex of fruit distillates (based on the example of Vinnytsia region)	№ 6
<i>Makhynko V., Hryshchenko A., Makhynko L., Kostiuk A.</i> Evaluation of bread structure: a review of principal methods and their applications	№ 6
<i>Strashynskyi I., Perhat O.</i> Influence of wheat fiber on the properties of meat and meat-containing burger patties	№ 6
<i>Bilyk O., Burchenko L., Bondarenko Yu., Kraievska S.</i> Application of Muntions maltichoc dried regular as a natural colorant and flavor-forming ingredient in toast bread technology	№ 6
<i>Shydakova-Kameniuka O., Shkliatiev O., Zagorulko O., Cherevko O., Kasabova K.</i> Evaluation of the quality of cream-whipped candies with chia seeds during storage	№ 6
Chemical sciences	
<i>Kronikovskiy O., Chebanenko K., Ischenko V., Kronikovska O., Stadnichuk N.</i> Analytical potentials of lead carboxylate complexes with crown ethers	№ 4

ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Шановні колеги!

Редакційна колегія журналу «Наукові праці Національного університету харчових технологій» запрошує вас до публікації наукових праць (<http://sw.nuft.edu.ua>).

До друку приймаються рукописи, які раніше не були опубліковані в друкованих та електронних виданнях. Автор, який подає матеріали до друку, зберігає за собою всі авторські права та надає відповідному виданню право першої публікації, дозволяючи розповсюджувати матеріал із зазначенням авторства й джерела первинної публікації, а також погоджується на розміщення її електронної версії на сайті Національної бібліотеки ім. В. І. Вернадського та у відкритому доступі в електронній мережі університету. Автор надає право редакційній колегії на рецензування та відхилення поданих для опублікування матеріалів. В одному номері може бути видана лише одна стаття автора (як власна, так і в співавторстві).

На електронну адресу журналу (prnuht@nuft.edu.ua) необхідно надіслати такі документи:

- файл статті;
- рецензію доктора наук певної галузі (за тематичною спрямованістю статті). Якщо один із авторів статті є доктором наук, то рецензія не обов'язкова;
- заяву з підписами автора(-ів) про те, що надіслана стаття раніше не друкувалася і не подана до будь-яких інших видань.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Статті подаються у вигляді вичитаних роздруківок на папері формату A4 (поля з усіх сторін по 2 см, Time New Roman, кегль 14, інтервал 1,5) та електронної версії (редактор Microsoft Word). У тексті статті не повинно бути порожніх рядків. Між словами допускається лише один пробіл. Усі сторінки тексту мають бути пронумеровані.

Обсяг дослідницької статті має бути не менше 10 сторінок (без урахування анотацій та списку використаних джерел). У дослідницькій статті має бути проаналізовано не менше 15 джерел. Обсяг оглядової статті має бути не менше 25 сторінок (без урахування анотацій та списку використаних джерел). В оглядовій статті повинно бути проаналізовано не менше 40 джерел.

ПОСЛІДОВНІСТЬ СТРУКТУРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СТАТТІ

1. Індекс УДК.
2. Назва статті (англійською та українською мовами).
3. Ініціали та прізвища авторів англійською та українською мовами.
4. Анотація англійською та українською мовами (не менше 1800 символів з пробілами). Анотація має бути максимально інформативною, це окремий текстовий документ, у якому лаконічно викладені результати дослідження. У тексті анотації не варто використовувати загальні фрази, вказувати несуттєві деталі й загальновідомі положення. Також слід уникати прямих повторів будь-яких фрагментів статті.
5. Ключові слова (5—6 слів/ключових словосполучень англійською та українською мовами).
6. Структура текстової частини:
 - постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими практичними завданнями;
 - аналіз останніх досліджень і публікацій, на які спирається автор;
 - формулювання мети статті;
 - викладення основних результатів дослідження;
 - висновки і перспективи подальших наукових досліджень.
7. Після тексту статті в алфавітному порядку наводиться список літературних джерел.

Бібліографічні описи оформляються згідно з міжнародним стилем APA. Бібліографічний опис подається мовою видання. Не допускається посилання на неопубліковані матеріали. У переліку джерел мають переважати посилання на наукові праці останніх років. Наприкінці кожної публікації наводиться ідентифікатор DOI у форматі <https://doi.org/.....>, якщо він є, або посилання на публікацію. Також слід обмежити посилання на власні публікації, оскільки це знижує наукову цінність статті та індекс цитування автора. Не можна посилатись на національні стандарти, технічні умови, підручники, конспекти лекцій, лабораторні практикуми та іншу ненаукову літературу. Посилання на патенти слід робити в тексті статті, вказавши лише номер та назву патенту.

У статті мають бути проаналізовані напрацювання вчених з усього світу. На основі аналізу сучасних статей з англомовних журналів має бути доведена актуальність теми у світі, визначені питання, які потребують вирішення, сформульована мета дослідження.

9. Таблиці (у Word або Excel) можна подавати як у тексті, так і в окремих файлах (на окремих сторінках). Кожна таблиця повинна мати тематичний заголовок, набраний напівжирним шрифтом, і порядковий номер (без знака №), якщо таблиць кілька. Слово

«Таблиця» і номер друкуються курсивом, заголовок — напівжирним шрифтом. Таблиці повинні мати книжковий формат і вільно вміщатися у висоту і ширину журнальної сторінки.

10. Ілюстрації (креслення, рисунки, схеми, діаграми) мають бути розміщені в тексті. **Обов'язковою вимогою** є надсилання оригінальних файлів рисунків, створених у програмах-редакторах Corel Draw X6, Origin. Всі елементи рисунка (типи, товщина і колір ліній, шрифт текстів тощо) мають вільно редагуватися у наявному програмному забезпеченні). Рисунки в растрових форматах (bmp, gif, jpeg, tif) або у форматі pdf не приймаються до розгляду, оскільки не можуть вільно редагуватися. **Вимоги до оформлення рисунків:** вісь координат — 0,2 мм, без сітки, сам рисунок (наприклад, крива) — 0,35 мм, текст в рисунку — Times New Roman 9,5, ширина рисунка — до 13 см. Всі рисунки мають бути чорно-білими. Підписи до рисунків набираються безпосередньо під рисунками прямим напівжирним шрифтом.

Фотографії мають бути чіткими та контрастними (формати TIF, JPG з роздільною здатністю 300 dpi), розмірами 6×9. Фотографії друкуються в разі крайньої потреби, якщо наведена на них інформація має значну наукову цінність. Авторам краще завантажити фотографії у хмарний сервіс і в списку літератури дати на них посилання.

11. Математичні формули повинні бути роздруковані з правильним виділенням верхніх і нижніх індексів. Нумерація формул здійснюється арабськими цифрами у круглих дужках біля правого поля сторінки. Індеси від скорочених українських слів друкуються прямим шрифтом малими літерами. В індексах, що складаються з двох скорочених слів, після першого скороченого слова ставиться крапка, після другого — крапка не ставиться. Цифри в індексах також друкуються прямим шрифтом. Індеси, позначені латинськими літерами, друкуються курсивом. У формулах літери латинського алфавіту набираються курсивом, грецького й українського — прямим шрифтом.

Хімічні формули набираються прямим шрифтом. Математичні символи, що входять до складу хімічних формул, — курсивом.

Формули вставляються безпосередньо в текст. Прості формули набираються з клавіатури, а складні — за допомогою редактора формул Microsoft Equation 3.0 object або Math Type 5.6. Інші версії редакторів формул є неприйнятними. Символи вставляються тільки через таблицю символів. Скорочення позначень одиниць фізичних величин мають відповідати Міжнародній системі одиниць (SI).

12. Відомості про авторів статті повинні бути наведені за єдиним зразком у вказаному порядку: прізвище (прописними літерами), ім'я та ім'я по батькові (повністю); наукове звання; посада чи професія, місце роботи; телефон, E-mail.

13. Дата надходження статті до редакції (після тексту надрукованого матеріалу).

Використання автоматичного перекладу наукового тексту (статті, анотації, ключових слів) **не допускається**. Переклад має бути належної якості.

Відсутність будь-якого з пунктів переліку, зазначеного вище, рецензії, невідповідність вимогам до оформлення, наявність орфографічних, граматичних, стилістичних помилок, автоматичний переклад елементів матеріалу є підставою для **відмови** в прийнятті статті до друку.

Автор несе відповідальність за додержання вимог чинного законодавства при підготовці матеріалів, у тому числі норм авторського права і достовірність наведених фактичних даних (цитат, посилань, імен, назв тощо).

Адреса редакції:

Національний університет харчових технологій
вул. Володимирська, 68,
корпус Б, к. 412, м. Київ, 01601

Контактні телефони: міський — (044) 287-92-95, внутрішній — 92-95.

E-mail: npnuht@nuft.edu.ua

SUBMISSION GUIDELINES

Dear colleagues,

The editorial board of the Journal "Scientific works of the National University of Food Technologies" invites you to the publication of your manuscripts (<http://sw.nuft.edu.ua>).

Only the manuscripts that have not previously been published in print and electronic media are accepted. The author who submits materials for publication reserves the copyright and provides the right of first publication to the Journal, allows to distribute the manuscript indicating the authorship and the primary source of publication and agrees to placing the electronic version of the manuscript on the website of the V. I. Vernadsky National Library of Ukraine, publicly available electronic network of the University. The author gives the right to the editorial board to review and reject the material submitted for publication. The author can publish one manuscript (of his/her single authorship or co-authored) per every issue of the Journal.

The following documents are necessary to be sent to the e-mail address of the journal (npuht@nuft.edu.ua):

- Electronic version of the manuscript;
- A review of the manuscript by a doctorate of the corresponding branch of science. If one of the authors is a doctorate him/herself, then a review is not necessary;
- A statement signed by the author(s) that the manuscript has not been published and is not submitted for publication.

REQUIREMENTS FOR MANUSCRIPTS

The electronic version should be submitted in a Microsoft Word document (margins of 2 cm, Time New Roman, type size 14, spacing 1.5). There should be no blank lines in the manuscript. No extra spaces are allowed between the words. All pages of the manuscript should be numbered.

The number of pages of the research article should be at least 10 (excluding abstracts and references). At least 15 references should be analyzed in the research paper. The length of the review article should be at least 25 pages (excluding abstracts and references). At least 40 references should be analyzed in the review article.

The use of automatic translation for any part of your text (manuscript, abstract, keywords) is not allowed. Translation must be of good quality.

The editors reserve the right to edit the manuscript scientifically and literary.

SEQUENCE OF STRUCTURAL ELEMENTS OF THE MANUSCRIPT

1. UDC index.
2. The title of the manuscript (in English, Ukrainian).
3. Full names of the authors in English, Ukrainian (not more than four authors).
4. An abstract in English, Ukrainian (not less than 1800 characters with spaces). The abstract should be highly informative, it is a separate text document in which the results of the research must be summarized. General phrases, insignificant details and well-known provisions shouldn't be written in the abstract. Direct repetitions of any parts of the article should be also avoided.
5. A list of keywords (5—6 words or key phrases in English, Ukrainian).
6. The structure of the text:
 - Problem definition and its relationship with important practical tasks;
 - Analysis of recent studies and publications related to subject matter of the manuscript;
 - Problem statement (statement of purpose of the manuscript);
 - Presentation of the main material;
 - Conclusions and recommendations for further research.
7. A list of references of their quotation should be presented after the text of the manuscript.

Bibliographic descriptions should be made according to international style APA. Bibliographic descriptions should be submitted in the language of their edition. Links to unpublished materials are not allowed. The list of references should contain links only to recent and relevant studies. At the end of each reference, the DOI identifier is provided in the format <https://doi.org/>, if it is, or a link to the publication. National standards,

specifications, textbooks, lecture notes, laboratory workshops and other non-scientific literature must not be referenced. References to patents should be made in the text of the article, indicating only the number and title of the patent. In the list of references, the sources should be presented in alphabetical order.

The investigations of scientists from all over the world should be analyzed in the article. Based on the analysis of modern articles from English-language journals, the relevance of the topic in the world should be proved, the issues which need to be solved should be identified, and the purpose of the research should be formulated.

8. Tables (in Word and Excel) can be submitted both in the text of the manuscript and in separate files (on separate pages). Each table should have a title, typed in bold, and its serial number if there are several tables. The word "Table" and number are printed in italics; the title is printed in bold. Tables should be in book format and fit freely in the height and width of the journal page.

9. Figures, images and tables should be performed in Corel Draw, Origin on white paper and placed both in the text and in separate files. Captions should be typed in bold directly under the figures. Images must be clear and contrasting (TIF, JPG with a resolution of 300 dpi); the size 6×9. Photos are printed in case of extreme necessity, if they provide information of the significant scientific value.

10. Mathematical formulas should be typed with the correct placing of upper and lower indices. The formulas should be numbered by Arabic numerals in parentheses at the right margin of the page. The indices of Ukrainian abbreviated words should be typed in bold and in lower case. The first word of an index, consisting of two abbreviated words, should be followed by a dot, and the second word has no dot. The numbers in the indexes are typed in upright font. Indexes should be typed in Latin letters and in italics. In formulas, the letters of Latin alphabet are typed in italics; Greek and Ukrainian letters are in upright font.

Chemical formulas should be typed in upright font. Mathematical symbols that make up the chemical formulas should be typed in italics.

Formulas should be put directly into the text. Simple formulas are typed from the keyboard, and complex — using the Microsoft Equation 3.0 object or MathType 5.6. Other equation editors are unacceptable. The characters are inserted only through the symbol table. The contraction of physical units must comply with the rules of the International System of Units (SI).

11. Information about the authors should be given as follows: second name (in uppercase letters), first name and patronymic (in full); academic title; position or profession, place of work; phone number, E-mail.

12. The date when the manuscript was received by the editorial board.

The use of **automatic translation** for any part of your text (manuscript, abstract, keywords) is **not allowed**. Translation must be of good quality.

The absence of any item listed above; absence of abstracts; non-compliance to the design requirements; spelling, grammatical, stylistic errors; automatic translation of any part of the manuscript are the grounds **for refusal** to accept the manuscript for publication.

The author is fully responsible for compliance with current legislation, including the rules of copyright and the consistency of data (quotations, references, names, etc.).

Editorial office address:

National University of Food Technologies
Volodymyrska str., 68,
building Б, room 412, 01601 Kyiv, Ukraine
E-mail: npnuht@nuft.edu.ua